

$$D = \frac{I}{\frac{\Delta y}{2K_{ij} \left(h_4 - \eta_{ij} + \frac{I}{2} \right)} + \frac{\Delta y}{2K_{ij+1} \left(h_4 - \eta_{ij} + \frac{I}{2} \right)}};$$

$$h_3 = 0,5 \cdot (H_{ij} + H_{i+1, j})$$

$$h_4 = 0,5 \cdot (H_{ij} + H_{ij+1})$$

На каждом шаге расщепления реализовывалась итерационная процедура. Положение источников загрязнения, скважин и т.п. задавалось с помощью маркеров [2]. На базе рассмотренных моделей создан проблемно-ориентированный комплекс программ "FLOW", позволяющий методом вычислительного эксперимента прогнозировать эволюцию зон загрязнения вблизи техногенных источников загрязнения и изменение этих зон при использовании различных вариантах гидравлической защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Бэр Я., Заславский Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. -М.: Мир, 1971.-452 с.
2. Згуровский М.З., Скапецкий В.В., Хруш В.К., Беляев Н.Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. -Киев.:Наукова думка.-1997.-368 с.
3. Самарский А.А. Теория разностных систем /2-е изд., испр.-М.:Наука.-1983.-616 с.

УДК 622.268.13:622.831

В.В. Назимко, В.С. Захаров

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНВЕРГЕНЦИИ НА КОНТУРЕ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ, ОСНОВАННАЯ НА ПРИНЦИПЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ

Запропонований новий підхід при розрахунку змінь на контурі підготовчої виробки при довільній зміні геомеханічної ситуації, в якій підтримується ця виробка.

Анализ реальных горнотехнических ситуаций на планах горных работ десятков шахт шести угольных объединений и компаний показал, что ситуация, когда подготовительная выработка эксплуатируется вне зоны активного воздействия очистных работ, наблюдается в лучшем случае для 10-15% от всей протяженности подготовительных выработок, включая выработки главного направления. Проблема с поддержанием выработок в зонах активного влияния очистных работ особенно обострилась последние годы, когда почти на всех угольных шахтах Украины наступила ситуация, при которой по основным производительным пластам горные работы получили развитие на 60-70% и более. Несмотря на большие размеры охранных целиков основные подготовительные выработки повсеместно испытывают активное влияние смежных очистных работ, часто по нескольким сближенным пластам. При этом весьма важно и существенно, что геомеханическая ситуация, в которой находится выработка, несколько раз меняется в течение срока ее службы. Например вокруг магистрального штрека может поэтапно формироваться охранный угольный целик по мере отработки смежных лав. При этом наблюдается весьма характерное ступенчатое увеличение горного давления в окрестности выработки после того, как це-

лик оформляется с одной стороны (например со стороны восстания), затем с противоположной, затем отработка новых примыкающих к ранее выработанному пространству лав приводит к многократной активизации горного давления на ранее сформированном участке целика. Эта весьма типичная ситуация, которая сопровождается ступенчатым увеличением горного давления в окрестности поддерживаемой выработки.

Может быть и обратный случай, когда происходит уменьшение уровня горного давления. Это происходит при региональной или локальной разгрузке выработки, например после надработки, разгрузки щелями, буровыми скважинами и т.п. В практике развития горных работ встречаются ситуации, когда горное давление может как увеличиваться, так и уменьшаться в окрестности одного и того же участка горной выработки.

Таким образом случай, когда выработка проходится в одних горнотехнических условиях, а затем попадает в другие, причем последние неоднократно изменяются, является массовым и типичным.

Анализ известных методик расчета смещений на контуре подготовительных выработок показал, что не существует методик расчета смещений, которые бы могли учесть такую часто встречающуюся ситуацию. Если не учитывать методику расчета смещений при последующей надработке полевых выработок, которая встречается в лучшем случае в 5-10% всех случаев, все остальные методики предусматривают поддержание выработки в неизменных горнотехнических условиях. Однако и методика расчета смещений при последующей надработке не предусматривает учета дальнейшего изменения геомеханической ситуации.

