

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СДВИЖЕНИЯ ПОРОД ВОКРУГ ОДИНОЧНОЙ ПРОТЯЖЕННОЙ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ

Сажнев В.П., Назимко В.В. (ДонГТУ, г. Донецк, Украина)

На основі математичного та фізичного моделювання встановлений просторовий характер зрушень оточуючого підготовчу виробку масиву. Будь-який гірський масив що має кінцеву міцність не може переміщуватись у порожнину протягнутої підземної виробки одночасно та поступово. Внаслідок дефіциту ступенів свободи масив неминуче має розділитися на кластери, що примушують сусідні блоки переміщатися по черзі в просторі та часу. Ці блоки змушені рухатись то вправо, то вліво, то вперед, то назад відносно вісі виробки, то швидше опускатись, то сповільнювати свій рух, щоб переміщуватись по шляху найменшого опору узгоджуючи свій взаємний рух. Така поведінка відображає незворотні геомеханічні процеси, які принципово відрізняються від пружних, що відбуваються при умові плоскої деформації.

Spatial movement of surrounding an underground roadway rock mass has been discovered by computer and physical modeling. Any rock mass could not move into the opening instantaneously and smoothly. As a result of the degree of freedom deficiency, the rock mass must separate into clusters what forces to move adjacent blocks by turn in time and in space. These blocks should move forth and back, to accelerate or decelerate to coordinate their movements into the cavity. Such a behavior reflects irreversible processes that are quite different from elastic behavior of vertical cross section of the roadway in plane strain state.

В настоящее время существующие представления о сдвигении вмещающих протяженную подготовительную

выработку (ППВ) пород исходят из того, что все ее поперечные сечения равноценны и при однородном поле напряжений испытывают плоскую деформацию. Однако по наблюдениям авторов данной статьи допущение о плоской деформации в указанных условиях неправомерно, что приводит к недооценке резервов устойчивости выработки. Для исследования пространственного эффекта сдвижений вокруг ППВ были проведены компьютерное и физическое моделирование, а также шахтные инструментальные наблюдения.

Математическое моделирование пространственных сдвижений пород в окрестности ППВ проведено с целью качественного сравнения его результатов с последующим физическим моделированием и натурным экспериментом.

1. Расчет пространственных перемещений на контуре ППВ

Примененный метод определения напряженно-деформированного состояния вмещающих выработанное пространство пород «MULSIM» [1] основан на следующем. Вызванные образованием горной выработки перемещения и напряжения в точках $n = 1 \dots N$ массива, примыкающего к выработанному пространству, определяются в терминах дислокаций $D_n (D_1, D_2, D_3)$ или скачков перемещений (разрывов непрерывности перемещений) множества 'n' пар сходственных точек кровли и почвы исходного (первоначально недеформированного) контура выработки на базе, равной высоте выработки t . Прототипом компоненты D_3 в реальных условиях шахты является конвергенция (сближение) кровли и почвы, тогда как D_1 и D_2 представляют их (кровли и почвы) продольное и поперечное относительные смещения. Другими словами, знание векторов дислокаций D_n на соответствующим образом подобранном множестве точек позволяет, в частности, судить об изменении формы сечения выработки после перераспределения напряжений вокруг выработанного пространства. Перемещения пород кровли и почвы находятся в результате решения системы линейных алгебраических уравнений вида:

$$\sum_{m \in G} [C_{mn}] \cdot D_m - [K_n] \cdot D_n = 0, \quad (1)$$

$$\sum_{m \in G} [C_{mn}] \cdot D_m = -P_n,$$

где $[C_{mn}]$ и $[K_n]$ – матрицы коэффициентов влияния и жесткостей соответственно $[Н/м^3]$;

P_n – вектор давления на глубине залегания элемента 'n' $[Pa]$;

D_m, D_n – векторы дислокаций на всем поле их определения (m) и в зоне неотработанного угольного пласта (n) $[м]$.

Матрица жесткости ('локальной') имеет структуру:

$$[K_n] = (1/t_n) \cdot \begin{bmatrix} E & 0 & 0 \\ 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad (2)$$

где E и G – модули упругости породы 1-го (модуль Юнга) и 2-го рода соответственно.

Матрица коэффициентов влияния $[C_{mn}]$ (глобальная) формируется на основе идей теории потенциалов численными методами непосредственно перед численным же решением основной системы уравнений в составе одного программного пакета.

Согласно вышеописанной методики для моделирования выбраны следующие исходные условия. Расчетная область имеет форму квадрата и разбита на два уровня элементов той же формы. Первый уровень состоит из разбивки области на 100 крупных элементов с размером стороны 6,3 м. Каждый из этих элементов состоит из 25-ти более мелких, составляющих второй уровень разбивки. Общее количество элементов составило 250. Такое разбиение позволило провести анализ напряженно-деформированного состояния с достаточной точностью.

В центре расчетной области расположена протяженная одиночная подготовительная выработка прямоугольного сечения с размерами по длине, ширине и высоте, соответственно 32 м, 5 м и 2 м. Тот факт, что ее длина превышает максимальный поперечный размер более чем в 6 раз дает основание квалифицировать ее как протяженную, в которой можно выделить ряд плоско-деформированных сечений. Физико-механические свойства пород окружающего выработку массива заданы одинаковыми для максимального исключения влияния горно-геологических факторов на картину смещений. Моделируемый массив состоял из песчано-глинистых пород горизонтального залегания. Модуль упругости 30 ГПа, коэффициент Пуассона - 0,3, предел прочности пород на одноосное сжатие 40 МПа, сцепление составляло 1,5 МПа, угол внутреннего трения 40° . Выработка смоделирована путем имитации пустоты в каждом из узлов второго уровня, которые ее составляли. Глубина заложения выработки менялась от 600 до 1200 м с шагом 200 м.

В результате имитации повышения горного давления, получены распределения изолиний перемещений пород вдоль трех осей координат для четырех этапов моделирования. Оси X и Y расположены в горизонтальной плоскости, а ось Z - в вертикальной. При этом ось X совпадает с центральной осью выработки, а ось Y перпендикулярна ей.

Анализ полученных диаграмм показал, что характер распределения изолиний дислокаций моделируемых пород в процессе их смещения в полость выработки оставался неизменным при любом уровне нагрузки. Компьютерное моделирование свидетельствует о монотонном увеличении числовых значений сдвижений при неизменной качественной картине распределений. Причем, смещения кровли и почвы также имеют одинаковый характер, а смещение их относительно друг друга в горизонтальной плоскости отсутствует. В связи с этим, приведем распределения изолиний в кровле выработки по всем трем осям координат на последнем этапе моделирования, как наиболее наглядный вариант (рис. 1-3). Цифры на изолиниях

отражают величину смещений в метрах натуры. Причем, отрицательные значения соответствуют направлению смещений против направления осей X и Y, а вдоль оси Z – опусканию кровли.

Распределение смещений вдоль оси выработки на рис. 1 отражает типичную для условий плоской деформации в упругой среде картину. На диаграмме видны только проявления «краевых эффектов» на концах выработки, размер зоны которых позволяет определить граничные условия (отступ от края расчетной области или рамы стенда физической модели) при фиксировании смещений вдоль оси X. Для заданных условий моделирования величина отступа составляет 0,5 ширины выработки.

Смещения вдоль оси Y более ярко выражены, чем предыдущие (см. рис. 2). В этом направлении им реализоваться значительно проще для условий подобных моделей. Анализ характера распределения изолиний данных сдвижений показал их явную симметричность относительно центральной оси выработки. При этом, ориентация изолиний этих поперечных сдвижений совпадает на протяженном участке с той же осью выработки. Данная закономерность наблюдалась на протяжении всего моделирования независимо от величины имитируемого горного давления при поступательном росте величин смещений. Влияние краевой зоны для условий регистрации данных смещений составило 0,6 диаметра выработки.

Опускание кровли представлено на рис. 3. Характер распределения изолиний аналогичен смещениям вдоль оси Y. Монотонное увеличение уровня смещений пород по мере увеличения нагрузки не привело к изменению характера распределения изолиний. Отмечается та же закономерность параллельности ориентации и симметричности распределения изолиний вдоль оси выработки. Влияние краевых эффектов распространяется на величину 0,6 ширины выработки, что соответствует предыдущему подобному показателю. Окончательно для всех смещений принимаем граничные условия со стороны торцов выработки с отступом от края расчетной области (рамы стенда физической модели) на 0,6 ширины

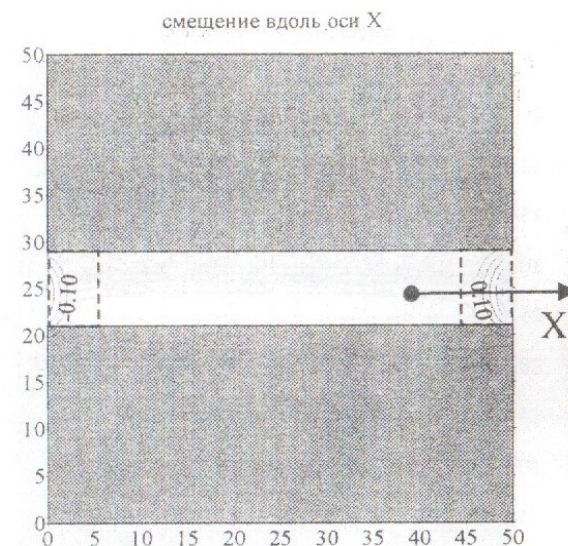


Рис. 1. Распределение изолиний перемещений моделируемых пород вдоль оси выработки (ось X)

