

УДК 622.834.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАБОТЫ СИЛ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА НЕОБРАТИМОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПОРОД ВОКРУГ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ

Назимко И. В.

(УкрНИМИ, г. Донецк, Украина)

Зазначено, що робота сил гірського тиску на незворотне деформування порід навколо підготовчої виробки змінюється згідно нелінійної залежності від розміру деформування розтину виробки.

Forces work of rock pressure on irreversible deformation of rock around preparation mine are changing on deformation value section of mine according to nonlinear dependence.

Проблема обеспечения устойчивости подготовительных выработок при разработке месторождений полезных ископаемых характеризуется устойчивой актуальностью и обостряется по мере углубления горных работ. В связи с этим возникает необходимость постоянного совершенствования технологий и средств крепления подготовительных выработок и способов их охраны и поддержания в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях. Однако разработка таких мероприятий не может продолжаться без накопления новых знаний о сложном механизме необратимого деформирования пород вокруг подготовительных выработок.

На сегодня достаточно детально исследованы стадии упругого деформирования пород вокруг подготовительной выработки [1 – 3] и в некоторой степени стадии запредельного деформирования, когда формируется и развивается зона разрушенных пород вокруг подготовительной выработки [4, 5]. Если упругая стадия де-

формирования исследована достаточно детально на математических моделях с учетом характера перераспределения напряжений и деформаций вокруг выработки, то запредельные стадии деформирования вмещающих пород изучалась в основном лабораторными экспериментальными методами, основанными на физическом моделировании и шахтных инструментальных наблюдениях. Важно иметь в виду, что упругие процессы порождают величины смещений на контуре выработки, сопоставимые с 10-50 миллиметрами, тогда как смещения, измеряемые сотнями сантиметров, обусловлены исключительно необратимыми процессами: пластическими деформациями, разрушением, запредельным деформированием и необратимым смещением блоков и кусков пород. Последние исследования показали, что такие смещения протекают поочередно вокруг выработки, что является следствием эффекта самозаклинивания ранее разрушенных пород [6].

Несмотря на безусловную ценность данных, полученных эмпирическими методами, следует признать, что результаты таких исследований отражают в основном последствия необратимых проявлений горного давления и практически не затрагивают детально их причины. Из этого вытекает особая актуальность изучения механизма запредельного деформирования пород вокруг подготовительных выработок с помощью геомеханических моделей, основанных на учете необратимых процессов. В данной работе рассматриваются результаты математического моделирования необратимых сдвижений вокруг подготовительной выработки с учетом всех стадий начиная с упругой и заканчивая необратимым перемещением блоков ранее разрушенных пород.

Стоит отметить, что процесс запредельного деформирования пород начинается при $\gamma H/R \geq 0,3$, а при дальнейшем росте величины критерия не затухает во времени. При отработке угольных месторождений это соответствует глубине более 800 м и прочности вмещающих пород 40-50 МПа. Отсюда следует, что применение методов, основанных на статическом равновесии системы, не подходит для анализа устойчивости выработок в указанных условиях.

При небравновесном деформировании массива необходим учет времени протекания процесса, что достаточно сложно сде-

лать при использовании метода конечных или граничных элементов. Гораздо удобнее такой подход реализовать на основе второго закона Ньютона. Этот подход впервые предложен П. Кундалом, что позволило расширить возможности численных методов и уйти от проблем сходимости решения к состоянию статического равновесия. Такой подход открывает новые возможности, поскольку процесс необратимых сдвижений массива горных пород на контуре подготовительной выработки подчиняется кинетической теории прочности и протекает во времени.

На базе такого подхода П. Кундалом предложен новый алгоритм решения задач механики разрушения горных пород, основанный на решении системы дифференциальных уравнений движения и уравнениях связи напряжений и деформаций горных пород, которые зависят от выбранной теории прочности.