Еще хуже эта проблема становится в свете того, что вокруг выработки часто меняется не только горнотехническая, но и горно-геологическая ситуация. Это происходит при обводнении (или высыхании) выработки спустя некоторый период ее эксплуатации. В результате обводнения и размокания породы могут существенно, иногда в несколько раз снизить свою прочность. Однако все известные методики расчета смещений предусматривают только такой случай, когда выработка поддерживается в породах постоянной прочности. Следует упомянуть также такие случаи, когда вмещающие выработку породы спустя некоторый период ее эксплуатации укрепляют путем нагнетания вяжущих или усиливают стационарную крепь анкерной, стойками усиления и т.д.

Наконец шахтные инструментальные наблюдения, выполненные как автором, так и другими исследователями свидетельствуют о том, что после перекрепления смещения в выработке интенсифицируются. Это тоже соответствует изменению горнотехнической ситуации, в которой эксплуатируется выработка. Вместе с тем не существует методик учета такого эффекта.

Во всех указанных случаях просто непонятно, как рассчитывать смещения известными методами. Если не учитывать ранее накопленные смещения и полагать, что выработка начинает заново существовать после изменения горнотехнической или горно-геологической ситуации, тогда смещения будут завышены (иногда более чем в 2 раза) из-за повторного учета смещений на первоначальную усадку. Таким образом существует острая проблема учета произволь-

ного числа изменений горнотехнической и горно-геологической ситуаций в процессе эксплуатации выработок. Актуальность этой проблемы обусловлена тем, что свыше 80% от общей протяженности выработок попадают в такую ситуацию неоднократно. Это приводит часто к катастрофическим смещениям на контуре выработок, что ведет к масштабным экономическим убыткам.

В данной статье описан новый подход к расчету смещений на контуре подготовительной выработки, основанный на принципе эквивалентной геомеханической ситуации, элементы которого освещены в [1]. Подготовительная выработка рассматривалась как открытая термодинамическая система, пропускающая через себя поток энергии горного давления, преобразуя ее в низкокачественную работу разрушения вмещающих выработку пород и перемещения их в полость выработки. Этот принцип в частности означает, что энергия необратимо рассеивается, причинно-следственная связь между факторами, вызвавшими потерю устойчивости пород и результатами этой потери теряется, как бы забывается. Говоря в терминах горного дела, система крепь подготовительной выработки-окружающие породы может перейти в определенное необратимое состояние (состояние, при котором зона разрушений увеличилась в размерах) множеством возможных путей и способов. Однако после этого сам путь теряет значение, он как бы забывается указанной системой. Другими словами выработка может потерять скажем 40% своего сечения в результате активного воздействия очистных работ в течение 2 месяцев и точно в такое состояние она может перейти в течение 6 лет в силу процессов длительной потери устойчивости под действием ползучести и других реологических процессов.

Далее можно рассматривать выработку с достигнутого состояния и не учитывать тот путь, которым она подошла к нему. Для этой цели применяется принцип эквивалентного времени эксплуатации выработки. Говоря проще выработка может сдеформировать свое сечение на 40% за 2 месяца под активным действием горного давления величиной 60МПа, или в течение 5 лет под действием геостатического уровня давления 20МПа. На рис. 1 показана графическая интерпретация принципа эквивалентного времени, которая поясняется на примере уменьшения сечения выработки в результате изменяющейся горнотехнической ситуации. Предположим выработка была пройдена на глубине 800м в породах средней устойчивости вне зоны влияния очистных работ. После проходки выработки произошла усадка сечения, затем наступило равновесие в системе крепь-окружающие породы и смещения на контуре выработки стабилизировались. В результате указанных процессов сечение выработки уменьшилось на 16%, что отражено кривой 1. Такую кривую можно построить на основании известной зависимости согласно существующим методикам.