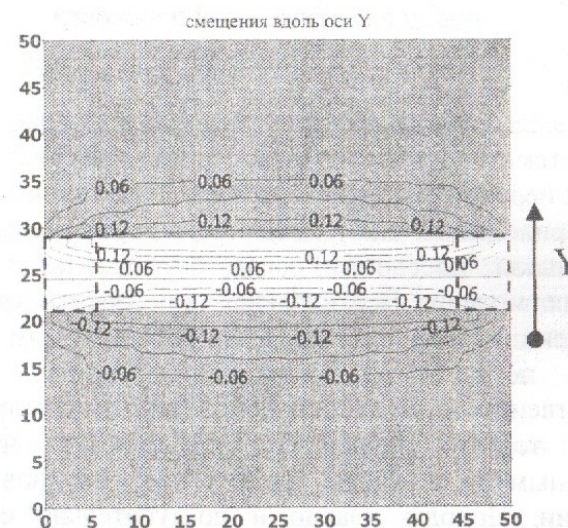


Рис. 2. Диаграмма распределения изолиний перемещений моделируемых пород перпендикулярно оси выработки (ось X)

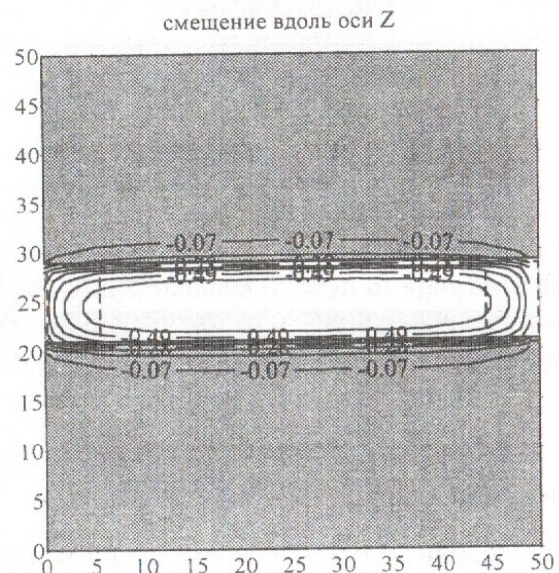


Рис. 3. Распределение изолиний перемещений моделируемых пород в вертикальной плоскости

выработки.

Для исследования пространственности сдвижений пород по итогам математического моделирования, построена диаграмма векторных перемещений (поле перемещений) в плоскости кровли (рис. 4). Приведенная диаграмма отражает перемещение пород в горизонтальной плоскости после осуществления последнего нагружения модели. Вертикальная компонента отсутствует в виду перпендикулярного к приведенной плоскости направления смещения пород. Из диаграммы отчетливо видно, что пространственность смещений полностью отсутствует. Векторы отражают только смещения вдоль оси Y, что является закономерным фактом для упругих сред в условиях плоской деформации. Породы плавно и поступательно смещаются в полость выработки, изгибая при этом кровлю в симметричную относительно центральной оси выработки складку.

Исходя из результатов данного моделирования можно сделать вывод об одинаковости уровня смещений и характера

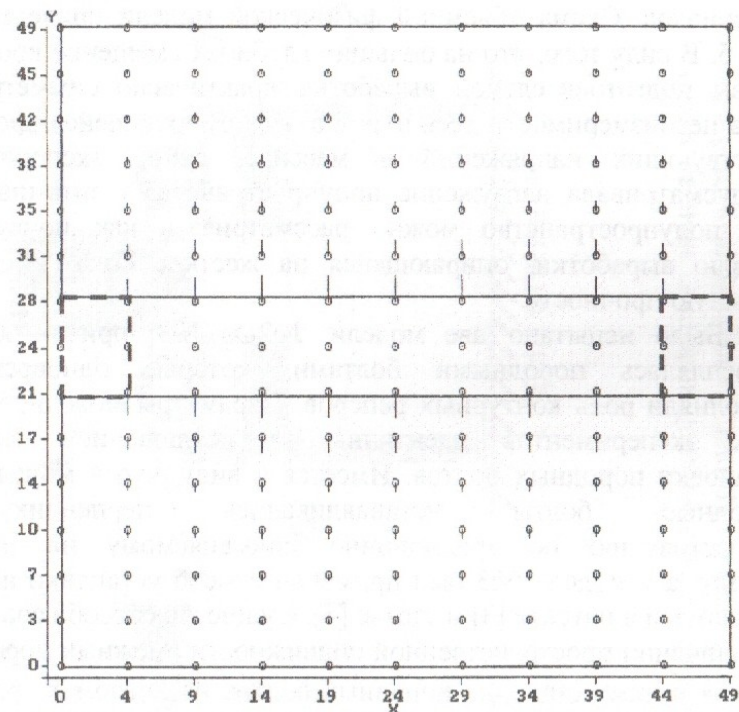


Рис. 4. Диаграмма векторных перемещений моделируемых пород в горизонтальной плоскости

распределения их изолиний в любом сечении ППВ, что является закономерным для упругой среды. На основе подобных расчетов многие авторы делают ошибочный вывод о равноценности всех сечений реальной одиночной протяженной выработки и рассматривают ее поперечное сечение как типичное.

2. Исследование пространственной кинематики и динамики сдвижений на физической модели

Модель с вертикальной ориентацией породных болтов

Для изучения закономерностей сдвижений пород в окрестности ППВ была использована стандартная [2] методика физического моделирования на моделях из эквивалентных

материалов. Схема объемной физической модели приведена на рис. 5. В силу того, что на больших глубинах смещение кровли и почвы подготовительной выработки практически симметрично из-за несоизмеримости веса пород в деформирующейся кровле и действующих напряжений в массиве, схема эксперимента предусматривала нагружение полупространства 6 штампами 7. Это полупространство можно рассматривать как почву или кровлю выработки, опирающейся на жесткие бока, имеющие большую прочность.

Было испытано две модели: №2 и №3, причем кровля закреплялась породными болтами, которые одновременно выполняли роль контурных реперов. Параметры моделирования двух экспериментов идентичны за исключением способа установки породных болтов. Имеется в виду, что в модели №2 породные болты устанавливались перпендикулярно напластованию по традиционно применяемому на шахтах методу, а в модели №3 был применен способ установки анкера, описанный в патенте [3] и статье [4]. Сущность способа состоит в ограничении пространственной подвижности смежных породных блоков путем установки породных болтов под углом α равным $5-40^\circ$ по отношению к ожидаемому направлению смещения пород, причем наклон болтов осуществляется в плоскости, не совпадающей с плоскостью поперечного сечения выработки и отклоняющейся от нее на угол β равный $5-90^\circ$.

Область в пределах установки породных болтов имела размеры 60×180 мм (3×9 м в пересчете на натуру). Границы этой области совпадают с местоположением головок крайних породных болтов. При этом крайние болты устанавливались вдоль оси выработки на расстоянии $0,8$ ширины выработки от ее торцов, что больше установленного краевого эффекта ($0,6$ ширины на математической модели). Следовательно полученные закономерности распределения смещений на физической модели будут объясняться действительно объективно существующим пространственным механизмом сдвижений вдоль ППВ, а не возможными краевыми эффектами. Этот момент существенный для обеспечения достоверности основных выводов.

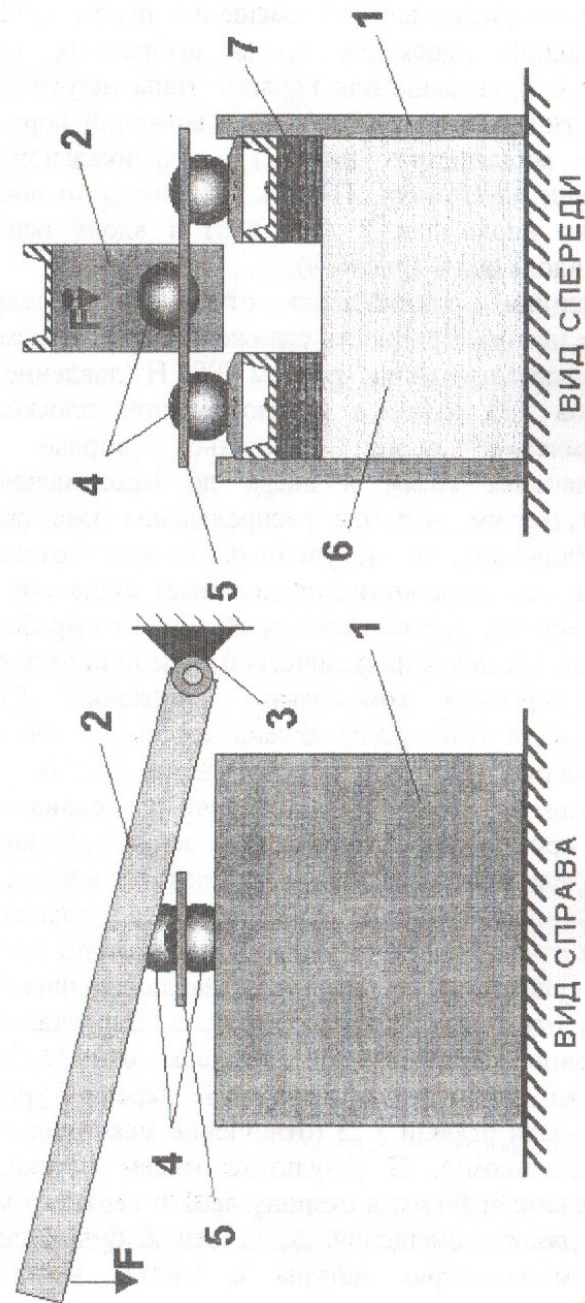


Рис. 5. Схема стенда для отработки объемной физической модели из эквивалентных материалов: 1 - рама стенда; 2 - силовой рычаг; 3 - шарнир рычага; 4 и 5 - шарнирная система для передачи и равномерного распределения нагрузки от рычага на тело модели; 6 - тело модели; 7 - силовые поршни.