Дифференциальные уравнения движения массива горных пород записываются в следующем виде

$$\frac{\partial \sigma_{i,j}}{\partial x_i} + \rho b_i = \rho \frac{dv_i}{dt}, \quad (1)$$

где $\sigma_{i,j}$ – нормальные и касательные напряжения, действующие в массиве горных пород, Па;

x_i – координаты декартовой системы, м;

ρ – плотность горных пород, кг/м³;

b_i – удельные силы, развивающиеся в массиве горных пород, и приводимые к единице его массы Н/кг;

v_i – скорость движения элементарных объемов массива горных пород, м/сек;

t – время, сек.

Если правая часть равна нулю, наступает статическое равновесие массива горных пород. В противном случае породы находятся в состоянии движения, что сопровождается конечной скоростью смещений на контуре выработки, которая как показали инструментальные наблюдения, варьируются в пределах от 1 до 72 мм/сут.

Система дифференциальных уравнений решается численным методом конечных разностей. При решении системы дифференциальных уравнений используется современная модель проч-

ности горных пород, основанная на теории Кулона-Мора. Это дает возможность реалистично моделировать процесс нелинейного деформирования вмещающих пород, включая участок запредельного деформирования и разуплотнение породы.

На рис. 1, а приведена расчетная схема, которая использовалась для компьютерного моделирования процесса разрушения пород вокруг подготовительной выработки при величине критерия устойчивости ($\gamma H/R$) равном 0,4.