Допустим, что после 9,11 года (9 лет, 1 месяц и 10 дней) эксплуатации выработки возникла ситуация, когда вокруг поддерживаемой выработки сформировался целик после отработки смежных лав и уровень горного давления увеличился, скажем, в два раза. Если бы выработка была пройдена сразу на глубине, эквивалентной новому уровню горного давления, смещения на ее контуре описывались бы кривой 2, которая начиналась в начале координат, то есть при времени равном 0. Сдвигая кривую 2 вправо по шкале времени до пересечения

ее с кривой 1 в абсциссе 9,11 года, получаем стыковку кривых конвергенции, которая отражает активизацию смещений на контуре в результате воздействия смежных очистных работ. В результате такой операции кривая 2 начинается в абсциссе 8,2 года. Это значит, что смещения, накопившиеся в течение 9,11 года при уровне горного давления, соответствующему глубине 800м, могут произойти при новом повышенном уровне давления за период $9,11-8,2=0,91$ года. Это время и следует назвать эквивалентным.

Указанный подход дает богатые возможности для моделирования поведе-

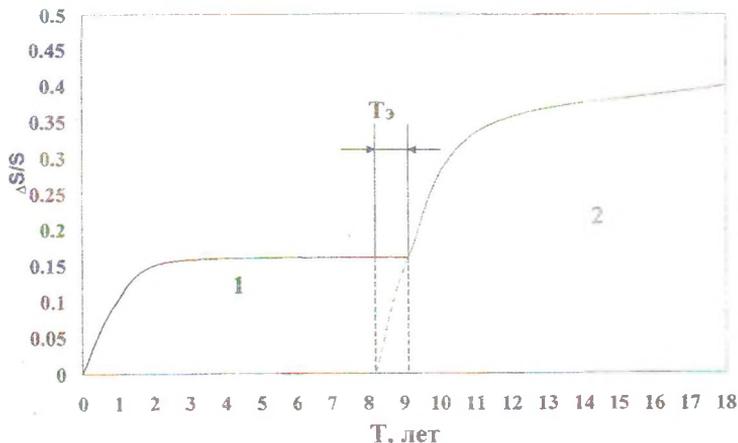


Рис. 1. График, иллюстрирующий принцип эквивалентного времени эксплуатации выработки в разных геомеханических ситуациях, характеризуемых приростом величины критерия устойчивости

ния подготовительных выработок при произвольном числе изменения горно-технической и горно-геологической ситуации. Однако тщательный анализ показал, что не все ситуации могут быть охвачены принципом эквивалентного времени. Указанный принцип годится лишь в тех случаях, когда критерий устойчивости выработки, определяемый как отношение прочности вмещающих пород к действующему уровню горного давления уменьшается. В противном случае нужно применять какой-то другой подход. Объясняется это просто. Если перейти на новую кривую смещений, соответствующую более высокому критерию устойчивости вмещающих пород, мы не сможем достичь накопленной на текущий момент конвергенции за разумный период времени. Это происходит потому, что новая кривая конвергенции при большей величине критерия устойчивости будет располагаться просто под той кривой, которая отражает текущие смещения и они никогда не пересекутся.

Развивая подход, описанный в [1], в данной работе предложено использовать для описания ситуаций с повышением критерия устойчивости применить принцип

эквивалентной прочности вмещающих пород или принцип эквивалентного уровня горного давления. Новый подход поясняется графиками на рис. 2.

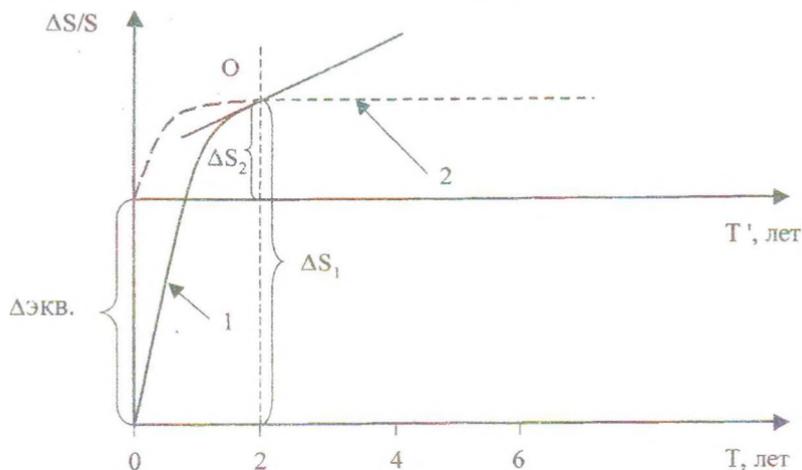


Рис. 2. Иллюстрация принципа эквивалентного напряжения или прочности вмещающих пород при эксплуатации выработки в разных геомеханических ситуациях, характеризующимся падением величины критерия устойчивости