Проведем анализ распределений смещения пород модели №2 в горизонтальной плоскости вдоль выбранных осей координат. На рис. 6 приведены для первого этапа нагружения (всего их было 9) типичные распределения сдвижений пород в горизонтальной (в миллиметрах натуре) и вертикальной (в миллиметрах модели) плоскостях. То есть, по плоскости почвы (кровли) выработки вдоль оси X (рис. 6, а) и вдоль оси Y (рис. 6, б), а также вдоль оси Z (рис. 6, в).

По распределениям изолиний можно отчетливо проследить неравномерность и несимметричность сдвижений моделируемых пород. На первом этапе пригрузки, равном 7982 Н (давление на основание штампов 133 кПа), в горизонтальной плоскости отмечается стремление пород сдвигаться вправо до максимального значения 26 мм и вверх до максимального значения 24 мм. Отметим, что эти распределения уже сразу принципиально отличаются от полученных на компьютерной модели. Так вдоль оси выработки (продольные) смещения на протяженном среднем участке компьютерной модели выработки вообще отсутствуют, тогда как на физической модели кровли они даже больше поперечной компоненты сдвижений. Сама поперечная компонента тоже распределена совсем не так как предсказывает теория плоской деформации. Если на компьютерной модели изолинии поперечных сдвижений ориентированы на протяженном участке вдоль оси выработки, то на физической модели соответствующая ориентация вообще не напоминает продольную. Лишь изолинии вертикальных опусканий похожи отчасти на полученные в компьютере, хотя и здесь имеются существенные отличия, заключающиеся в несимметричности относительно оси выработки. Вертикальные сдвигения по длине выработки распределены относительно равномерно, однако наблюдается некоторый перепад уровня сдвигения тела модели равный 2,25 (отношение максимального значения к минимальному). В результате имеем перекося с максимальным значением 90 мм в сторону левого верхнего угла (далее по тексту данные смещений вдоль оси Z будут также представлены в миллиметрах натуре с учетом масштаба

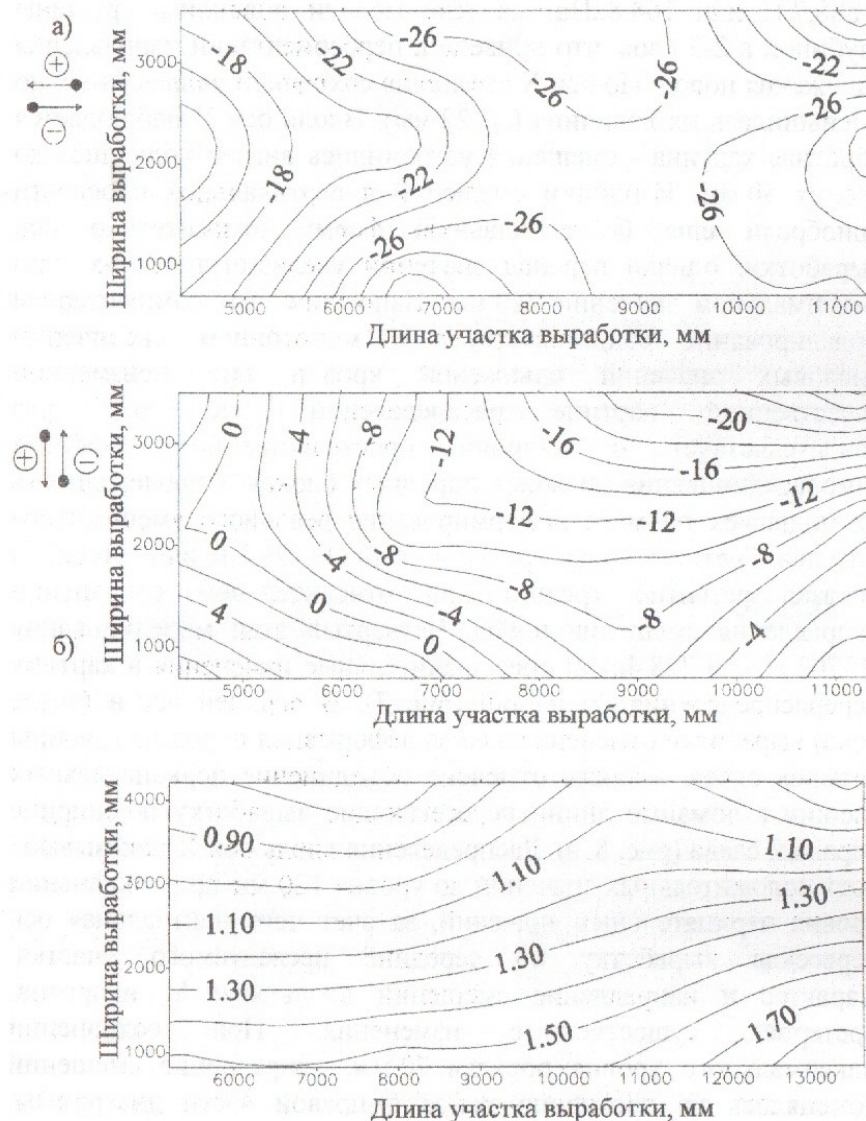


Рис. 6. Распределение сдвижений пород на 1-м этапе нагружения модели №2: а) по оси X; б) по оси Y; в) по оси Z

моделирования 1:50). При производстве следующего нагружения (9888,7 Н или 164,8кПа) на теле модели появились трещины глубиной в 2-3 слоя, что привело к переориентации направления сдвига пород. По оси X смещения сохранили направление, но уменьшилась их величина (до 22 мм). Вдоль оси Y наблюдается обратная картина - смещения устремились вниз и поднялись до уровня 50 мм. Изолинии смещений в вертикальной плоскости приобрели еще более плавную форму относительно оси выработки, однако перепад значений увеличился до 4-х, при максимальном значении 220 мм. Напомним, что компьютерное моделирование свидетельствует о монотонном увеличении числовых значений сдвижений кровли при неизменной качественной картине распределений. Это еще раз свидетельствует о наличии пространственного эффекта саморасклинивания смежных породных блоков и поочередность их подвижек по мере деформирования реального вмещающего массива. Третий этап пригрузки модели (11795,3 Н или 196,6кПа) показал развитие трещин при относительном сохранении направления смещения пород. Четвертый этап моделирования (13702 Н или 228,4кПа) внес значительные изменения в картину перераспределения смещений (рис. 7). В верхней части (возле бока) выработки отмечена сильная деформация пород до глубины четырех слоев, а также отмечено объединение первоначальных трещин в ломаные линии пересекающие выработку по ширине справа и слева (рис. 8, з). Распределения вдоль оси X показывают рост положительных значений до уровня 120 мм при сохранении уровня отрицательных значений, за счет чего нейтральная ось пересекла выработку по середине исследуемого участка. Характер и направление смещений вдоль оси Y, напротив, претерпел существенные изменения. При сохранении максимального уровня порядка 70 мм, направление смещений поменялось на противоположное в правой части диаграммы. Отрицательные смещения охватили около 80% всей наблюдаемой области при том, что максимальный уровень положительных идентичен отрицательным. Еще раз обратим внимание, что ориентация изолиний даже не напоминает

