

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ПЛАНИРОВКЕ ГОРНЫХ РАБОТ В СВИТЕ СБЛИЖЕННЫХ ПОЛОГИХ ПЛАСТОВ

Розроблено геомеханічну систему, що дозволяє оцінити стан підготовчих виробок та прогнозувати зміщення на їх контурі з урахуванням незворотності процесів руйнування оточуючих порід та довільної зміни гірничотехнічних обставин навколо виробки.

GEOMECHANIC SYSTEM TO EVALUATE THE STATE OF ROADWAYS DUE TO ARBITRARY PANELS LAYOUT AT ADJACENT COAL SEAMS

Geomechanic system has been developed to assess the stability of the underground roadways considering irreversible processes of surrounding rock failure and arbitrary panels layout in adjacent coal seams.

Одним из наиболее неблагоприятных проявлений горного давления является смещение пород вокруг подземных выработок, которое часто превышает допустимые величины, что приводит к снижению надежности эксплуатации выработки, а также уменьшению уровня безопасности подземных работ. Фактические смещения на контуре подземных выработок весьма часто превышают расчетные в 1,5-2 раза и более. Это объясняется несовершенством существующих методик расчета. Из-за не учета ряда существенных факторов фактические размеры сечений основных выработок на момент сдачи шахты в эксплуатацию меньше на 30-45% проектных величин. Такая ситуация приводит к непредвиденным сложностям в работе шахты, неудовлетворительным условиям вентиляции и транспорта, что в конечном итоге снижает безопасность работ и препятствует обеспечению плановой добычи. Указанная проблема является весьма актуальной, поскольку в целом по угольной отрасли неудовлетворительное состояние подготовительных выработок наблюдается на общей их протяженности 25-30%, а на глубоких шахтах свыше 1000 м – 50%. Поэтому весьма актуальной задачей остается выполнение достоверного прогноза смещений с учетом реальных условий эксплуатации выработки.

Существующие методики оценки состояния подготовительных выработок несовершенны, так как не могут учесть изменения реакции выработки при изменении геомеханического состояния: прироста или уменьшения уровня горного давления, изменения прочности вмещающих пород, отпора крепи, действия локальной разгрузки и т.п. Расчет смещений кровли, почвы и боков выработки ведется без учета взаимного влияния прочности этих составляющих, что приводит к погрешностям до 70%. Существующие методы расчета горного давления применимы только для правильной регулярной формы выработанных пространств и не учитывают такие необратимые геомеханические процессы, как эффект очередности отработки смежных запасов на перераспределение горного давления. На сегодня нет удобных и дружелюбных для пользователя-

технолога систем оперативной оценки объемов ремонтных работ, их сроков, места и затрат на проведение.

Исходя из этого были решены следующие задачи.

Обоснование новой методики расчета смещений на контуре выработки с учетом взаимовлияния кровли, почвы и боков выполнено с помощью физического моделирования и шахтных инструментальных наблюдений [1-9].

Подземную выработку можно рассматривать как открытую термодинамическую систему, которая пропускает через себя поток энергии горного давления. Интенсивность указанного потока тем больше, чем выше уровень горного давления и чем меньше средняя прочность вмещающих выработку пород. С достаточной для практики точностью интенсивность потока энергии горного давления можно положить пропорциональной критерию σ/R (где R – средневзвешенная прочность вмещающих пород; σ - уровень действующего горного давления). 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. Применяв 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 прочности должна зависеть от прочности пород боков и почвы, что не учитывается существующими методиками.

На моделях из эквивалентных материалов экспериментально подтверждена теоретическая предпосылка о существенном взаимовлиянии пород кровли, боков и почвы на величину их смещений.

На основании данного вывода предлагается 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*. Одним из важнейших факторов процесса смещения пород в полость выработки является их прочность. Средняя прочность вмещающих выработку пород должна быть собрана из средневзвешенных пород кровли, почвы и боков выработки. Приведение этих трех величин осуществляется на основе среднегеометрического. 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 в отдельности решено было проводить согласно формуле, предложенной М.И. Чугаем:

$$R = (\sum \{R_i h_i / y_i\} / [\sum h_i / y_i]), \quad (2)$$

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

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 известных методик существенно повышает точность расчетов смещений на контуре выработки.

С помощью экспериментов на физических моделях получен конкретный вид зависимости (1) и определены величины эмпирических коэффициентов. 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, тем более, перекрывает практически все возможные его величины, встречающиеся в практике горного дела. Диапазон величин площади поперечных сечений моделируемых выработок от 13 м² до 18 м² тоже 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 квершлагного типа.

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, что в большинстве случаев соответствует практике эксплуатации выработок.

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. 1 приведен вид данной зависимости совместно с нанесенными экспериментальными точками. Видно, что характер зависимости сложный, а сама кривая имеет перегиб в диапазоне величин критерия устойчивости 0,5-0,7, что согласно существующей классификации 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 несущественно 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, установленным проф. Александровым С.Н., который неизбежно проявляет себя особенно при больших смещениях пород в полость выработки с одной стороны, а также эффектом саморазгрузки пород вблизи выработки с другой.