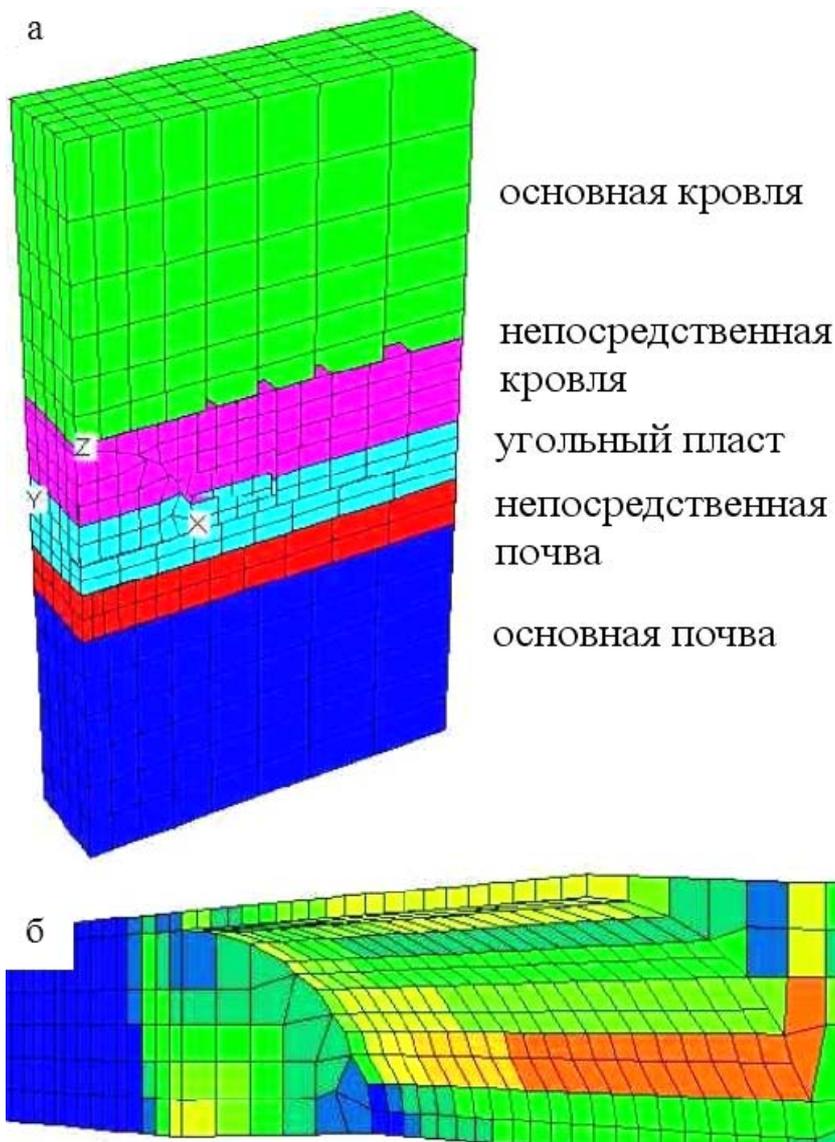


Рис. 1. Расчетная схема (а) и характер разрушения пород вокруг подготовительной выработки в окрестности ее подготовительного забоя (б – степень разрушения указана полутонами)

Рассматривалась магистральная подготовительная выработка, которая расположена на глубине 850 м при прочности вмещающих пород равной 45 МПа. Сечение принималось арочной формы, а его площадь равной 20 м². При этом ширина выработки составляла 5,78 м, а высота 3,7 м. Границы расчетной области вниз от почвы, вверх от кровли и в сторону от боковой стенки выработки располагались на расстояниях 10, 15 и 10 м соответственно. Это позволило правильно задать граничные условия, и обеспечить достоверность результатов моделирования.

Модуль объемного сжатия вмещающих пород принимался равным 5 ГПа модуль сдвига 3 ГПа, угол внутреннего трения вмещающих пород 35⁰, сцепление 1 МПа, предел прочности на растяжение 1 МПа. Плотность пород составляла 2500 кг/м³, вертикальная компонента горного давления 21,2 МПа, горизонтальные 10 МПа. Задача решалась в трехмерной постановке. Для уменьшения времени решения рассматривалась правая половина сечения выработки.

Моделируемая толща горных пород разбивалась на горизонтальные слои, в пределах которых можно было задавать свойства осадочных пород. На вертикальных границах, перпендикулярных осям X и Y ограничивались перемещения вдоль этих осей. На нижней границе расчетной области ограничивались вертикальные перемещения, а к верхней границе прикладывались перемещения с заранее заданной скоростью. Скорость перемещения границы вниз против направления вертикальной оси координат подбиралась такой, чтобы с учетом разрушения пород вокруг выработки и перераспределения напряжений вокруг ее сечения уровень вертикальной нормальной компоненты напряжений поддерживался заданному в соответствии с глубиной заложения выработки. Именно такой прием позволял моделировать процесс деформирования пород во времени, а фронт разрушения пород вокруг выработки перемещался во времени и пространстве так, как это установлено в натуральных условиях с помощью глубинных реперов [5]. Указанный подход адекватно отражает кинетическую природу прочности горных пород, в основе которой лежит процесс исчерпания долговечности породы с течением времени.

Следует отметить, что технически время внутри модели реализовалось в виде циклов пересчета системы дифференциальных уравнений. Соответствие же цикла и реального интервала времени в натуре обеспечивалось коэффициентом временного подобия, который устанавливался эмпирически на основе сопоставления расчетных и реальных проявлений горного давления и, в первую очередь, скорости смещений пород на контуре выработки, размеров зоны разрушений и динамики ее роста.

Для того чтобы правильно учесть начальное состояние моделируемой системы «крепь - окружающий массив горных пород» использовалась реальная очередность процессов выемки и крепления горной выработки. Для этого вначале осуществлялось нагружение блока из горных пород нормальными напряжениями, которые соответствовали глубине заложения выработки. Важно подчеркнуть, что при этом обеспечивалось статическое равновесие всей системы, поскольку именно в таком состоянии находится массив горных пород до проведения горных работ. Статическое равновесие достигалось демпфированием разбалансирования внутренних сил в модели после ее нагружения. Поскольку модель нагружали мгновенно, внутри модели возникали инерционные силы, которые приводили к колебательным процессам. Эти динамические процессы подавлялись итерационным способом путем демпфирования невязки сил в отдельных узлах расчетной области.