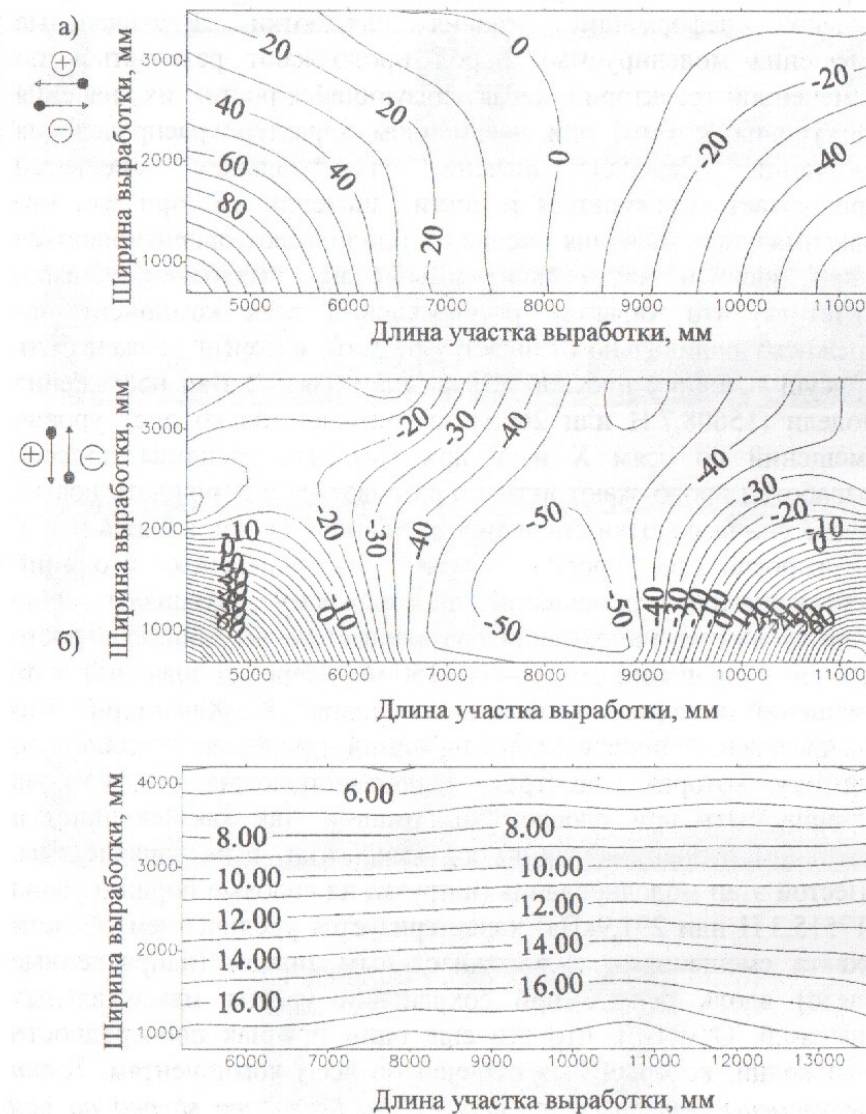


Рис. 7. Распределение сдвижений пород на 4-м этапе нагружения модели №2: а) по оси X; б) по оси Y; в) по оси Z

параллельность оси выработки, что должно бы быть в случае плоской деформации сечения выработки. Вертикальные смещения моделируемых пород продолжают развиваться по намеченной траектории, характеризующейся ростом их значения (до уровня 850 мм) при неизменном характере распределения изолиний. Перепад значений вертикальных смещений продолжает сглаживаться и достиг значения 2,8, при том что максимальные значения смещений продолжают ориентироваться вдоль нижней части диаграммы (бока выработки). Важно отметить, что характер распределений всех компонент по-прежнему радикально отличается от того, который должен быть присущ условиям плоской деформации. Пятый этап нагружения модели (15608,7 Н или 260,1кПа) показал только рост уровня смещений по осям X и Y при том, что трещины поперек выработки продолжают активно развиваться и порождать новые. Вдоль оси выработки смещения составили 160 мм, а вдоль оси Y – выросли до уровня 180 мм. Распределения изолиний вертикальных перемещений по-прежнему сохраняют свою форму, вид и направление развития при неуклонном росте значения смещений до уровня 1150 мм. Перепад значений этих смещений несколько повысился до уровня 2,87. Характерно, что распределение поперечных сдвижений приобрело устойчивую картину, которая диаметрально противоположна той, которая должна быть при плоской деформации, так как изолинии в основном перпендикулярны оси выработки, а не параллельны. Шестой этап моделирования (нагрузка на силовые поршни равна (17515,3 Н или 291,9кПа) характеризуется увеличением области охвата смещениями с положительным знаком (направленные влево) вдоль оси X при сохранении уровня максимальных значений. Отметим, что это еще один признак поочередности сдвижений, который был отмечен по всем компонентам. *Блоки вынуждены двигаться то вправо, то влево, то вперед по оси выработки то назад, то быстрее опускаться в вертикальном направлении, то замедляться, чтобы согласовать общее движение в полость выработки. Такое поведение отражает необратимые пространственные сдвигения массива, которые*

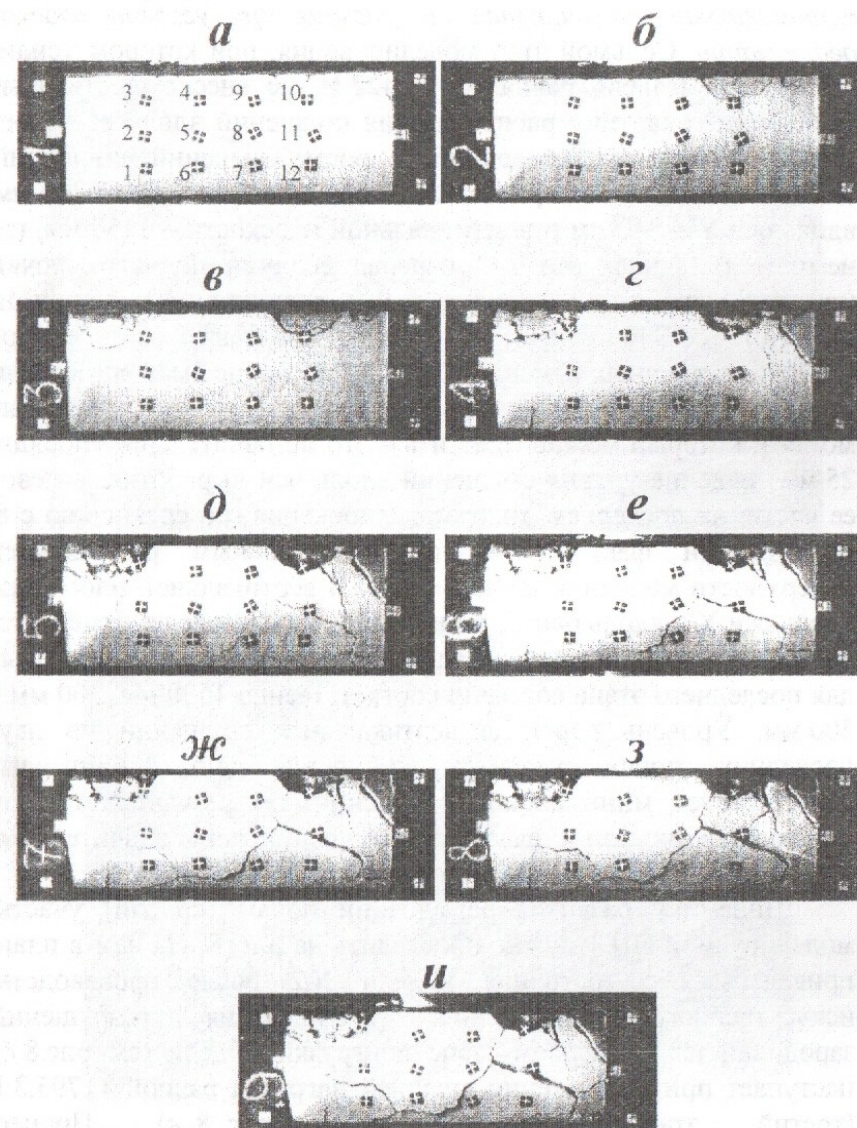
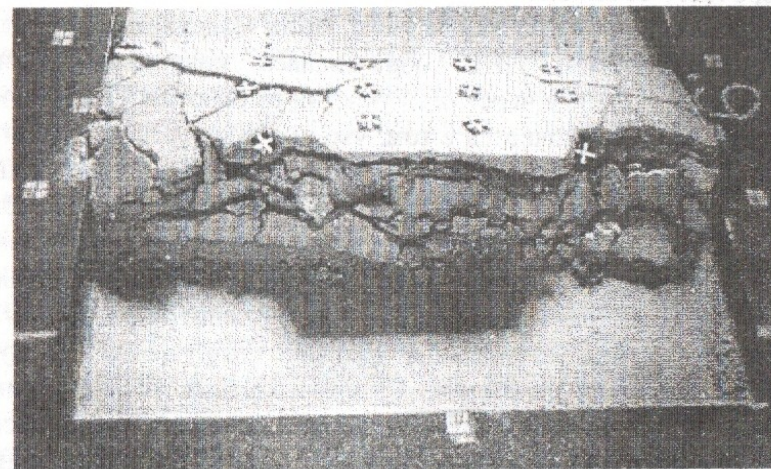


Рис. 8. Развитие разрушений в почве (кровле) участка моделируемой выработки на различных этапах отработки модели №2

принципиально отличаются от упругих при условии плоской деформации. Седьмой этап моделирования, при котором усилие нагружения модели равнялось 19422 Н, не внес существенных изменений в картину распределения смещений вдоль всех трех осей. Сохранилась тенденция к росту значений смещений, максимальные из которых составили: вдоль оси X – 200 мм, вдоль оси Y – 240 мм и в вертикальной плоскости – 1450 мм, где немного сгладился (до 2,6) перепад величин поднятия почвы (кровли) выработки. Этапы 8 и 9 с величинами нагрузки на модель 19365,3 Н и 20665,3 Н или 344,4кПа, также как и седьмой этап, существенных изменений в распределение смещений вдоль по всем исследуемым плоскостям не внесли. Единственный момент, который можно отметить – это незначительное (порядка 25 мм) падение уровня смещений вдоль оси выработки, в левой ее части, на последнем этапе моделирования (по сравнению с 8-м). Данный факт связан с окончательным разрушением поверхности модели в данном месте. В вертикальной плоскости, вдоль оси Y и вдоль оси X, но в правой части модели, отмечается увеличение значения максимального уровня смещений, который для последнего этапа составил соответственно 1500 мм, 300 мм и 200 мм. Уровень перепада вертикальных смещений на двух последних этапах сгладился до уровня двух единиц, что соответствует минимальному значению по результатам всего моделирования свидетельствует об отсутствии значительных подвижек в результате обширного разрушения.

