

Раздел 2. Прогнозирование и управление состоянием горного массива

УДК 622.831

Е.В. Гладкая, В.В. Назимко

ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ КОНЦЕПЦИИ УЧЕТА ВЗАИМОВЛИЯНИЯ КРОВЛИ, БОКОВ И ПОЧВЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ СМЕЩЕНИЙ НА КОНТУРЕ ВЫРАБОТКИ

Институт физики горных процессов НАН Украины

Разработан новый подход к расчету смещений на контуре подготовительной выработки, предложен и обоснован новый принцип учета произвольного числа изменений горнотехнической и горно-геологической ситуации в окрестности эксплуатируемой выработки. Выполнено сравнение расчетных данных с экспериментальными величинами смещений на контуре выработок в разных горно-геологических условиях.

Ключевые слова: породы, разрушение пород, физическое моделирование, смещение, выработка, устойчивость.

В последнее время наметилась тенденция к рассмотрению механизма смещений и формирования давления на крепь выработки как единого целого, в котором участвуют все вмещающие породы одновременно и происходит взаимовлияние отдельных факторов, таких, например, как параметров зоны разрушения, отпора крепи и конвергенции на контуре выработки [1]. Этот новый подход получил как экспериментальное [2], так и теоретическое подтверждение [3, 4]. Шахтными натурными измерениями показано [2, 4], что зона разрушения пород вокруг выработки увеличивается не одновременно во всех направлениях, а поочередно, то в кровле, то в почве, то в боках выработки. При этом данная очередность объясняется взаимовлиянием процессов разрушения и повторного уплотнения пород в кровле, боках и почве выработки. Поэтому при расчете смещений на контуре выработки, целесообразно учитывать изменения площади уменьшения сечения выработки, а не отдельных компонент смещений [3, 4].

Подземную выработку можно рассматривать как открытую термодинамическую систему, которая пропускает через себя поток энергии горного давления [6]. Интенсивность указанного потока тем больше, чем выше уровень горного давления и чем меньше средняя прочность вмещающих выработку пород. С достаточной в практике точностью, интенсивность потока энергии горного давления можно положить пропорциональной критерию проф. Заславского, уточненного с учетом концентрации горного давления в

виде σ/R , где R – средневзвешенная прочность вмещающих пород, а σ – уровень действующего горного давления. При этом действующий уровень горного давления может в несколько раз превышать геостатический в зонах повышенного горного давления (ПГД). Этим обстоятельством принятый критерий отличается от критерия проф. Заславского. В процессе разрушения вмещающих пород и развития зоны неупругих деформаций вокруг подготовительной выработки энергия горного давления преобразуется в работу разрушения пород и их перемещения в полость выработки. Эта работа может быть в первом приближении связана с величиной потери площади сечения выработки $\Delta F/F$ и времени ее эксплуатации. Здесь ΔF и F представляют собой потерю площади сечения и ее первоначальную величину соответственно.

Применив, подход ВНИМИ, хорошо зарекомендовавший себя ранее, можно определять максимально возможное уменьшение площади сечения за длительный срок службы выработки, а затем эмпирическим коэффициентом скорректировать искомую величину на текущий момент времени. Таким приемом уходят от учета времени на первоначальном этапе расчетов, что упрощает их, и делает результаты надежнее. Остальные влияющие факторы, такие как, отпор крепи, упрочнение вмещающих пород могут быть также учтены опосредованно через коррекцию расчетной прочности пород. В итоге структурная зависимость относительного уменьшения площади сечения за весь срок службы выработки имеет следующий вид:

$$\Delta F/F = f(\sigma/R) \quad (1)$$

При отсутствии горных ударов и других динамических явлений указанный поток можно рассматривать на коротких интервалах времени (несколько суток) как квазистационарный, а открытую систему «выработка – окружающий горный массив», как находящуюся в состоянии, близком к динамическому равновесию. В таком состоянии открытая термодинамическая система характеризуется минимумом производства энтропии. В данном случае энтропия рассматривается как функция, характеризующая геомеханическое состояние системы «выработка – окружающий горный массив». Для поддержания такого состояния вмещающие выработку породы будут разрушаться таким образом, чтобы минимизировать работу горного давления на разрушение. С геомеханической точки зрения это означает, что если, например, в почве выработки залегает слабый аргиллит с пределом прочности на сжатие 45 МПа, а в кровле песчаник с прочностью 70 МПа, то вертикальная конвергенция в выработке реализуется главным образом за счет разрушения пород почвы и ее пучения. Наоборот, если в кровле и почве залегают породы примерно одинаковой прочности, вертикальная конвергенция будет состоять из примерно одинаковых смещений пород кровли и почвы. Таким образом, величина смещений, например, кровли, при одной и той же ее проч-

ности должна зависеть от прочности пород боков и почвы, что, как уже отмечалось в анализе состояния вопроса, не учитывается существующими методиками.

Сказанное иллюстрируется графиками смещений кровли и почвы в одиночной выработке на модели из эквивалентных материалов на основе гипсо-песочной смеси рис. 1.

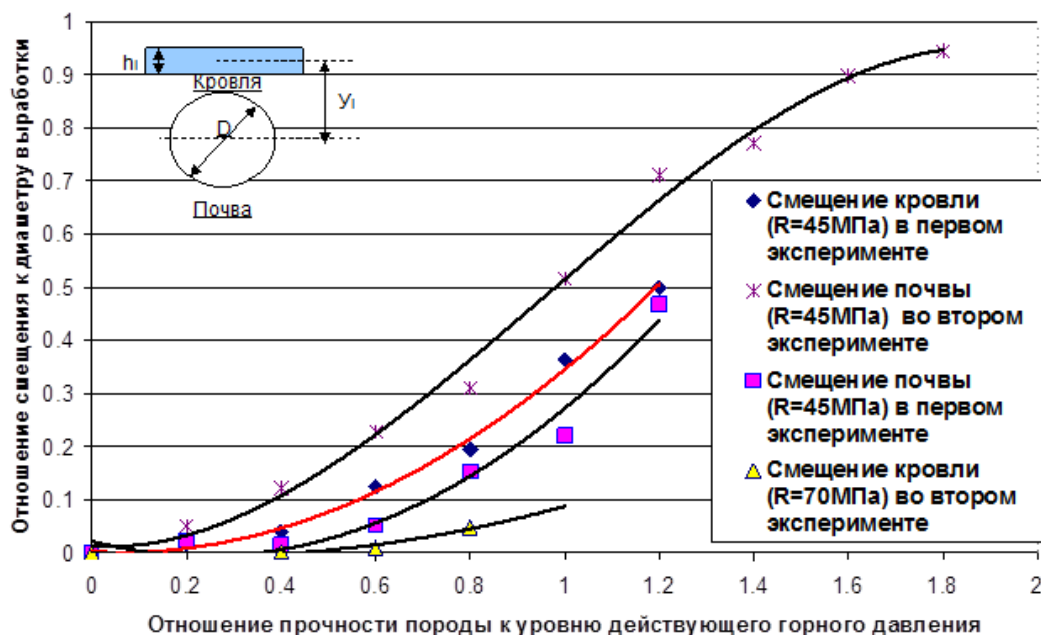


Рис. 1. Безразмерное смещение кровли и почвы в круговой выработке при разных прочностях вмещающих пород