Пусть выработка эксплуатируется при уровне горного давления σ_1 и прочности вмещающих пород R_1 . Критерий устойчивости пород равен σ_1/R_1 . В течение 2 лет ее сечение уменьшится на величину ΔS_1 . Этот процесс описывается кривой 1. Скорость конвергенции весьма высока и отражена касательной к кривой в точке O. Предположим, что для снижения скорости конвергенции и повышения устойчивости выработки было принято решение об упрочнении вмещающих пород путем нагнетания вяжущих или установки дополнительной анкерной усиливающей крепи. В результате выполнения указанных мероприятий прочность вмещающих пород увеличилась до $R_2 > R_1$, что привело к уменьшению критерия устойчивости, скажем в 1,5 раза. При такой величине критерия график конвергенции описывался бы кривой 2 относительно новой оси времени T' , а ее величина составила бы только ΔS_2 . Поэтому для сшивания кривых конвергенции 1 и 2 мы должны поднять кривую вверх по оси $\Delta S/S$ на высоту $\Delta S_1 - \Delta S_2$.

Точно такой же подход применяется и в случае применения локальной разгрузки выработки, когда уровень горного давления вокруг нее падает до $\sigma_2 < \sigma_1$, что приводит к уменьшению критерия устойчивости. В этом кроется универсальность подхода, основанного на принципе эквивалентной прочности или принципа эквивалентного уровня горного давления.

Заметим, что принцип эквивалентного уровня горного давления подходит даже для описания такой сложной ситуации как последующая надработка полевой или групповой выработки. Для этого при переходе к новой системе коор-

динат учитывается не только разница в величинах конвергенции при старом и новом (меньшем) уровне горного давления, но и разовый прирост конвергенции в зоне динамического опорного давления, а также в зоне перехода в область региональной разгрузки. Авторами установлено, что чем больше перепад горного давления до и после надрботки, тем больше величина прироста разовой конвергенции $\Delta_{надр.}$. Другими словами перенос системы координат по оси конвергенции осуществляется на величину $\Delta S_1 + \Delta_{надр.} - \Delta S_2$. Указанный прием иллюстрируется на рис. 3.

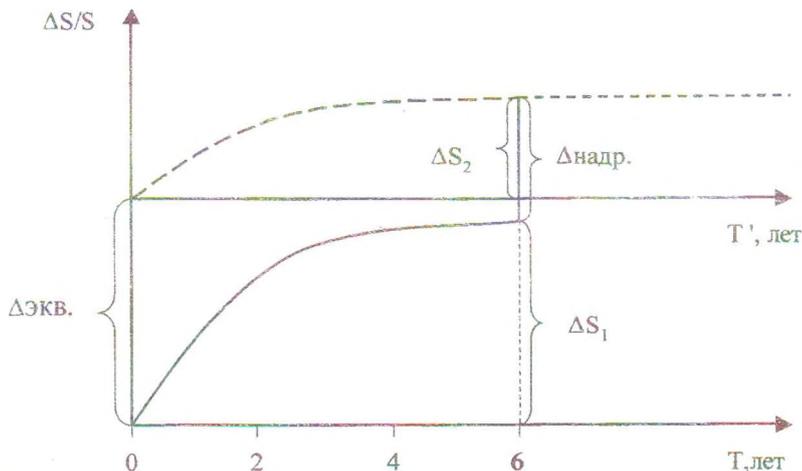


Рис 3. Применение принципа эквивалентных напряжений для расчета смещений на контуре выработки в процессе ее последующей надрботки