Динамику развития разрушений почвы (кровли) участка моделируемой ППВ можно проследить на рис. 8. На нем в плане приведены все состояния модели №2 после производства искусственного нагружения. Активизация разрушений, зародившихся на первом этапе пригрузки модели (см. рис.8 б), наступает при приложении внешней нагрузки равной 11795,3 Н (третий этап моделирования, см. рис. 8, в). Процесс трещинообразования (разрушения) проходит крайне неравномерно как по длине, так и по ширине выработки, причем не только на контуре, а и в глубине приконтурной зоны массива. На рис.9 представлены разрезы отработанной толщи

а



б

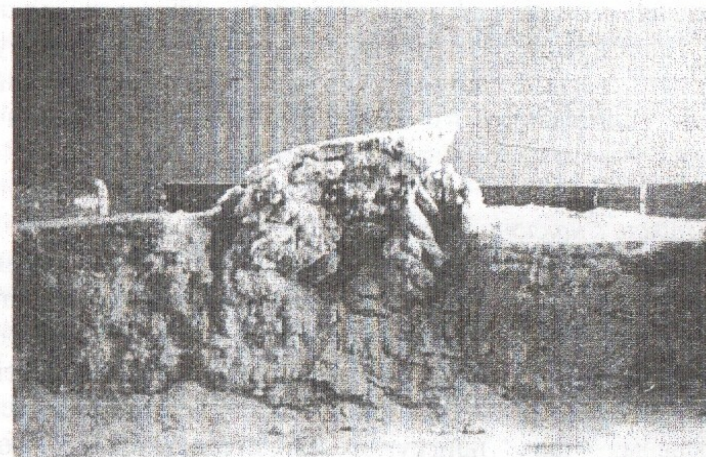


Рис. 9. Разрезы отработанной толщи объемной модели №2 по длине выработки (а) и в плоскости ее поперечного сечения (б).

смоделированного массива по длине выработки и в плоскости ее поперечного сечения.

После завершения последнего этапа моделирования, вдоль оси моделируемой ППВ образовалась конечная основная трещина проходящая через весь участок выработки. Особенность этой трещины заключается в том, что она проходит не по центру выработки, а в виде совокупности ломаных линий, пересекающих исследуемый участок почвы (кровли) практически повсеместно (рис. 8, и). Этот факт свидетельствует о том, что в применении к данным условиям, подтверждена фундаментальная закономерность развития процесса разрушения, основанная на избирательности направления фронта разрушения по пути наименьшего сопротивления. С точки зрения термодинамики процесса разрушения можно сказать, что система «крепь—о окружающие породы» стремится к состоянию с минимальным производством энтропии. Полученные в результате этого моделирования данные свидетельствуют о неизбежности пространственного характера распространения разрушения и сдвижения вмещающих протяженную одиночную выработку пород. Направление развития таких разрушений на микро уровне предсказать весьма сложно, а на макро-уровне возможно при условии тщательного изучения конкретных геомеханических условий с учетом всех влияющих факторов.

Модель с наклонной ориентацией породных болтов

Отметим, что при отработке модели №3 было произведено на один этап нагружения меньше, чем в модели №2. Отсутствует первый этап, так как при его производстве сдвижений пород зафиксировано не было и поэтому принято решение перейти ко второму шагу пригрузки равному 9888,7 Н. Отсутствие смещений на первом этапе пригрузки свидетельствует о большей эффективности выбранного способа установки крепи в выработке по сравнению с типовым. Исходя из вышеописанного, первый этап пригрузки модели №2 не будет учитываться при качественном сравнении результатов отработки моделей на данном стенде.

Произведем сравнение состояний моделей после идентичных нагружений по уровню максимальных абсолютных значений величин смещения пород. Прежде всего отметим, что снова как и в предыдущем случае очевиден пространственный характер распределений всех компонент сдвижений. Кроме того ориентация изолиний вертикальных опусканий заметно отличается от параллельной относительно оси выработки. На первом этапе нагружения модели №3 (рис. 10) максимальное абсолютное значение перемещений вдоль оси X, Y и Z, соответственно в 1,6; 3,1 и 3,7 раза ниже, чем при аналогичной пригрузке модели №2 (см. рис. 6). Для условий второго этапа моделирования смещения пород также значительно меньше, особенно вдоль оси выработки и в вертикальной плоскости модели. В соответствии с вышеприведенным порядком перечисления направлений смещения пород (X, Y, Z), рассматриваемые величины уменьшились на модели №3 соответственно в 2,4; 1,5 и 7 раз. На третьем этапе пригрузки модели уровень абсолютных максимальных значений сдвижений пород вдоль оси моделируемой выработки продолжает увеличиваться, однако по сравнению с аналогичным этапом на модели №2, он стал меньше в 4 раза. Вдоль оси Y исследуемый параметр оказался в 2 раза меньшим, чем в аналоге предыдущей модели, а вертикальные смещения показали уменьшение уровня максимального значения в 10 раз. Относительно последующих пяти этапов искусственного нагружения модели №3, а именно с 4-го по 8-й, можно выделить некоторую закономерность постепенного спада превышения максимального уровня сдвижений (по абсолютному значению) в отношении смещений пород вдоль оси X и Z. В отношении смещений вдоль оси X имеем следующий ряд вышеуказанных величин: 3,2; 2,3; 2; 1,7 и 1,43, а в отношении смещений в вертикальной плоскости, рассматриваемый параметр для пяти последних этапов выстраивается в следующий ряд: 12,1; 10,4; 2,52; 1,94 и 1,58. Вдоль оси Y уровень абсолютного максимального значения смещений распределен неравномерно для тех же пяти этапов

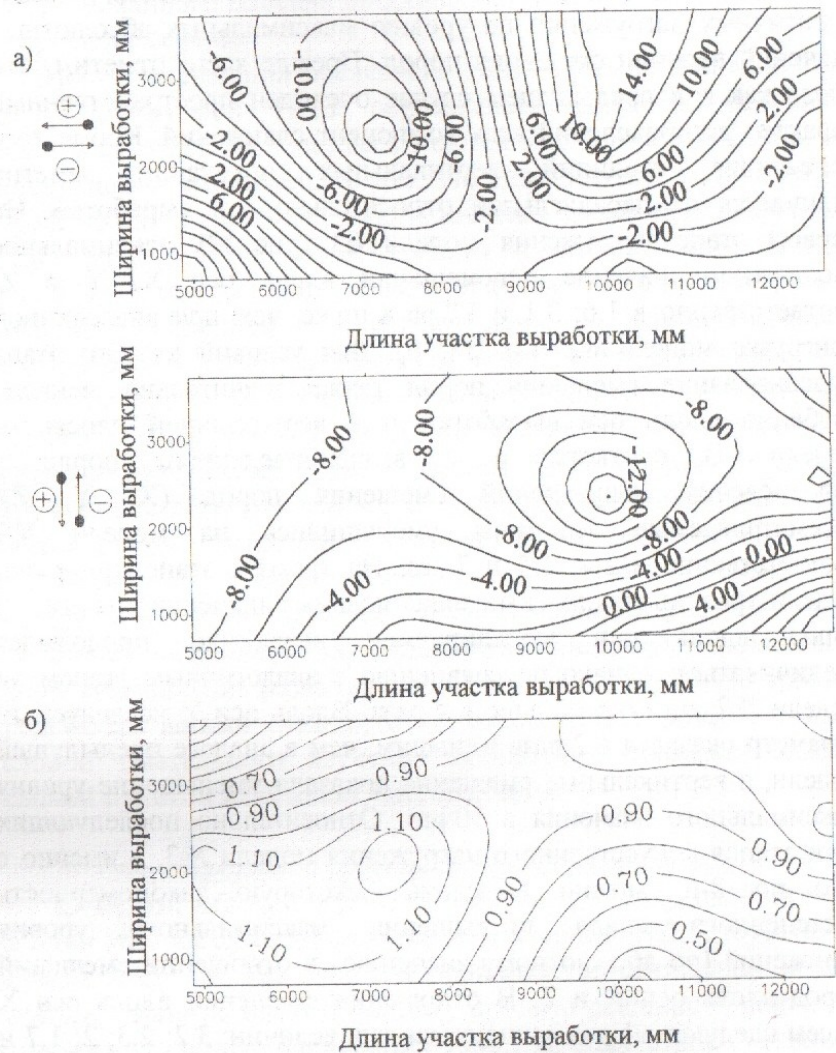


Рис. 10. Распределение сдвижений пород на 1-м этапе нагружения модели №3: а) по оси X; б) по оси Y; в) по оси Z

нагружения, при том что он уменьшился по сравнению с моделью №2 в 2,6; 4; 1,3; 4,7 и 1,5 раза.

На большинстве полученных распределений вертикальных сдвижений зафиксировано наличие локальных максимумов, ориентированных вдоль центра выработки по ее длине. Места их возникновения и развития находятся в центральной части группы породных болтов, где угол их пространственного наклона был минимальным, а расстояние между соседними болтами вдоль оси выработки - максимальным. На диаграммах смещений пород в направлении оси X можно явно выделить некоторую симметрию распределения изолиний относительно центральной оси выработки, с расположением нейтральной оси (с нулевым значением) по центру исследуемого участка ППВ. Изучение динамики развития смещений вдоль этой оси показало периодическое возникновение и исчезновение симметрии относительно центра экспериментального участка выработки. Этот факт может быть связан только с периодическим возникновением и исчезновением пространственно ориентированных эффектов саморасклинивания пород в процессе их смещения в полость выработки. Примененный в данной модели способ установки породных болтов основан на управлении данными эффектами, а именно ограничивает степень свободы породных блоков образовавшихся в процессе разрушения массива и стремящихся сместиться в полость выработки. Распределения сдвижений пород вдоль оси выработки, на которых отмечается исчезновение локальных пиков и сглаживание изолиний (этапы моделирования №3 и №5), совпали с зарождением трещин и активизацией их развития в наиболее слабом месте моделируемого массива (центре экспериментального участка) (рис. 11). Начиная с этапа №5 активизировался процесс складкообразования. После окончательного оформления складки (волны разрушений) по пути наименьшего сопротивления (этап №6), на распределениях снова отмечается симметрия относительно центра моделируемого участка ППВ. Причем, в отличие от предыдущих этапов

нагрузки модели, симметрия становится явно выраженной относительно центральной оси выработки.