Физическое моделирование разрушений вмещающих пород и смещений на контуре выработки круглого сечения проводилось в условиях плоской деформации в геометрическом масштабе 1:50 для следующих исходных условий. Глубина заложения выработки изменялась от 200 м до 1800 м, прочность вмещающих пород находилась в диапазоне 40-70 МПа, в выработке использовалась податливая крепь с минимальным отпором. Проводилось два эксперимента. В первом прочность пород кровли, боков и почвы была одинаковой и равнялась 45 МПа. Во втором опыте прочность составляла 70 МПа, боков и почвы 45 МПа. Как видим на экспериментальных графиках, смещения кровли и почвы в первом случае примерно одинаковы, причем сечение выработки почти исчезло в результате интенсивных деформаций при относительном уровне горного давления 1,2. Во втором случае смещения кровли и почвы неодинаковы, что вполне очевидно. Интереснее тот факт, что во втором эксперименте пучение почвы примерно в 2 раза больше, чем в первом, хотя абсолютная прочность пород была одинакова. Таким образом, экспериментально подтверждена теоретическая предпосыл-

ка о существенном взаимовлиянии пород кровли, боков и почвы на величину их смещений.

На основании данного вывода предложен новый подход к расчету смещений на контуре выработки. Он состоит в том, чтобы вначале рассчитать уменьшение площади сечения выработки, а затем разделить смещения на компоненты в кровле, боках и почве. Как уже отмечалось в термодинамическом анализе, источником работы на разрушение и смещение пород в полость выработки является горное давление. Источником сопротивления этому процессу является прочность вмещающих выработку пород. Ясно, что в уменьшение площади сечения выработки вносят свой вклад все породные слои, которые попадают в зону влияния выработки. Вследствие этого понадобится какая-то приведенная характеристика прочности, которая отражает вклад всех породных слоев, затронутых данной выработкой. Проще говоря, понадобится средневзвешенная прочность вмещающих пород. Это означает, что проблема приведения прочности к единой величине, которая детально охарактеризована в анализе, требует своего конкретного разрешения.

Начнем с того, что средняя прочность R вмещающих выработку пород должна быть собрана из средневзвешенных пород кровли, почвы и боков выработки. Приведения этих трех величин можно осуществить по формуле алгебраического, геометрического или взвешенного среднего. В данной работе был выбран подход на основе среднегеометрического, хотя право на применение имеют и остальные. Были осуществлены оценки для трех случаев.

Первый, когда породы кровли были представлены весьма прочными разностями, породы боков средними, почвы слабыми.

Второй случай соответствовал обратному порядку изменения прочности, то есть кровля слабая, бока средней и почва большой прочности.

Третий случай анализировал ситуацию со слабыми кровлей и почвой и прочными боками. Приведение прочности к средней величине с помощью всех трех методов дали примерно одинаковые результаты, причем среднегеометрическая величина почти совпала с взвешенной с учетом площадей зоны влияния выработки.

Учитывая, что среднегеометрическую величину рассчитывать гораздо проще и быстрее, последняя была выбрана в качестве рабочей методики. Следует подчеркнуть, что нюансы, связанные с выбором метода приведения, легко будут учтены при определении величин эмпирических коэффициентов и параметров в формулах расчета смещений.

После выбора метода приведения прочности необходимо решить проблему, связанную с расчетом средневзвешенной прочности пород кровли, боков и почвы [7]. В случае приведения к общей прочности бока, почва и кровля непосредственно примыкают к контуру выработки, а поэтому имеют одинаковое доленое участие в формировании соответствующих компонент смещений. В случае приведения прочности в кровле и почве разные породные

слои отстоят на разном расстоянии от контура выработки и таким образом оказывают разный вклад в формирование его смещений, о чем уже говорилось ранее.

В связи с этим приведение прочности пород кровли, боков и почвы решено было проводить согласно формуле, опубликованной в источнике [6]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n R_i h_i / y_i}{\left(\sum_{i=1}^n h_i / y_i\right)}, \text{ МПа} \quad (2)$$

где R_i , h_i , y_i – прочность, мощность и расстояние от центра тяжести отдельного породного слоя до центра выработки соответственно.

Рис. 2 иллюстрирует процесс приведения прочности с учетом расстояния слоя до контура подготовительной выработки.

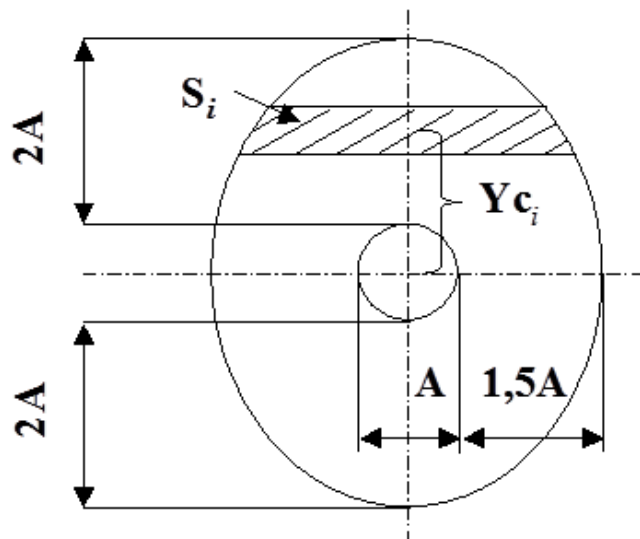


Рис. 2. Схема приведения прочности пород кровли, почвы и боков выработки: А – ширина выработки

При этом размеры зоны влияния выработки на окружающие породы приняты следующими: в кровле и почве 2 и 1,5 ширины выработки, в боках 1,5 ее высоты. Фиксация расстояния слоя относительно контура выработки очень важна, поскольку дает возможность учесть его значимость в общей доли влияния на смещение контура выработки. Чем дальше слой от контура, тем меньше его влияние на смещение. Такой учет местоположения слоя в отличие от существующих методик существенно повышает точность расчетов смещений на контуре выработки [6].