Таким образом разработан принцип учета произвольного числа изменений горнотехнической и горно-геологической ситуации в окрестности эксплуатируемой выработки, который можно назвать, как принцип эквивалентного геомеханического состояния. Этот принцип следует сформулировать следующим образом. При изменении геомеханической ситуации вокруг эксплуатируемой подготовительной выработки следует конвергенцию на ее контуре рассчитывать как функцию нового критерия устойчивости, причем если величина критерия устойчивости пород увеличивается, кривую конвергенции следует сдвигать вправо на эквивалентное время вдоль оси времени, а если уменьшается, кривую конвергенции следует поднимать вдоль оси смещений на величину эквивалентной прочности вмещающих пород или эквивалентного уровня горного давления.

Проверка предложенного принципа эквивалентного геомеханического состояния подготовительной выработки осуществлялась на моделях из эквивалентных материалов и в шахтных условиях. При этом на физической модели имитировалось ступенчатое увеличение напряжений, приложенных к верхней границе модели. В шахтных условиях был отобран такой экспериментальный

участок, где за относительно короткое время в окрестности поддерживаемой выработки произошло дважды ступенчатое увеличение горного давления.

Физическая модель использовалась для имитации последовательного увеличения горного давления в окрестности одиночной подготовительной выработки. В горизонтальной напряженной слоистой толще была пройдена выработка арочного сечения, в которой установлена податливая крепь. Площадь сечения выработки составляла 15м². В пересчете на натуру прочность вмещающих пород на одноосное сжатие составляла около 50МПа. Начальная глубина заложения выработки равнялась 500м. Давление на границе модели увеличивалось ступенями в 1,5; 2; 2,5 и 3 раза. При этом фиксировалось уменьшение площади сечения выработки по мере стабилизации смещений на ее контуре после каждой пригрузки верхней границы модели. В таблице 1 приведены результаты расчетных и измеренных величин потери площади сечения выработки, а также смещений на ее контуре.

Таблица 1 - Сравнение фактически измеренных смещений на физической модели с расчетными величинами

Величина пригрузки	Уменьшение площади сечения, %			Смещение кровли, мм			Пучение почвы, мм			Смещение боков, мм		
	Измеренное	Расчетное	Разница, %	Измеренное	Расчетное	Разница, %	Измеренное	Расчетное	Разница, %	Измеренное	Расчетное	Разница, %
1	0.073	0.05	31.6	92.14	100	-8.52	120.6	100	17.1	82.27	100	-21.5
1,5	0.157	0.2	-27.3	197.9	250	-26.3	259.1	300	-15.7	176.7	250	-41.4
2.0	0.261	0.25	4.5	330.0	300	9.1	432.2	400	7.4	294.7	300	-1.7
2,5	0.377	0.41	-8.4	476.1	500	-5.0	623.5	650	-4.2	425.1	500	-17.6
3,0	0.495	0.51	-3.0	623.8	700	-12.2	816.9	900	-10.1	557.0	600	-7.7

Как видно из таблицы, отклонения расчетных величин смещений от измеренных в модели имеют разные знаки и не превышают 27,3%. Лишь в двух точках отклонение составляет 31,6–41,4%. Отметим однако, что эти точки могут не приниматься во внимание, поскольку при предельно малых величинах смещений (0,05 потери площади сечения) точность их измерения невелика. Это значит, что расхождение обусловлено не расхождением поведения модели и расчетной зависимости, а точностью измерения весьма малых величин.

Шахтные инструментальные наблюдения проведенные в экспериментальном участке восточного полевого откаточного штрека гор. 824м шахты Южно-донбасская №3 ГХК Донуголь подтвердили высокую достоверность предсказания конвергенции на контуре выработки по предложенной авторами методике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.В.Назимко, С.В.Кузьяра. Алгоритм расчета смещений на контуре подготовительной выработки // Известия горного института. - Донецк ДонГТУ. - 1995. - №1. - С. 47-49.
2. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР. - Л.:ВНИИМ. 1985 -222 с.