Изучение изолиний сдвижений моделируемых пород вдоль оси Y показало явную неравномерность их распределения по исследуемой поверхности и отсутствие симметрии в двух рядом стоящих сечениях выработки на протяжении всего времени отработки (искусственного нагружения) модели. Отметим, что данная закономерность отмечена при отработке предыдущей модели, притом, что распределения изолиний двух моделей совершенно различны. В процессе имитации увеличения уровня горного давления меняется направление смещений пород вдоль рассматриваемой оси и происходит изменение характера изолиний. Это обстоятельство свидетельствует о невозможности рассмотрения двух или более рядом стоящих поперечных сечений ППВ в качестве равноценных, как принято считать до сих пор.

При рассмотрении диаграмм распределения изолиний вертикальных перемещений с точки зрения характера распределения изолиний, отмечена их схожесть с распределениями по оси X. Здесь симметрия распределения изолиний четко прослеживается начиная с третьего этапа моделирования и наиболее ярко описывает картину зарождения и развития породной складки (см. распределение на этапе 6 – рис.12). В натуральных условиях вертикальная компонента перемещений играет основную роль при обеспечении устойчивости выработок и нередко достигает 1 м и более. Смещения вдоль оси выработки составляют 2-20 см, что на порядок или два меньше вертикальных, однако качественное совпадение картины распределения изогипс этих перемещений и характера развития, свидетельствует об их взаимосвязи в процессе формирования зоны неупругих деформаций вокруг ППВ, а также о равноценном соизмеримом вкладе осевых смещений в возникновение или исчезновение эффекта пространственного саморасклинивания.

Процесс развития разрушений на контуре моделируемого участка ППВ по мере отработки модели №3 можно отчетливо

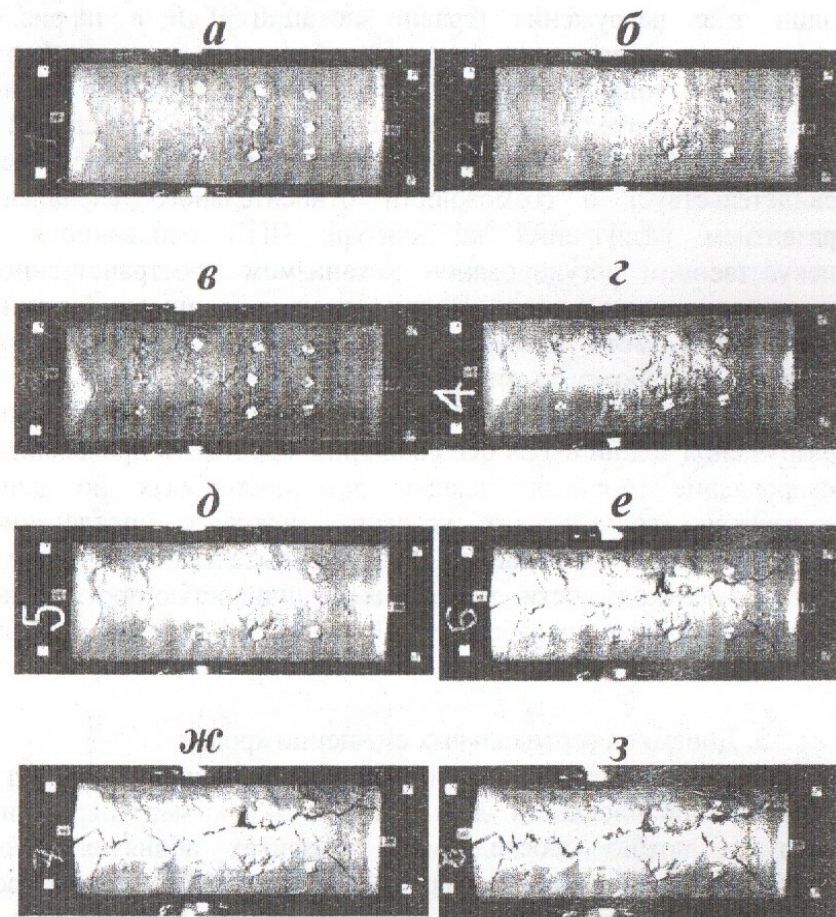


Рис. 11. Динамика разрушений в почве (кровле) участка ППВ объемной модели №3 на различных этапах нагружения

проследить на рис. 11. В отличие от аналогичного процесса приведенного на рис. 8, основные разрушения начались значительно позже и выразились в макротрещину практически за один этап нагружения (сравни позиции *d* и *e* на рис. 8). Дальнейшее увеличение пригрузки глобально не изменило форму трещины, а только увеличило ее раскрытие. Кривизна данной трещины значительно меньше, чем у трещины модели №2 и ориентирована по центральной оси выработки. Этот факт свидетельствует о возможности относительного управления развитием разрушений на контуре ППВ основанного на искусственном регулировании механизмом пространственного саморасклинивания пород. После вскрытия толщи отработанной модели №3 имеем классическую породную складку в почве (кровле) выработки с симметрично развитыми «крыльями» и относительной (по сравнению с моделью №2) равномерностью разрушения толщи вдоль оси ППВ (рис. 13). Место проявления и направление развития складки при постоянных по длине выработки геологических условиях можно с определенной достоверностью предсказать. Отсюда вытекает практический вывод о необходимости управления устойчивостью протяженной подготовительной выработки (ППВ) воздействием на наиболее опасные локальные места.

3. Динамика вертикальных смещений кровли

Наиболее четко динамику развития смещений пород в вертикальной плоскости моделей №2 и №3 по мере нарастания нагрузки можно проследить на графиках поднятия почвы (опускания кровли) (рис. 14 и рис. 15). Каждая линия на графиках соответствует поднятию (опусканию) определенного репера (породного болта) и отражает динамику сдвижения блока пород в его окрестности. Здесь наиболее четко видна разница величин сдвижений, которая на некоторых этапах нагружения (имитации повышения уровня горного давления) отличается на порядок. Активизация процесса поднятия моделируемой толщи на модели №2 началась при нагрузке 11795,3 Н (между вторым и третьим этапами). Аналогичный процесс в модели №3 произошел между

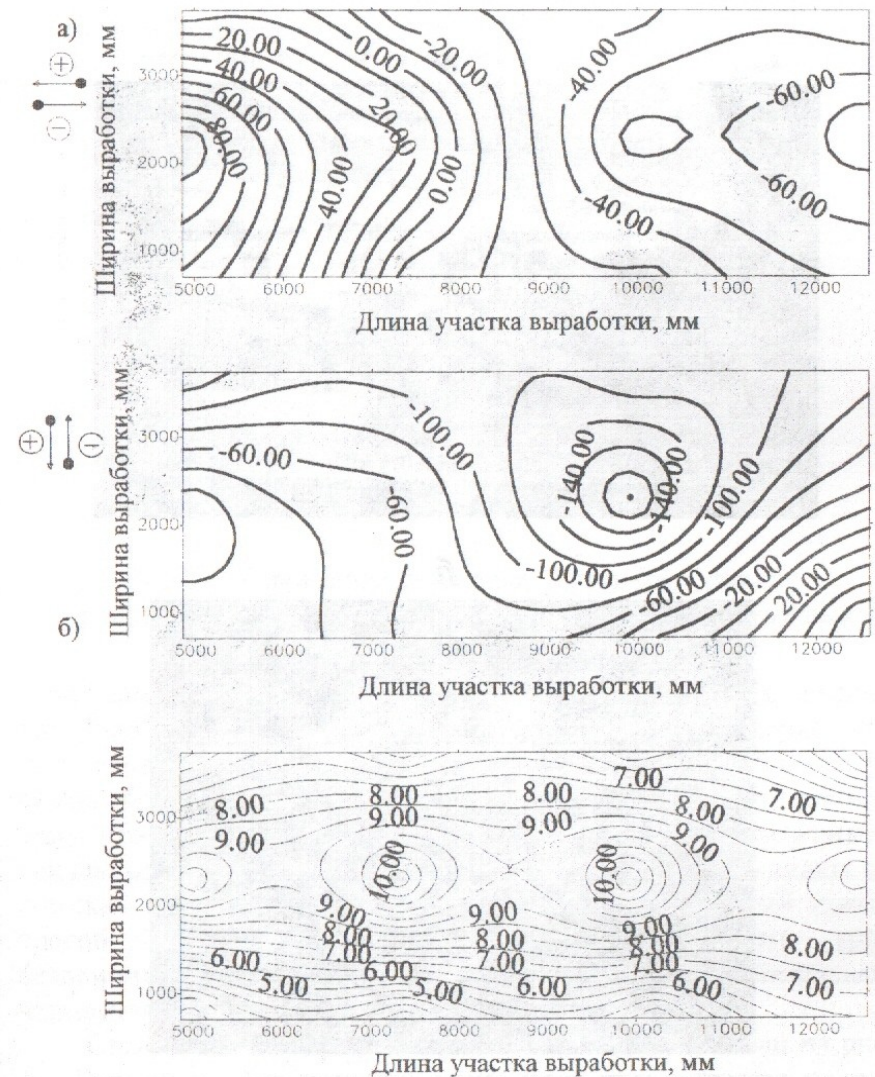


Рис. 12. Распределение сдвижений пород на 6-м этапе нагружения модели №3: а) по оси X; б) по оси Y; в) по оси Z