Одним из существенных недостатков отраслевой методики расчета смещений на контуре подготовительной выработки является недоучет влияния дальних породных слоев. При использовании формулы 2 можно увеличить размеры зоны влияния выработки до максимально возможных без потери точности расчетов. При этом самые дальние слои будут давать самый малый вклад в средневзвешенную прочность. Поэтому нет опасности потери точности расчетов прочности при некотором завышении размеров зоны влияния. С другой стороны, учет местоположения тех слоев, которые расположены поближе к контуру выработки, дает существенное увеличение точности оценки средневзвешенной прочности, достигающее при заметной разнице в прочности смежных слоев 40-50% и даже более.

С целью проверки концепции на физической модели и установление вида конкретных зависимостей определялась зависимость уменьшения площади сечения выработки от критерия устойчивости согласно структурной формуле (1). Для этого были проведены специальные эксперименты на моделях из эквивалентных материалов по вышеописанной методике. Для полного и равномерного охвата диапазонов возможных величин, входящих в зависимость (1) было проведено 36 экспериментов на шести физических моделях. При этом средняя прочность вмещающих пород изменялась в диапазоне 20-70 МПа, что на 95% отражает практически весь диапазон прочностей угленосной толщи Украинского Донбасса.

Величина горного давления в окрестности моделируемых выработок изменялась в диапазоне 10-60 МПа. Это соответствует глубине разработки свыше 400 м, и диапазону концентраций горного давления до 3 при глубине разработки 800 м, или до 5, при глубине разработки около 500 м. Другими словами диапазон нагрузки в моделях был подобран так, чтобы перекрыть наиболее часто встречающиеся в практике работы угольных шахт случаи, характеризующие напряженность вмещающих подготовительные выработки пород. При этом критерий σ/R находился в диапазоне 0,14-3,0, что перекрывает практически все возможные его величины, встречающиеся в практике горного дела. Заметим, что 75% всех экспериментов проводилось при значении критерия 0,14-1,0, которое чаще всего встречается в практике горных работ.

Диапазон величин площади поперечных сечений моделируемых выработок от 13 м² до 18 м² также отражал наиболее типичные значения площадей сечений реальных подготовительных выработок, как-то выемочных, примыкающих к очистным забоям, выработок основного направления, магистральных штреков, капитальных уклонных и выработок типа квершлаг.

Для ускорения времени моделирования применялась ранее испытанная методика активации процессов сдвижений в модели с помощью вибрации. Измерения конечной величины сечения выработки производилось после стабилизации размеров зоны неупругих деформаций и смещений на ее контуре. Обычно при величинах критерия устойчивости до 0,5 испытание одно-

го сечения заканчивалось за 30-150 минут. При более низких значениях критерия на испытание затрачивали до рабочего дня. В целом на проведение данного эксперимента понадобилось несколько месяцев с учетом подготовки и испытания исходного материала, закатки и отработки моделей.

Моделирование проводилось в геометрическом масштабе от 1:30 до 1:50, что позволило получить данные испытаний с точностью не менее $\pm 25\%$ и объяснить 92% экспериментальных точек при заданной (экспоненциальной) форме зависимости.

Выработки моделировались без крепи или в случае тяжелых условий по критерию устойчивости (более 0,6) с легкой податливой поддерживающей крепью, для предотвращения вывалов кровли и плавного уменьшения сечения [8], что в большинстве случаев соответствует практике эксплуатации выработок.

На рис. 3 приведены характерные состояния некоторых модельных выработок в процессе их испытания, показаны исходное (а) и конечное (б) состояние модельной выработки при величине критерия устойчивости 0,28.



Рис. 3. Состояние сечения выработки при умеренной величине критерия устойчивости: а) исходное; б) конечное

На снимках видно, что уменьшение сечения выработки произошло в основном за счет пучения почвы. При этом наблюдалось равномерное обжатие податливой арочной крепи.

Дальнейшее изучение динамики изменения состояний поперечного сечения выработки при величине критерия устойчивости 0,75 (рис. 4) показало, что площадь сечения выработки уменьшилась на 54 %. При этом на конечном этапе деформирования можно заметить его некоторую несимметричность, хотя начальные исходные условия были симметричны.

Данная модель отрабатывалась по технологии разложения аммонийной соли. На снимках видны проводники, подводящие электроэнергию к нагре-

вателю, расположенному внутри сечения выработки и окружающем аммонийную соль белого цвета.

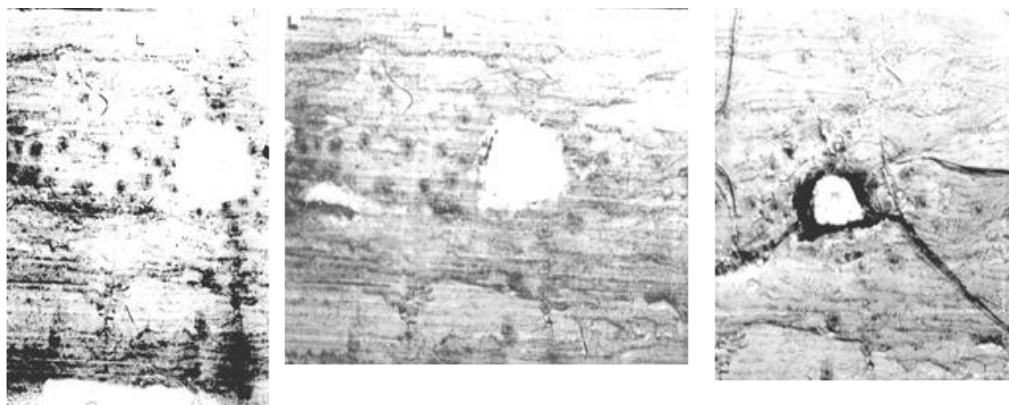


Рис. 4. Процесс деформирования сечения экспериментальной выработки при величине критерия устойчивости 0,75

Похожая картина деформирования наблюдалась и при величине критерия 0,83 (рис. 5). При этом, площадь сечения уменьшилась на 68% в результате интенсивного пучения почвы и кровли в полость выработки.