Важно отметить, что в нетронутым блоке горного массива заранее задавалась форма выработки. Это осуществлялось путем подбора формы расчетных зон или элементов, на которые разбивалась расчетная область. Это видно на рис. 1, а, поскольку в нетронутым массиве горных пород уже угадывается сечения будущей подготовительной выработки. После достижения статического равновесия осуществлялась выемка горной породы внутри полости подготовительной выработки. Выемка породы сопровождалась перераспределением напряжений в модели и разрушением пород в тех областях, где условие прочности нарушалось. Поскольку согласно кинетической теории прочность пород зависит от скорости нагружения, следовало осуществлять выемку с такой

скоростью, которая соответствовала реальной скорости проходки выработки.

В том случае, когда выемка породы осуществляется мгновенно (как например это всегда реализуется в методе конечных элементов), возникали динамические явления вокруг полости выработки, что искажало характер разрушения вмещающих пород и приводило к колебательным динамическим процессам перераспределения напряжений. В данном случае такой эффект был нежелателен, поскольку он искажал реальный характер разрушения вокруг проходимой выработки. Реально массив горных пород вокруг подготовительной выработки на большой глубине постоянно находится в неравновесном состоянии. Однако такое состояние близко к состоянию равновесия. Анализ результатов расчета показал, что смещения пород меняются во времени, однако выраженные динамические явления отсутствуют, а скорость смещений пород на контуре выработки, как уже указывалось, не превышает нескольких десятков миллиметров в сутки.

Обеспечение указанных условий гарантировало достоверность результатов моделирования, поскольку скорости смещений на контуре выработки соответствовали установленным в натуральных условиях. На рис. 1, б показан характер разрушения вмещающих пород и их смещений на контуре выработки. Наиболее интенсивные неупругие деформации протекают в боковых стенках выработки, в почве и в кровле и в меньшей степени в центральной части плоскости подготовительного забоя. Интенсивность разуплотнения пород в боковых стенках выработки и ее почве достигают 4 % и более, а скорость конвергенции составляет порядка 2-10 мм/сут.

Указанные скорости конвергенции соответствовали измеренным в натуральных условиях на контуре уклонных выработок шахты Щегловка. Выработка охраняется в таких же условиях, при которых произведено математическое моделирование. Напомним, что адекватные натурным скорости конвергенции и характер деформирования вмещающих пород получали путем настройки параметров модели и, в первую очередь подбором скорости перемещения верхней границы расчетной области.

В процессе проведения подготовительную выработку крепи рамной и анкерной крепью. Крепи устанавливали в забое выработки согласно требованиям. Анализ результатов моделирования показал, что в процессе развития зоны разрушенных пород вокруг выработки уменьшаются напряжения, а максимум их передвигается вглубь породного массива. Эта закономерность хорошо согласуется с результатами шахтных натуральных наблюдений, выполненных с помощью глубинных реперов [7].

Оказалось, что процессы разрушения отдельных блоков пород сопровождаются накоплением энергии деформации с последующим ее высвобождением в процессе разрушения. Важно, что участки, в пределах которых образуются локальные концентрации энергии деформаций, меняются в пространстве и времени в хаотическом порядке. При визуализации результатов моделирования в реальном масштабе времени наблюдается мерцание мозаики распределения, что отвечает кластерному механизму необратимых сдвижений массива горных пород [8]. Разрушенные блоки массив группируются во временные пространственные структуры, называемые кластерами. Эти структуры перемещаются как единое целое до тех пор, пока возникает локальный эффект самозаклинивания кластеров, после чего начинается накопление энергии в данном кластере.