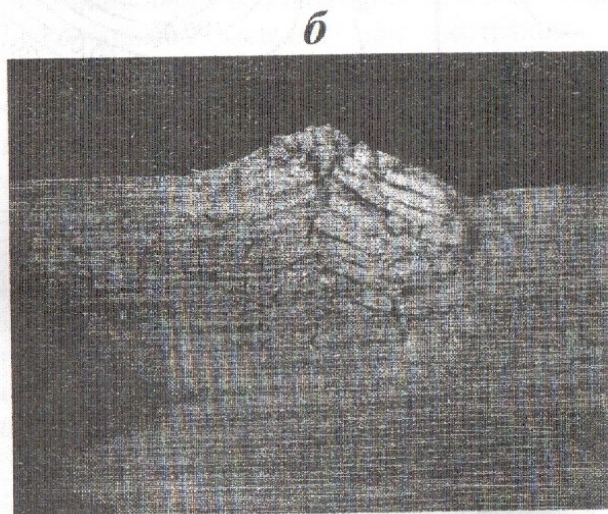
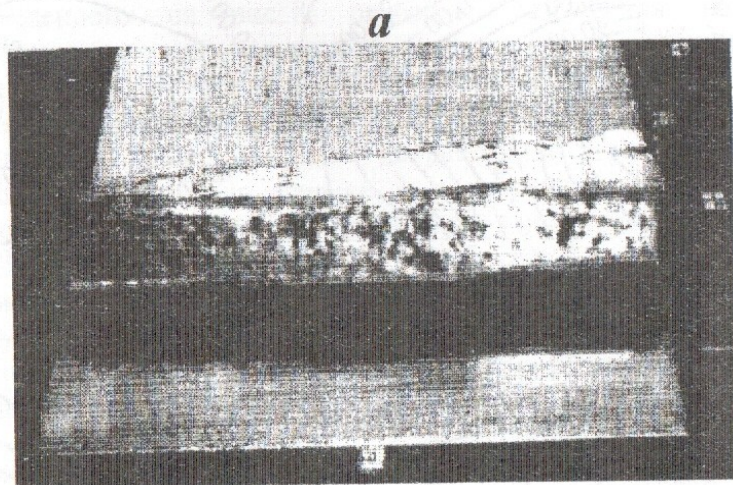


Рис. 13. Продольное (*a*) и поперечное (*б*) сечения участка ППВ после отработки модели №3

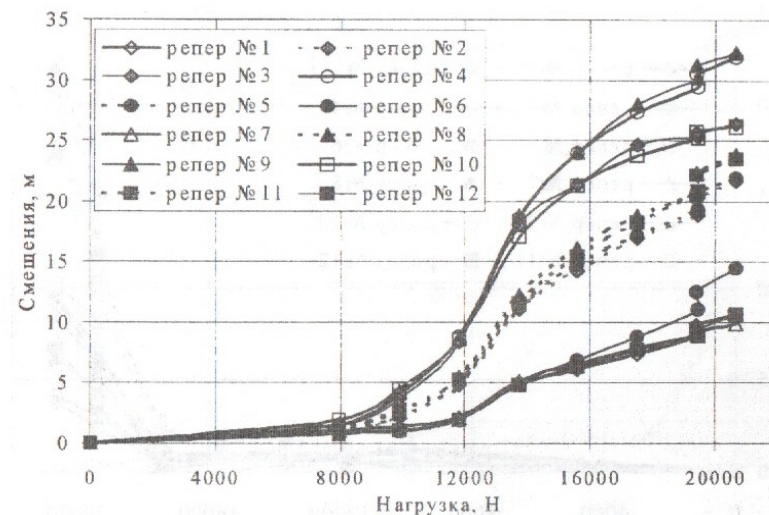


Рис. 14. Сдвигение породных болтов (реперов) в вертикальной плоскости при отработке модели №2 (базовый вариант)

шестым и седьмым этапами нагружения при достижении нагрузкой максимального значения 19365,3 Н. Характерно, что при уровне нагрузки 19кН в обеих моделях наблюдается скачкообразный рост смещений. Это объясняется, по-видимому, тем, что при указанной нагрузке произошло объединение локальных трещин в общую магистральную, что можно видеть на снимках (рис. 8 и 11). Таким образом, примененный новый способ крепления позволил выработке продлить срок безремонтного поддержания на протяжении дополнительных четырех этапов увеличения горного давления.

Сравнительный график средних сдвижений показан на рис. 16. Данный график наглядно показывает преимущества нового способа установки породных болтов.

4. Анализ полей перемещений в плоскости породного обнажения

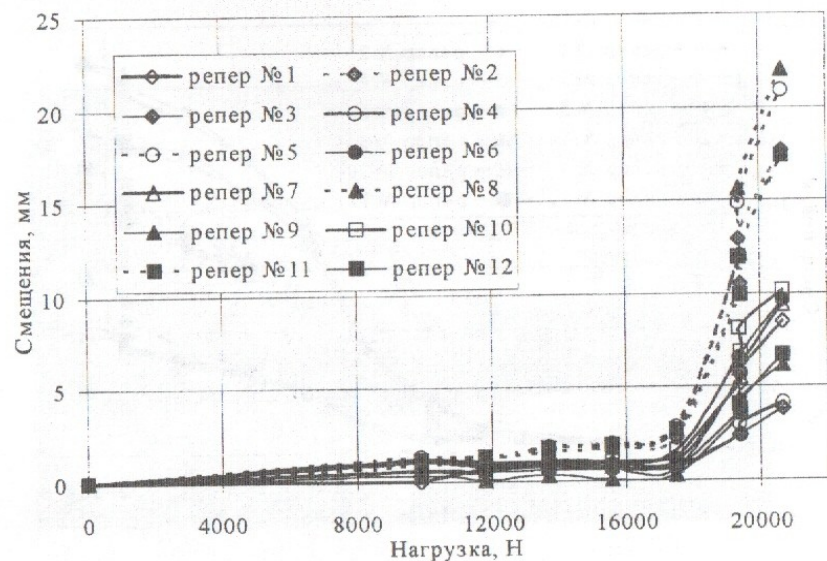


Рис. 15. Сдвигение реперов в вертикальной плоскости при обработке модели №3 (новый метод крепления)

Проведем более детальный анализ характера смещений пород в горизонтальной плоскости моделей №2 и №3 по векторным диаграммам (полям перемещений) (рис. 17-18). Диаграммы отражают эволюцию полей междуэтапных перемещений блоков пород в горизонтальной плоскости, что позволяет глубже понять природу процесса пространственного саморасклинивания пород.

При проведении этого анализа, векторы были классифицированы в несколько общих групп. Полное обследование векторных распределений помогло обнаружить иерархию в группировке различных по определенным признакам кластеров (блоков горной породы). Эта иерархия включает в себя порядка десяти уровней. Первый уровень включает две группы кластеров, а именно с векторами направленными вниз и вверх (относительно оси Y). Кластеры с векторами направленными вниз диаграммы выделены сплошной линией, а направленные

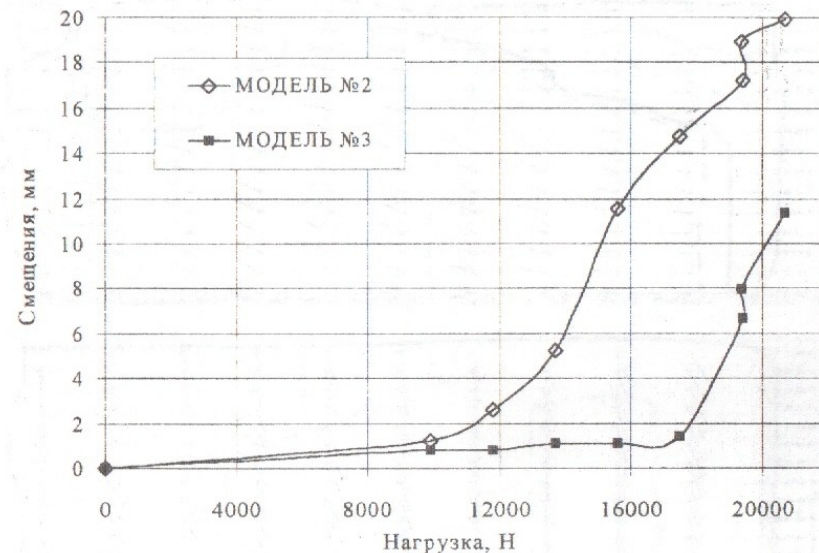


Рис. 16. Сдвигение реперов в вертикальной плоскости по усредненным данным моделей №2 и №3

вверх - пунктирной линией. Второй уровень иерархии был проведен с целью разделения направления векторов право и влево (относительно оси X). Третий уровень отделяет кластеры, имеющие различный градиент векторного наклона. При этом, может иметься группа нисходящих векторов ориентированных влево с различными углами ориентации, например 0° - 10° , 20° - 30° , и т.д. Четвертый уровень иерархии разделяет кластеры по длине векторов (величине смещения) при условии соблюдения единого масштаба. Коэффициент классификации зависит от точности и чувствительности методики регистрации перемещения массива горных пород. Для облегчения анализа может быть использована фрактальная геометрия [5], однако в настоящей работе использованы три уровня в качестве первого приближения, что является достаточным для обнаружения нового существенного характера необратимых сдвижений пород вокруг ППВ с учетом вышеприведенного анализа изолиний перемещений пород в пространстве. Четвертый уровень использовался для