Следует заметить, что интенсивная деформация обусловлена созданием соответствующих граничных условий, чему в первую очередь способствовал подпор боковых поверхностей модели толстыми стеклами, которые не во всех случаях выдерживали длительную нагрузку во времени.



Рис. 5. Картина деформирования сечения модельной выработки при величине критерия 0,83

При значении критерия устойчивости 0,9 наблюдалось уменьшение сечения на 79-91 % (рис. 6). Потеря устойчивости происходит почти в равной степени, как за счет смещений почвы, так и кровли. Практически полная потеря сечения наступает при величинах критерия устойчивости 1,0 и более.



Рис. 6. Деформирование сечения при значении критерия устойчивости 0,9

Снимки на рис. 7 также характеризуют типичное состояние выработок, сдеформированных при подобных условиях.

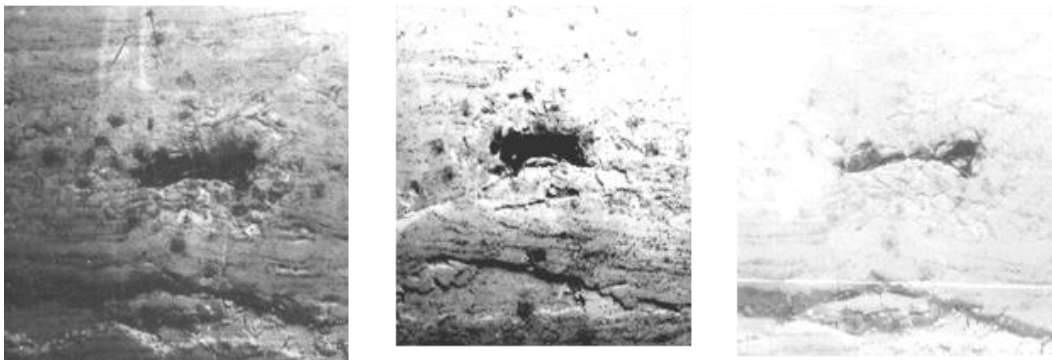


Рис. 7. Полная потеря сечения при величинах критерия устойчивости 1,0 и более

Как видно, величина потери площади поперечного сечения изменяется от едва заметной на глаз до полной потери первоначальной площади сечения. Состояние испытуемого сечения определяется критерием устойчивости и временем испытания модели под заданной нагрузкой.

Анализ состояния моделей в процессе их испытания показал, что значительная (более 50%) потеря площади сечения, как правило, сопровождается формированием складки в кровле и почве выработки. Такое складкообразование специально исследовалось в работах [9, 10]. В данной работе главное внимание уделялось измерениям потери площади поперечного сечения и измерению соотношения отдельных компонент смещений. Исходные данные, а также результаты измерений конечных величин потери площади сечения выработок, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты испытаний моделей при различных исходных условиях

Напряже- ние, МПа	Прочность на одноос- ное сжатие R, МПа	Значение критерия sig/R	Изменение площади сечения dF, м ²	Исходная ве- личина пло- щади сечения F, м ²	Относитель- ное уменьше- ние площади сечения
1	2	3	4	5	6
0	20	0,00	0,00	15	0,00
10	20	0,50	0,18	15	0,01
20	20	1,00	0,71	15	0,05
30	20	1,50	1,55	15	0,10
40	20	2,00	2,65	15	0,18
50	20	2,50	3,93	15	0,26
60	20	3,00	5,31	15	0,35
10	30	0,33	6,73	15	0,45
20	30	0,67	8,11	15	0,54
30	30	1,00	9,39	15	0,63
40	30	1,33	10,55	15	0,70
50	30	1,67	11,55	15	0,77
60	30	2,00	12,39	15	0,83
10	40	0,25	11,33	13	0,87
20	40	0,50	11,80	13	0,91
30	40	0,75	12,16	13	0,94
40	40	1,00	12,42	13	0,96
50	40	1,25	12,61	13	0,97
60	40	1,50	12,75	13	0,98
10	50	0,20	12,84	13	0,99
20	50	0,40	12,90	13	0,99
30	50	0,60	12,94	13	1,00
40	50	0,80	12,96	13	1,00
50	50	1,00	12,98	13	1,00
60	50	1,20	12,99	13	1,00
10	60	0,17	17,99	18	1,00
20	60	0,33	18,00	18	1,00
30	60	0,50	18,00	18	1,00
40	60	0,67	18,00	18	1,00
50	60	0,83	18,00	18	1,00
60	60	1,00	18,00	18	1,00
10	70	0,14	0,18	18	0,11
20	70	0,29	0,71	18	0,18
30	70	0,43	1,55	18	0,22
40	70	0,57	2,65	18	0,27
50	70	0,71	3,93	18	0,32
60	70	0,86	0,00	18	0,40

Таким образом, было установлено, что относительная площадь сечения в результате проведения испытаний разных сечений выработок на разных моделях в широком диапазоне величины критерия устойчивости составляет от 0,1 до 1,0. Минимальные значения уменьшения площади сечения соответствуют малым величинам критерия, полная потеря сечения выработки соответствует величине критерия более 1,0. Регрессионный анализ, дал возможность определить следующий вид зависимости уменьшения площади сечения выработки от критерия устойчивости пород:

$$\Delta F / F = 1 - (\exp((\sigma/R)^2 / 0,823)). \quad (3)$$

На рис. 8 приведен вид данной зависимости совместно с нанесенными экспериментальными точками.

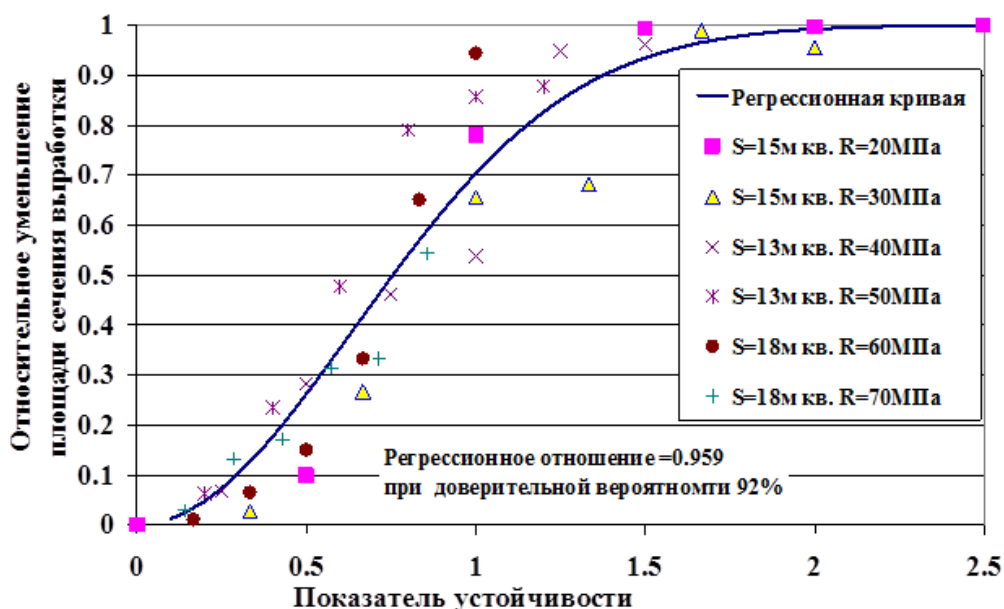


Рис. 8. Зависимость относительного уменьшения площади сечения от показателя устойчивости