При превышении эквивалентных напряжений допустимого уровня кластер разрушается. При этом распад кластера происходит по ранее разрушенным границам (трещинам) или по участку ненарушенного массива, то есть разрушается блок ранее разрушенной породы и разделяется на более мелкие фрагменты. Оказалось, что около 80 % кластеров перестраиваются без повторного разрушения породы. И лишь менее 20 % испытывает новое разрушение по нетронутому участку тела породных блоков.

В результате указанного комплекса необратимых процессов вокруг выработки формируется зона неупругих деформаций и разрушений, которая видна на рис. 2. На рис. 3 показано распределение суммарной энергии горного давления, которая накопилась вокруг выработки в результате необратимых проявлений сил горного давления. Видно, что наиболее энергоемкий процесс разрушения и необратимых сдвижений горных пород происходит в

боках выработки. Менее энергоемкий процесс протекает в породах кровли и минимум энергии горного давления расходуется на пучение пород почвы выработки. Такие результаты хорошо согласуются с данными инструментальных наблюдений.

На рис. 4 приведены совместные графики изменения величин деформаций сечения выработки и удельной энергии необратимых деформаций во времени. Видно, что деформации сечения выработки накапливаются с затуханием, что полностью отвечает данным натурных инструментальных наблюдений. В течение 100 суток площадь сечения уменьшилась на 60%, а к 900 суткам произошло практически полное уничтожение первоначального сечения выработки.

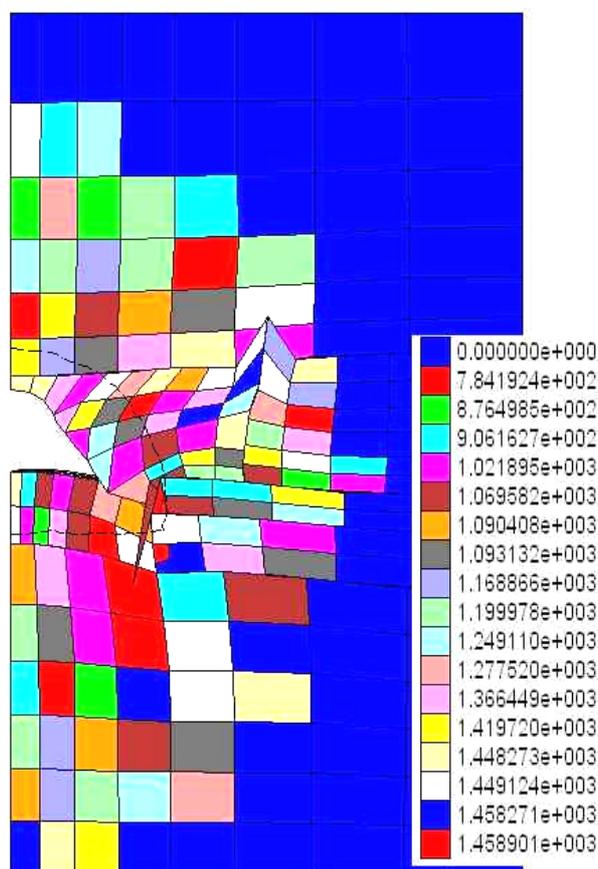


Рис. 2. Приращение работы неупругих деформаций (Дж/с/м^3) вокруг сечения выработки в момент деформации ее сечения на 60 %