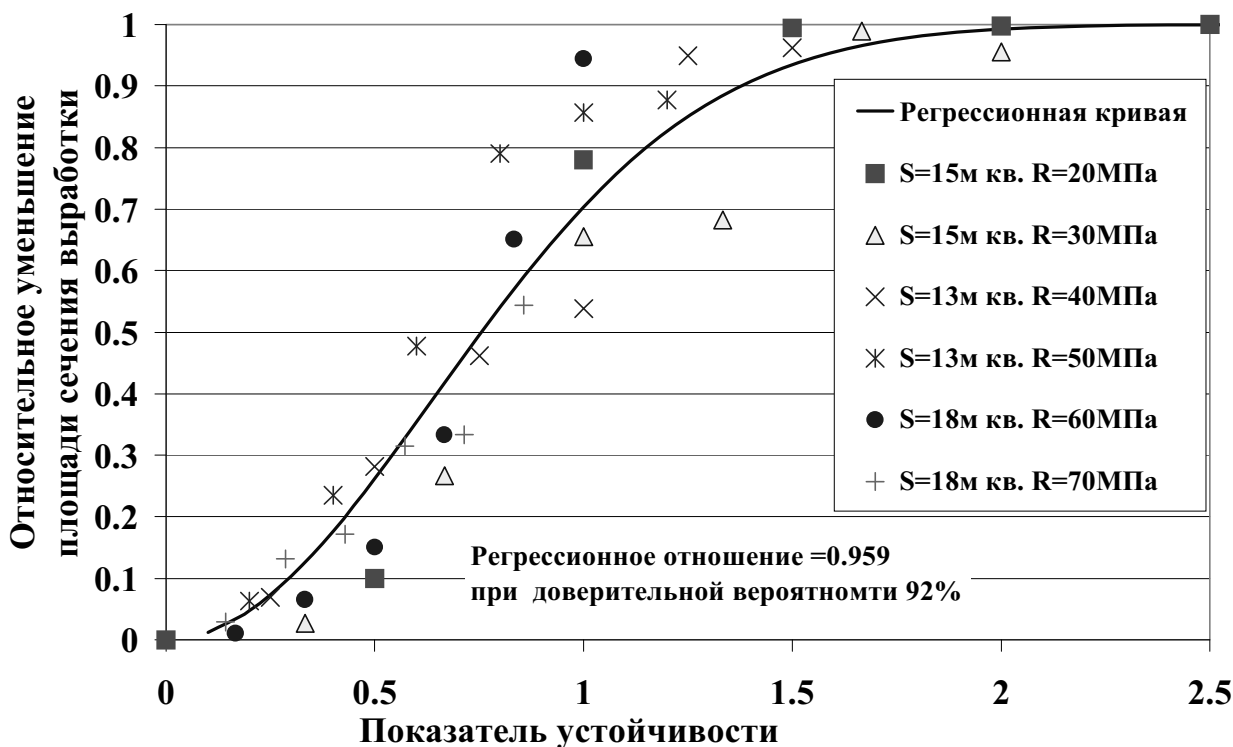


Рис. 1 - Зависимость относительного уменьшения площади сечения от показателя устойчивости

Следующим усовершенствованием методики расчета смещений на контуре выработки является новый подход при вычислении отдельных компонент смещений. Для этого после расчета изменения площади сечения на текущий момент времени осуществляется разбор смещений на компоненты по зависимости:

$$\Delta U_{к,н,б} = c_{к,н,б} \Delta F R / R_{к,н,б} \quad , \quad (4)$$

где $\Delta U_{к,н,б}$ – смещения кровли, почвы и боков соответственно; $c_{к,н,б}$ – эмпирические коэффициенты, зависящие от формы сечения выработки; $R_{к,н,б}$ – средняя прочность кровли, почвы и боков, вычисленная по формуле (2).

Идея последней формулы основана на результатах термодинамического анализа смещений пород в полость выработки и 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 $c_{к,н,б}$ получены в данной работе для арочной формы сечения выработок, которая применяется в практике горных работ в подавляющем числе случаев. Обработка экспериментальных данных показала, что $c_{к,н,б}$ для арочной формы равны соответственно 84, 110 и 75. При этом умень-

шение площади сечения вводится в формулу в метрах квадратных, а результат в виде компонент смещений получаем в миллиметрах, что удобно при расчетах.

Достоверность полученных зависимостей проверялась путем сравнения расчетных и экспериментальных данных, которые не учитывались при установлении регрессионных зависимостей и величин эмпирических коэффициентов.

Проверка достоверности установленной зависимости осуществлялась по результатам инструментальных наблюдений за конвергенцией в полевых выработках в условиях шахт им. Бажанова, им. Поченкова ГХК «Макеевуголь», им. Героев Космоса ГХК «Павлоградуголь», им. Абакумова ГХК «Донуголь». Все экспериментальные 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.

Для обеспечения достоверности результатов натуральных измерений компонент смещений производился обмер 3-5 сечений выработки. Отклонение расчетных величин от фактических составило +34 мм – 168 мм, или +14 – 29%. Фактически измеренные компоненты смещения не существенно отличаются от расчетных, что свидетельствует о достоверности установленной зависимости.