Полученная зависимость имеет сложный характер зависимости сложный, а на кривой наблюдается перегиб в диапазоне величин критерия устойчивости 0,5-0,7, что согласно классификации проф. Заславского соответствует тяжелым условиям эксплуатации. До перегиба кривая слабо зависит от критерия устойчивости. После перегиба кривая быстро поднимается к величине 0,8-0,9 и приобретает характер, отражающий насыщение деформаций сечения. Такое поведение объясняется тем, что до величины критерия устойчивости 0,5-0,7 большая часть вмещающих пород находится в устойчивом состоянии, а их локальное разрушение в зонах концентраций напряжений не-

существенно сказывается на росте зоны неупругих деформаций и потере устойчивости выработки. После превышения критерием критического значения происходит массовая потеря устойчивости вмещающих пород и их смещение в полость выработки. Однако этот процесс по мере уменьшения сечения на 80-90% приобретает затухающий характер, что можно объяснить эффектом саморасклинивания пород [8, 9], который неизбежно проявляет себя, особенно при больших смещениях пород в полость выработки с одной стороны, а также эффектом саморазгрузки пород вблизи выработки с другой.

Согласно исследованиям, выполненным в Национальной горной академии [11], размер зоны неупругих деформаций и затраты средств на поддержание выработок зависят экспоненциально от критерия устойчивости, что прямо связано с величиной площади потери сечения выработки. Таким образом, полученная зависимость не только подтверждается независимыми результатами исследований, но и уточняет механизм насыщения смещений на контуре выработки. Так, если деформированное сечение выработки не возмущать ремонтными работами, смещения после насыщения стабилизируются. Это даёт возможность сохранить правильные граничные условия при расчете смещений на контуре выработок в широком диапазоне условий. В практике горных работ часто встречаются случаи, когда выработку не перекрепляют, несмотря на то, что величины смещений превысили допустимые. Кроме того, существует способ обеспечения допустимых габаритов выработки, когда ее проходят завышенным сечением, и заранее идут на то, что смещения на контуре будут весьма велики.

Для оценки достоверности полученной зависимости был проведен анализ состояния подготовительных выработок по шахтным наблюдениям, а также сопоставление с результатами других авторов. На текущий момент времени размер зоны определяется с помощью корректировочных коэффициентов ВНИМИ [12], дающих долю от максимально возможных смещений в зависимости от времени эксплуатации выработки. Такой подход является действительно оправданным, так как в силу саморасклинивания пород по мере уменьшения сечения выработки в процессе деформации смещения во времени всегда экспоненциально затухают и не могут превысить габариты выработки. Поэтому подход, при котором вначале рассчитываются максимально возможные смещения, а потом определяется доля от них на текущий момент времени, автоматически сохраняет граничные условия, при которых суммарные смещения не могут превысить габариты сечения выработки.

Согласно подходу ВНИМИ, при котором компоненты смещения пород на контуре корректируют поправочными коэффициентами в зависимости от угла падения пород и ориентации оси выработки относительно линии простирания, а также в зависимости от отпора или несущей способности крепи, влияние угла ориентации выработки относительно линии простирания в данной методике корректировалось на этапе расчета приведенной прочности

пород (чаще всего боков выработки). Эмпирические коэффициенты в формулах расчета смещений определялись для условий пологого и наклонного залегания, хотя принципиальный подход остается тем же и для условий крутого падения. Коррекция смещений на контуре выработки проводилась по аналогии с методикой ВНИМИ, в соответствии с которой приведенная прочность вмещающих пород, корректируется, когда отпор крепи эквивалентен некоторому увеличению прочности пород. Такой подход действительно правомерен и сохраняет физический смысл механизма разрушения пород в окрестности выработки.

С целью совершенствования методики расчета смещений на контуре выработки были вычислены отдельные компоненты смещений. Для этого после расчета изменения площади сечения на текущий момент времени осуществлялся разбор смещений на компоненты по зависимости:

$$\Delta U_{к,п,б} = c_{к,п,б} \Delta FR / R_{к,п,б} , \quad (4)$$

где $\Delta U_{к,п,б}$ – смещения кровли, почвы и боков соответственно;

$c_{к,п,б}$ – эмпирические коэффициенты, зависящие от формы сечения выработки;

$R_{к,п,б}$ – средняя прочность кровли, почвы и боков, вычисленная по формуле (2.2). Идея последней формулы состоит в том, что компоненты сдвига должны быть обратно пропорциональны величинам приведенных прочностей соответствующих частей массива, окружающего данную выработку.

Анализ результатов шахтных инструментальных наблюдений, а также данных физического моделирования показали, что эмпирические коэффициенты зависят главным образом от формы сечения выработки. Конкретные значения эмпирических коэффициентов $c_{к,п,б}$ получены в данной работе для арочной формы сечения выработок, которая применяется в практике горных работ в подавляющем числе случаев. Обработка экспериментальных данных показала, что $c_{к,п,б}$ для арочной формы равны соответственно 84, 110 и 75.

Достоверность полученных зависимостей проверялась путем сравнения расчетных и экспериментальных данных, которые не учитывались при установлении регрессионных зависимостей и величин эмпирических коэффициентов. В качестве контрольных экспериментальных участков для проверки достоверности расчетных данных были выбраны участки полевых выработок, эксплуатируемых в течение 15 лет и более за пределами активного воздействия очистных работ, причем породы не были обводнены. Последнее обстоятельство дает основание принять постоянные граничные условия, при которых эксплуатировалась выработка. Уровень горного давления вокруг выработки сохранялся примерно на одном и том же уровне и соответствовал геостатическому давлению на данной глубине заложения выработки. Прочность вмещающих пород также сохранялась практически постоянной. По-

стоянное значение исходных параметров принималось в соответствии с зависимостями (2–4).