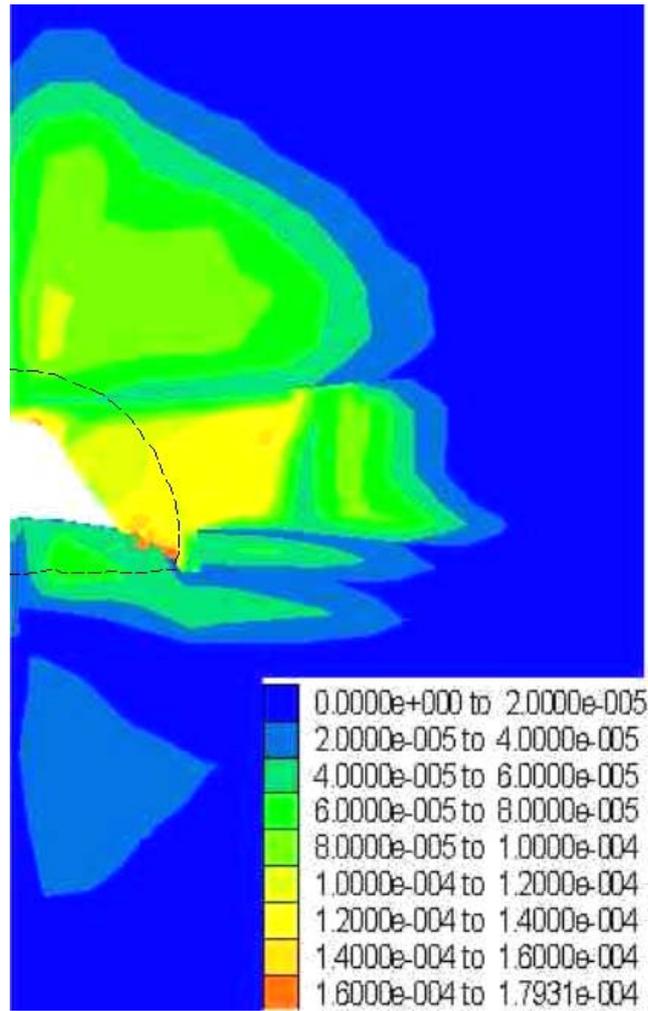


Рис. 3. Суммарное распределение энергии необратимого деформирования пород (Дж/м³)

При этом впервые установлено наличие максимума на кривой изменения удельной энергии необратимых деформаций вокруг подготовительной выработки. Видно, что на необратимые деформации вмещающих пород расходуется максимум энергии горного давления. В данном случае его величина близка к 50 МДж/м³. Однако после того как вокруг выработки зарождается зона разрушенных пород, удельная энергия необратимого разрушения пород начинает уменьшаться. При этом, начиная с момента, когда сечение выработки уменьшилось на 60 %; график энергии принимает пилообразную форму. Удельный расход энергии деформаций периодически увеличивается и уменьшается. Это является явным следствием эффекта самозаклинивания разрушенных пород вокруг подготовительной выработки.