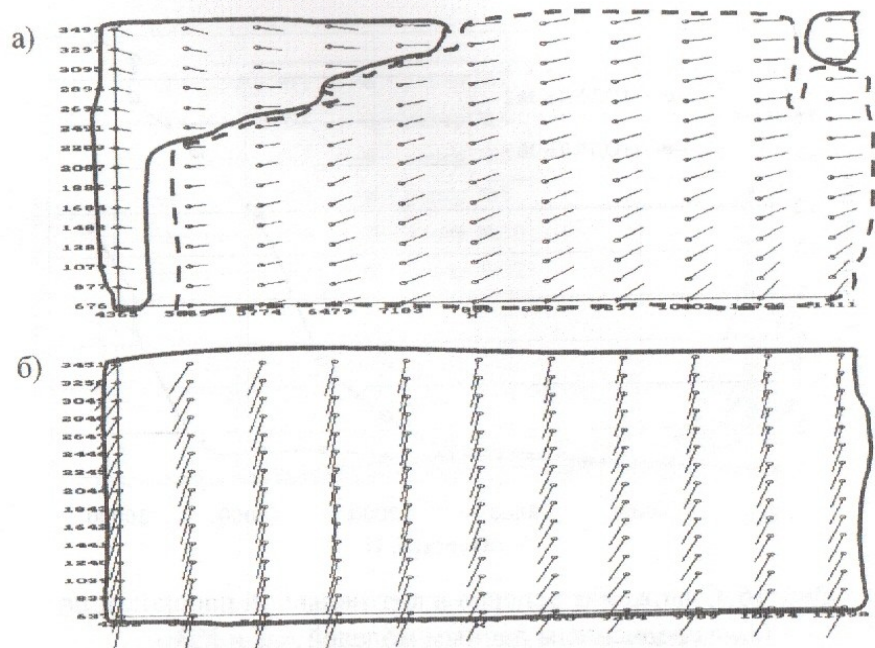


Рис. 17. Диаграммы векторных перемещений пород в модели №2: а) между этапами №1 и №2; б) между этапами №2 и №3

междуэтапного сравнения в пределах конкретной модели и поэтому специально не выделялся. Напомним, что в модели №2 на один этап пригрузки больше, чем в третьей модели в виду более быстрого ее разрушения. Поэтому при производстве сравнительного анализа результатов двух моделей, первый этап пригрузки модели №3 соответствует второму этапу нагружения модели №2.

Группировка векторных распределений моделей показала их явное несовпадение по количеству кластеров, их размеру, форме ограничивающего контура и характеру развития сдвижений на одинаковых этапах пригрузки. После первого нагружения (7982 Н) модели №2 имеем два ярко выраженных типа кластеров первого уровня (по принятой иерархии их разделения), то есть с векторами направленными вверх и вниз диаграммы (рис. 17, а).

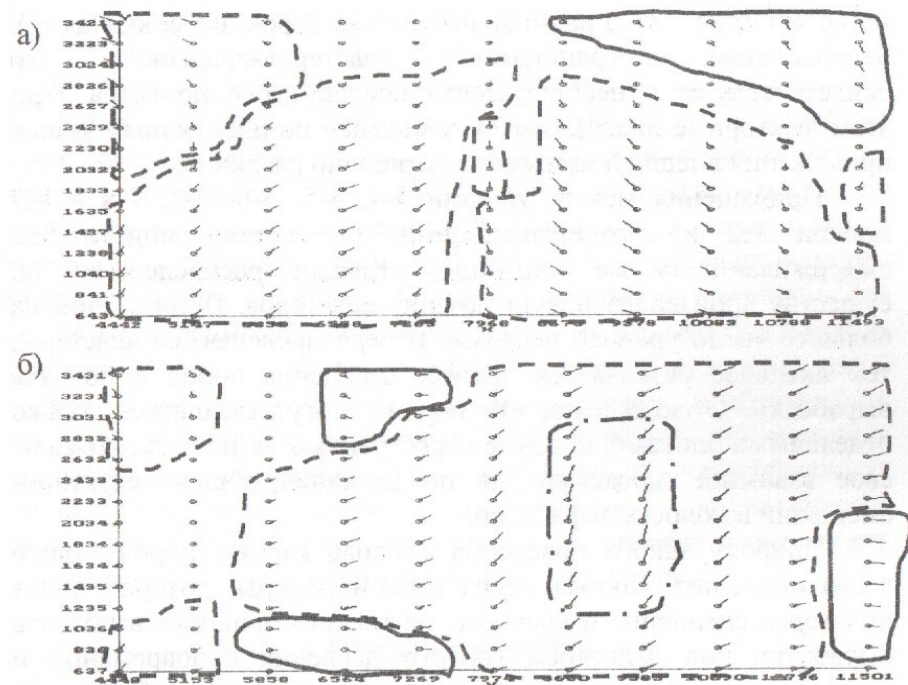


Рис. 18. Диаграммы векторных перемещений пород в модели №3: а) между этапами №1 и №2; б) между этапами №2 и №3

При этом по второму уровню иерархии кластеры совпадают – векторы направлены вправо. На втором этапе пригрузки этой модели произошло перераспределение кластеров по всем четырем уровням иерархии. Нисходящий и восходящий потоки объединились в один общий, изменили направление справа налево, увеличился угол наклона векторов и их размеры (рис. 17, б). Для такой глобальной переориентации движения и направления смещения блоков пород, в массиве должны возникнуть критические напряжения, что соответствует реальной картине начального разрушения контура моделируемой выработки (см. рис. 8, б). Сравнительный анализ полей перемещений первых двух этапов пригрузки модели №3, также показал перераспределение кластеров по четырем уровням

иерархии (рис. 18). Границы новых кластеров не совпадают с предыдущими границами кластеров-предков, что свидетельствует о необратимости исследуемого процесса. При этом, векторные диаграммы двух моделей на идентичных этапах приложения внешней нагрузки совершенно различны.

Приращения между этапами 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-8 и 8-9 модели №2 и соответствующими им этапами модели №3 выдерживают ту же тенденцию. Каждое распределение по существу производит новую мозаику кластеров. Причем, чем на большее число уровней иерархии перераспределяются кластеры, тем активнее развивается процесс смещения пород в полость выработки. Отсюда ясно, что породы могут смещаться только отдельными блоками, которые перестраиваются и согласовывают свое взаимное движение для поддержания общей тенденции смещений в полость выработки.

Природу такого поведения массива горных пород можно легко объяснить. Любая масса горной породы, которая имеет некоторое сцепление и крепость, не может смещаться в полость выработки под действием горного давления одновременно и поступательно. В результате недостатка степени свободы, она неизбежно должна разделиться на кластеры, которые вынуждают блоки пород двигаться по очереди в пространстве и времени. Столпившиеся кластеры должны дать путь друг другу, чтобы продолжать перемещаться в полость выработки по пути наименьшего сопротивления.

Подобное поведение массива невозможно обнаружить при рассмотрении упругой деформации горных пород. Примененный метод математического моделирования «MULSIM» основан на детерминированных принципах механики упругих тел. В результате получена картина симметричного распределения изолиний сдвижений по длине и ширине выработки. Пытаясь разделяться, моделируемые породы образуют симметрично разделенные кластеры и перемещаются в полость выработки мгновенно в течение постепенно нарастающей загрузки на модель. Основываясь на результатах подобных моделей в многих работах авторы предполагают равноценность всех сечений ППВ.

Это естественно для упругих сред, но невозможно для необратимой геомеханической среды.

Сравнительный качественный анализ кинематики и динамики сдвижений второй и третьей объемных моделей по трем осям координат показал их существенное отличие как по уровню абсолютных значений величин подвижек, так и по характеру распределения изолиний. Смещения в модели №3, в результате применения нового способа пространственного ориентирования породных болтов (анкеров), в несколько раз меньше смещений в аналогичной модели (с типичным способом крепления) по всем трем направлениям. Эволюция полей междуэтапных перемещений показала явную необратимость процесса их перераспределения, невозможность предсказания направления разрушений на микроуровне и неодинаковость смещения контура выработки вдоль ее оси. Эффективность нового способа крепления очевидна и доказывает возможность управления характером разрушений на макро-уровне.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Sinha K. P. Displacement discontinuity technique for analyzing stresses and displacements due to mining in seam deposits. A thesis submitted to the faculty of the school of the university of Minnesota. //In partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. Minnesota., March 1979, 311 pp.
2. Моделирование проявлений горного давления /Кузнецов Г.Н., Будько М.Н., Васильев Ю.И. и др. -Л.: Недра, 1968. -279 с.
3. Заявка на а.с. № 98010325. Украина. Способ установки анкера //Назимко В.В., Александров С.Н., Сажнев В.П. (Украина). - бс. ил.; Заявлено 21.01.98г.
4. Лаптев А.А., Сажнев В.П., Сугаков В.А. Изучение эффекта саморасклинивания вмещающих выработку пород методом объемного физического моделирования //Известия донецкого горного института, Донецк. -1999. -№2. -С. 77-80.
5. Mandelbrot B. B. The fractal geometry of nature. -New York: W.H.Freeman and Company, 1983. -168p.