На снимках рис. 9 – 11 показаны характерные состояния полевых магистральных штреков в условиях шахт им. Бажанова, им. Поченкова ГП «Макеевуголь» и им. Героев Космоса ПАО «ДТЭК Павлоградуголь». Все три полевые выработки эксплуатировались при весьма неблагоприятной величине критерия устойчивости, находящихся в пределах 0,5 или даже превышающим это значение. Указанные участки были выбраны как наиболее представительные и типичные для современных условий разработки.



Рис. 9. Характерное состояние полевого магистрального штрека в условиях шахты им. Героев Космоса ПАО «ДТЭК Павлоградуголь»



Рис. 10. Типичное состояние полевого штрека в условиях шахты им. Поченкова ГП «Макеевуголь»



Рис. 11. Обходная выработка западного полевого квершлага гор. 1012 м шахты им. Бажанова ГП «Макеевуголь»

Так, шахта им. Героев Космоса ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» отрабатывает запасы пластов c_{10} и c_{11} на глубине 350 м и более. Согласно [13] состоя-

ние выработок даже за пределами активного воздействия очистных работ в данных условиях характеризуется как неустойчивое.

На рис. 12 приведена выкопировка из плана горных работ в окрестности целика больших размеров, оставленного для охраны вертикальных вскрывающих стволов. Так, восточный полевой штрек расположен фактически на глубине 380 м, что при низком уровне прочности вмещающих пород, не превышающем 20 МПа на одноосное сжатие, создает тяжелые условия для поддержания выработки.

На рис. 9 показано состояние штрека, закрепленного арочной металлической рамной податливой крепью без обратного свода. Обследование состояния выработки проводилось через 17 лет после проведения выработки. Выработка проходила комбайном. Вмещающие породы имеют прочность на одноосное сжатие, близкую к 20 МПа. Суммарные смещения на контуре выработки оценивались на основании сравнения текущих габаритов с проектными ее размерами в момент проходки. Кроме того, результаты этих измерений корректировались и сопоставлялись с данными других авторов [13].

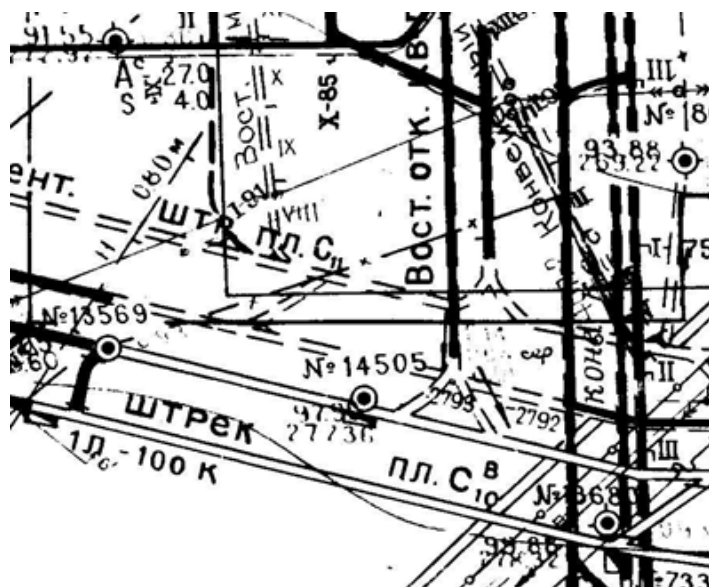


Рис. 12. Выкопировка из плана горных работ в окрестности целика больших размеров, оставленного для охраны вертикальных вскрывающих стволов

Результаты сравнения рассчитанных компонент смещений с фактически на момент обследования выработки представлены в табл. 2. В случаях, при измерении только размеров выработок, разделение вертикальной конвергенции на пучение почвы и опускание кровли производилось с помощью измерения величины проскальзывания элементов крепи в замках податливости. Для обеспечения достоверности результатов натуральных измерений компонент смещений производился обмер 3-5 сечений выработки.

Таблица 2

Результаты сравнения расчетных смещений на контуре контрольных выработок с фактическими

Шахта, выработка	Глубина заложения, м	Геостатистический уровень давления, МПа	Прочность кровли, МПа	Прочность боков, МПа	Прочность почвы, МПа	Средняя прочность, МПа	Критерий устойчивости	Площадь сечения, м.кв.	Относительная потеря площади сечения	Смещения кровли, мм	Смещения боков, мм	Смещения почвы, мм
им. Поченкова, полевой квершлаг	915	22,8	60	40	40	45	0,49	15	0,26	251	336	494
									факт	220	350	600
									отклонение	31	-13	-106
им. Бажанова, полевой уклон	1012	25,3	55	50	65	56	0,45	15	0,21	280	275	310
									факт	270	290	290
									отклонение	10	-14	20
им. Героев Космоса, полевой штрек	355	8,9	20	25	15	19	0,45	18	0,22	327	233,6	571
									факт	350	200	740
									отклонение	-22	33	-168
им. Абакумова	720	18	40	5	45	21	0,86	13	0,59	339	2423	394
									факт	350	2500	350
									отклонение	-10	-76	44
									относительное, %	-3,2	-3,2	11,8

Усредненные данные (табл. 2) показали, что расчетные компоненты смещений кровли, боков и почвы равны соответственно 327 мм, 233 мм и 571 мм, тогда как фактические составили 350 мм, 200 мм и 740 мм. Отклонение расчетных величин от фактических составило + 34 мм – 168 мм, или +14 – 29%.

На рис. 10 показано состояние откаточного квершлага шахты им. Поченкова ГП «Макеевуголь». Выработка пройдена буровзрывным способом для вскрытия пласта l_1 на глубине 915 м в породах песчано-глинистого состава с прочностью на одноосное сжатие 37-65 МПа.

Разрез толщи в данном месте наблюдений представлен на рис. 13.