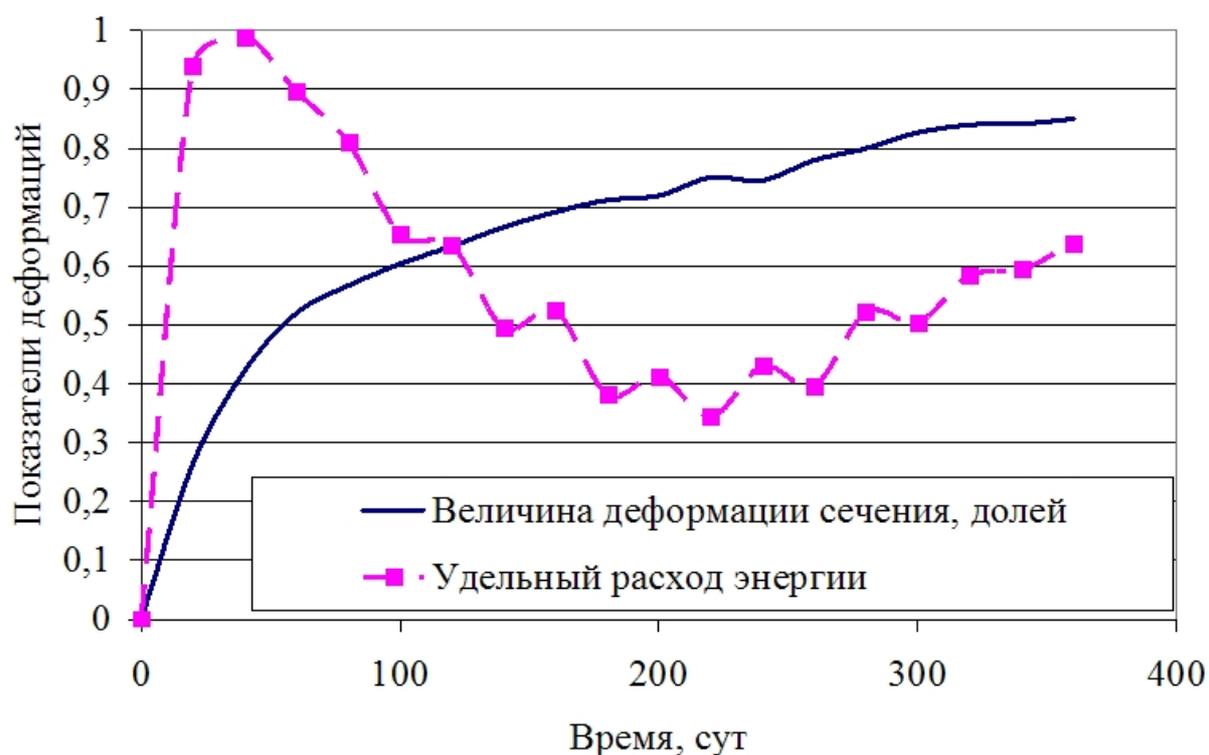


Рис. 4. Изменение величины деформаций площади сечения выработки и удельной энергии необратимых деформаций во времени

В момент, когда сечение выработки уменьшилось на 75 %, наступает минимум расходования удельной энергии сил горного давления. Однако при дальнейшем уменьшении сечения энергия опять возрастает. Это объясняется уменьшением степени свободы (то есть возможности смещаться разрушенным породам в полость выработки).

Полученные результаты позволяют модифицировать способы охраны и поддержания выработок в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях эксплуатации. В частности выделены периоды эксплуатации выработки, в течение которых расходуются максимальные и минимальные количества удельной энергии деформации вмещающих пород. Учет этих особенностей позволяет рационально выбрать пассивные и активные мероприятия по повышению устойчивости выработки.

Дальнейшими исследованиями планируется разработка способов повышения устойчивости выработки, учитывающих теку-

щий уровень удельной энергии необратимых деформаций пород вокруг поддерживаемой выработки.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Глушко В.Е., Виноградов В.В. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления. М.: Недра, 1982, 192 с.
2. Руппенейт К.В. Деформируемость массивов трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1975, 223 с.
3. Дрибан В.А. Новый подход к оценке устойчивости горных выработок // Проблемы гірського тиску. Донецьк. ДонНТУ. № 15, 2007. С. 104-119.
4. Зборщик М.П., Назимко В.В. Охрана выработок глубоких шахт в зонах разгрузки. К.: Тэхніка, 1991, 248 с.
5. Заславский Ю.З., Зорин Л.Н., Черняк И.Л. Расчет параметров крепи выработок глубоких шахт. – К.: Техніка, 1972, 156 с.
6. Сажнев В.П., Лаптеев А.А., Александров С.Н., Назимко В.В. Численное моделирование увеличения несущей способности вмещающих выработку пород за счет эффекта их саморасклинивания // Известия Донецкого горного института. – 1996 – № 4. – С. 15-29.
7. Касьян Н.Н. Метод оценки характера деформационных процессов в массиве пород вокруг выработок // Известия Донецкого горного института.– № 1(5).– 1997.– С.93–96.
8. Бокий Б.В., Александров С.Н., Назимко И.В. Кластерный механизм динамики сдвижения подрабатываемого движущейся лавой массива горных пород // Матеріали міжнародної конференції "Форум гірників". 2007. С. 49 – 55.