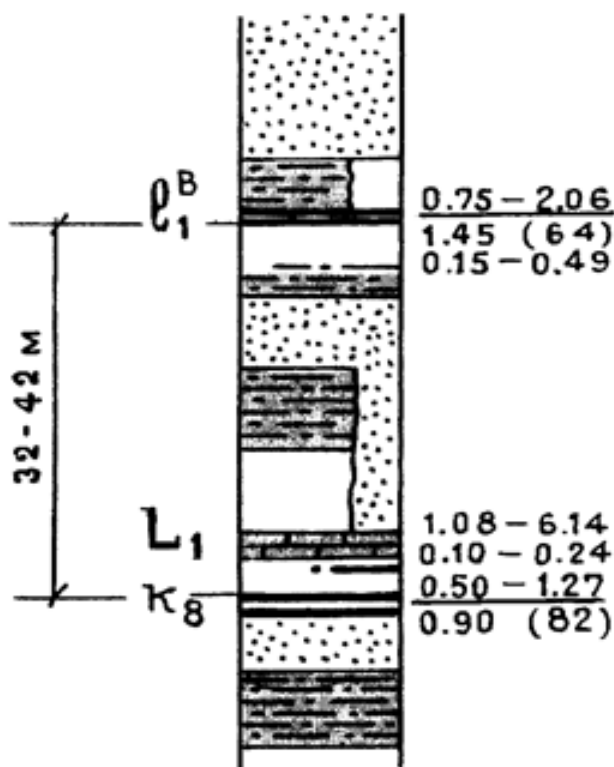


Рис. 13. Структурная колонка в окрестности полевых выработок шахты им. Поченкова

Состояние выработки обследовалось на переходе в западный полевой откаточный штрек. В данном месте выработки охранялись в массиве угля вне зоны влияния очистных работ (рис. 14).

На этой шахте производились длительные шахтные инструментальные наблюдения за конвергенцией на контуре данной и ей подобных выработок. Результаты обобщения проведенных замеров и наблюдений приведены в табл. 2.

Фактические смещения кровли, боков и почвы составляют по усредненным результатам измерений 220 мм, 350 мм и 600 мм. Расчетные величины

этих показателей равны соответственно 251 мм, 337 мм и 494 мм. Абсолютные отклонения колеблются в пределах от +31 мм до -106 мм, или в относительных величинах от +13% до -21%.



Рис. 14. Выкопировка из плана горных работ по шахте им. Поченкова

Достаточно хорошая сходимость расчетных и фактически измеренных смещений наблюдается и на примере шахты им. Бажанова. Обходная выработка западного полевого штрека гор. 1012 м (рис. 11) была пройдена в достаточно прочных породах и поддерживалась в нетронutom массиве вне зоны воздействия очистных работ (рис. 15).

Несмотря на большую глубину расположения, конвергенция на контуре выработки стабилизировалась спустя 3-5 лет после ее проведения, в результате чего выработка сохраняла удовлетворительное состояние.

Расчетные смещения кровли, боков и почвы для данных условий равны 280 мм, 275 мм и 310 мм. Как видно из табл. 2, фактически измеренные компоненты смещения не существенно отличаются от расчетных, что свидетельствует о достоверности установленной зависимости.

Еще одним показательным примером оценки достоверности установленной зависимости смещений от исходных условий является случай независимой оценки конвергенции на контуре вентиляционного хода шахты им. Абакумова [14]. Пласт l_4 имел мощность 1,6 м и расположен в слабометаморфизованных осадочных породах песчано-глинистого состава. После

отработки пласта в установившейся зоне разгрузки был пройден вентиляционный ходок (рис. 16). Отличительной особенностью было то, что выработка проходила по обрушенным и уплотненным породам. Ценность этого эксперимента состояла в том, что условия его проведения были весьма подробно изучены, включая детальные испытания физико-механических свойств обрушенных пород [14]. Кроме того, смещения на контуре выработки тщательно измерялись длительный период времени. Таким образом, были известны не только конечные величины смещений, но и их эволюция во времени.



Рис. 15. Выкопировка из плана горных работ на горизонте 1012 м на шахте им. Бажанова

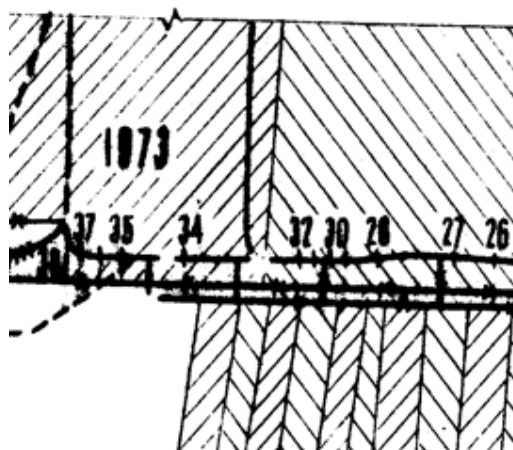


Рис. 16. Горнотехническая обстановка в окрестности вентиляционного ходка на шахте им. Абакумова

После проходки выработки она находилась за пределами воздействия активных очистных работ. Однако в силу отличительных особенностей строения толщи обрушенных и уплотненных пород на величину конвергенции на контуре выработки существенное влияние оказал слой мелкодробленых пород. По данным [14] этот слой расположен непосредственно на почве ранее отработанного пласта. При этом было установлено, что характер конвергенции сильно зависит положением сечения выработки относительно вышеуказанного слоя. В частности, если сечение выработки расположено так, что мелкодробленый слой обрушенных пород находится в боках выработки, преобладают сближения боков, что отчетливо отражено на снимке рис. 17.



Рис. 17. Характер деформирования сечения вентиляционного ходка, расположенного в обрушенных и уплотненных породах

В табл. 2 приведены фактические и расчетные величины смещений пород кровли, боков и почвы выработки, которые равны соответственно 350 мм, 2500 мм, 350 мм и 339 мм, 2423 мм, 394 мм. Расхождения сравниваемых величин не превысило 11%, что свидетельствует об удовлетворительной схожести расчетных и экспериментальных данных.

Таким образом, выполненные исследования показали, что концепция расчета смещений на контуре выработки вне зоны воздействия очистных работ, основанная на подходе, когда сначала определяется потеря сечения как функция критерия устойчивости, а затем полученная величина разделяется на отдельные компоненты обратно пропорционально прочности пород кровли, почвы и боков подтвердилась экспериментально.

Выводы

1. Экспериментально впервые показано, что работу горного давления, расходуемую на разрушение вмещающих подготовительную выработку пород можно считать пропорциональной площади уменьшения выработки в результате смещения разрушенных пород в полость выработки.

2. Разработан новый подход к расчету смещений на контуре подготовительной выработки, отличающийся тем, что вначале определяют потерю площади сечения выработки за максимальный срок ее службы как функцию критерия устойчивости, а затем разбирают полученное уменьшение площади на компоненты смещений в кровле, боках и почве. Экспериментально установлены эмпирические зависимости и коэффициенты для вычленения соответствующих компонент смещений из площади уменьшения сечения.

3. Показано, что приведенную прочность пород кровли, боков и почвы необходимо рассчитывать с учетом расстояния каждого породного слоя относительно контура сечения выработки, что существенно повышает точность приведения прочности и достоверность расчетов смещений на контуре.

4. Выполнено сравнение расчетных данных с экспериментальными величинами смещений на контуре выработок в разных горно-геологических условиях. Показано, что расчетные данные совпадают с экспериментальными в пределах 30%, что вполне удовлетворяет практику проектирования и геомеханический аудит горных работ.

5. Предложен и обоснован новый принцип учета произвольного числа изменений горнотехнической и горно-геологической ситуации в окрестности эксплуатируемой выработки, который можно назвать, как принцип эквивалентного геомеханического состояния. Указанный подход дает возможность состыковать кривые конвергенции одной и той же выработки, попадающей в течение срока службы в разные геомеханические ситуации, при которых критерий устойчивости вмещающего массива изменяется. Предложенный принцип проверен на физических моделях и с помощью шахтных инструментальных наблюдений. Сходимость расчетных данных с экспериментальными находится в пределах 29% при доверительной вероятности 90%, что достаточно для практики проектирования.

1. Назимко В.В. Анализ развития зоны разрушения вокруг полевой выработки при влиянии очистных работ / В.В. Назимко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых». – 1989. - № 2. - С. 45-48.
2. Назимко В.В. Алгоритм расчета смещений на контуре подготовительной выработки / В.В. Назимко, С.В. Кузюра // Известия горного института. – 1995. - №1. - С. 47-49.
3. Назимко В.В. Динамическая модель развития зоны разрушений вокруг горной выработки. / В.В. Назимко, В.В. Лаптеев, С.В. Напрасников // Физика и техника высоких давлений. – 1998. - том. 8. - №3. - С. 137-144.

4. *Пригожин И.* Введение в термодинамику необратимых процессов / Монография – М.: «Изд-во иностранной литературы», 1960. – 160 с.
5. *Назимко В.В.* Новая концепция к расчету смещений на контуре подземной горной выработки в поле переменного горного давления / В.В. Назимко, В.С. Захаров // Физика и техника высоких давлений. – 2002. – том 11, №3. – С. 86-93.
6. *Суворов Н.Я.* Влияние крепости горных пород на устойчивость капитальных выработок, закрепленных мелкокоразмерными тубингами / Н.Я. Суворов, М.И. Чугай // Известия Вузов. Горный журнал. - 1970. - №6. - С. 32-34.
7. *Назимко В.В.* Фрактальное исследование анизотропии пород / В.В. Назимко, В.С. Захаров, С.В. Напрасников, С.Н. Александров, Е.Е. Гарковенко // Физика и техника высоких давлений. – 2001. – том 11, №2. – С. 125-130.
8. *Nazimko V.V.* Investigation of a roof fall as an irreversible process of rock mass self-organization / V.V. Nazimko, V.P. Sazhnev, S.S. Peng, V.S. Zacharov, V.S. Gryaznov // Проблемы горного давления. – 2001. – №5. – С. 48–71.
9. *Александров С.М.* Аналіз закономірностей розвитку зон руйнування навколо підготовчої виробки при впливі очисних робіт з урахуванням ефекту саморозклинювання порід / С.М. Александров, В.П. Сажнев, М.І. Красько, С.В. Напрасников // Проблеми гірського тиску. – Донецьк: “СПЕКТР”. – 2001. – №6. – С. 48–72.
10. *Александров С.Н.* Исследование в лабораторных условиях поведения вмещающих подготовительную выработку пород на образцах в режиме саморасклинивания / С.Н. Александров // Проблеми гірського тиску. – Донецьк: “Норд-комп’ютер”. – 2002. – №7. – С. 41–50.
11. *Шашенко А.Н.* Критерий устойчивости в задаче о пучении пород почвы подземной выработки / А.Н. Шашенко, А.Н. Роенко, М.Е. Каганов // Изв. вузов. Горный журнал. - 1994. - №1. - С. 31-33.
12. *Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР.* – Л.: ВНИМИ, 1985. –222 с.
13. *Кириченко В.Я.* Геолого-геомеханическое обоснование параметров способов повышения устойчивости подготовительных выработок на глубоких горизонтах шахт Западного Донбасса. Дисс. ... канд. техн. наук: 05.15.02, 04.00.11. – ДГИ. Днепропетровск. – 256 с.
14. *Назимко В.В.* Геомеханические основы устойчивости подготавливающих выработок в зонах разгрузки при воздействии очистных работ: Дисс. ... докт. техн. наук.05.15.02, 05.15.11. – Днепропетровск, 1990. – 364 с.

О.В. Гладка, В.В. Назимко

ОБҐРУНТУВАННЯ ГЕОМЕХАНІЧНОЇ КОНЦЕПЦІЇ ОБЛІКУ ВЗАЄМОВПЛИВУ ПОКРІВЛІ, БОКІВ І ПІДОШВИ НА ФОРМУВАННЯ ЗМІЩЕНЬ НА КОНТУРІ ВИРОБКИ

Розроблений новий підхід до розрахунку зміщень на контурі підготовчої виробки, запропонований й обґрунтований новий принцип обліку довільного числа змін гірничотехнічної та гірничо-геологічної ситуації в околиці експлуатаційної виробки.

Виконано порівняння розрахункових даних з експериментальними величинами зміщень на контурі виробок в різних гірничо-геологічних умовах.

Ключові слова: породи, руйнування порід, фізичне моделювання, зміщення, виробка, стійкість.

E. Gladkaya, V. Nazimko

SUBSTANTIATION OF THE GEOMECHANICAL CONCEPT OF THE ACCOUNT OF MUTUAL INFLUENCE OF ROOF OF THE MINE WORKING, WALL AND FLOOR INFLUENCE ON THE FORMATION OF DISPLACEMENTS ON THE CONTOUR MINE WORKING

Developed a new approach of the calculation of the displacements on the contour of preparatory mine working, proposed and justified a new principle of accounting for arbitrary number of changes in mining and geological situation in the vicinity of the operated mine working. Compares the calculated data with experimental values of the displacements on the contour of the mine working in various mining and geological conditions.

Keywords: rocks, fracture of rocks, physical modeling, displacements, excavation, stability.