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 средневзвешенной прочности пород кровли, почвы и боков подтвердилась экспериментально.

Обоснование нового принципа расчета смещений на контуре выработки для учета произвольного изменения геомеханической обстановки осуществлялось на основе термодинамики необратимых процессов и проверялось по данным шахтных инструментальных наблюдений [10-13].

Подготовительная выработка рассматривалась как открытая термодинамическая система, пропускающая через себя поток энергии горного давления, преобразуя ее в работу разрушения вмещающих выработку пород и перемещения их в полость выработки. Это 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 «систему выработка–вмещающие породы» с достигнутого состояния и не учитывать тот путь, которым она подошла к нему.

Указанный механизм смещений на контуре подготовительной выработки является типичным Марковским процессом. Эта закономерность является весьма важной при обосновании принципа расчета смещений на контуре выработки в случаях, когда геомеханическая ситуация вокруг нее время от времени меняется, что как правило имеет место в практике эксплуатации и поддержания горных выработок. Весьма типична ситуация, когда в окрестности одной и той же выработки уровень горного давления увеличивается по мере оконтуривания охранного целика, или уменьшается в силу локальной разгрузки, надработки; прочность вмещающих пород уменьшается из-за размокания или увеличивается после упрочнения нагнетанием скрепляющих веществ, анкерования и т.п. При этом меняются исходные факторы, определяющие величину смещений. Существующие методики расчета смещений на контуре выработки такие ситуации просто не учитывают.

Установленные закономерности смещений пород на контуре подготовительной выработки позволили обосновать новый подход к их расчету.

На рис. 2 показана графическая интерпретация принципа эквивалентного времени, которая поясняется на примере уменьшения сечения выработки в результате изменяющейся горнотехнической ситуации. Предположим, выработка была пройдена на глубине 800 м 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 применения формулы (3) или другой 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 800 м, 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 поведения подготовительных выработок при произвольном числе изменения горнотехнической и горно-геологической ситуации. Указанный принцип годится лишь в тех случаях, когда величина критерия устойчивости выработки, определяемого как отношение действующего уровня горного давления к прочности вмещающих пород к увеличивается.

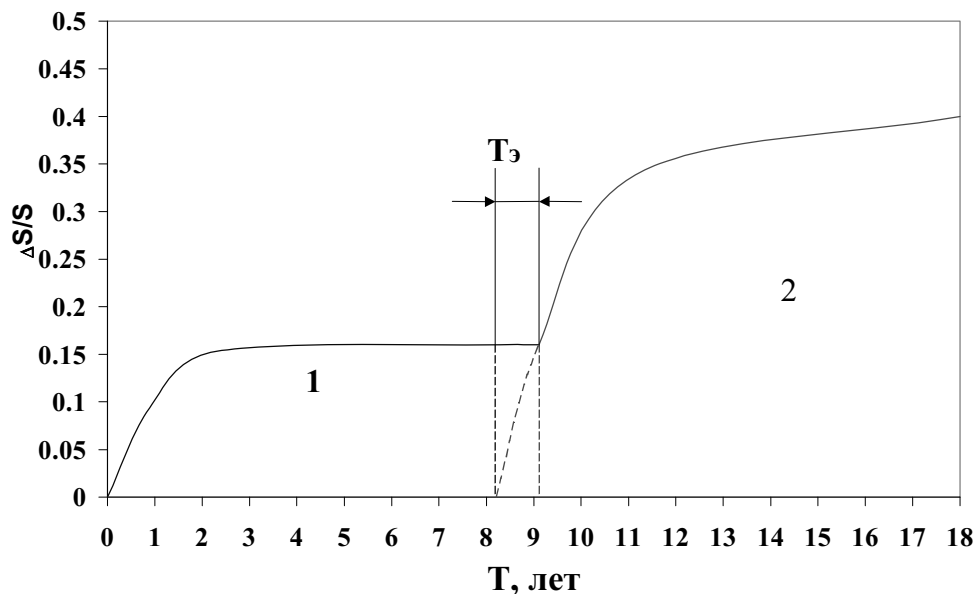


Рис. 2 - График, иллюстрирующий принцип эквивалентного времени эксплуатации выработки в разных геомеханических ситуациях, характеризуемых приростом величины критерия устойчивости

Развивая подход эквивалентного принципа, в данной работе предложено использовать для описания ситуаций с понижением величины критерия устойчивости применить **принцип эквивалентной прочности вмещающих пород или принцип эквивалентного уровня горного давления**. Новый подход поясняется графиком на рис. 3. 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 поле-

вой или групповой выработки. Для этого при переходе к новой системе координат 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, и в зоне перехода в область региональной разгрузки. В данной работе установлено, что чем больше перепад горного давления до и после наработки, тем больше величина прироста разовой конвергенции $\Delta_{\text{надр.}}$. Другими словами перенос системы координат по оси конвергенции осуществляется на величину $\Delta S_1 + \Delta_{\text{надр.}} - \Delta S_2$. Указанный прием иллюстрируется на рис. 4.

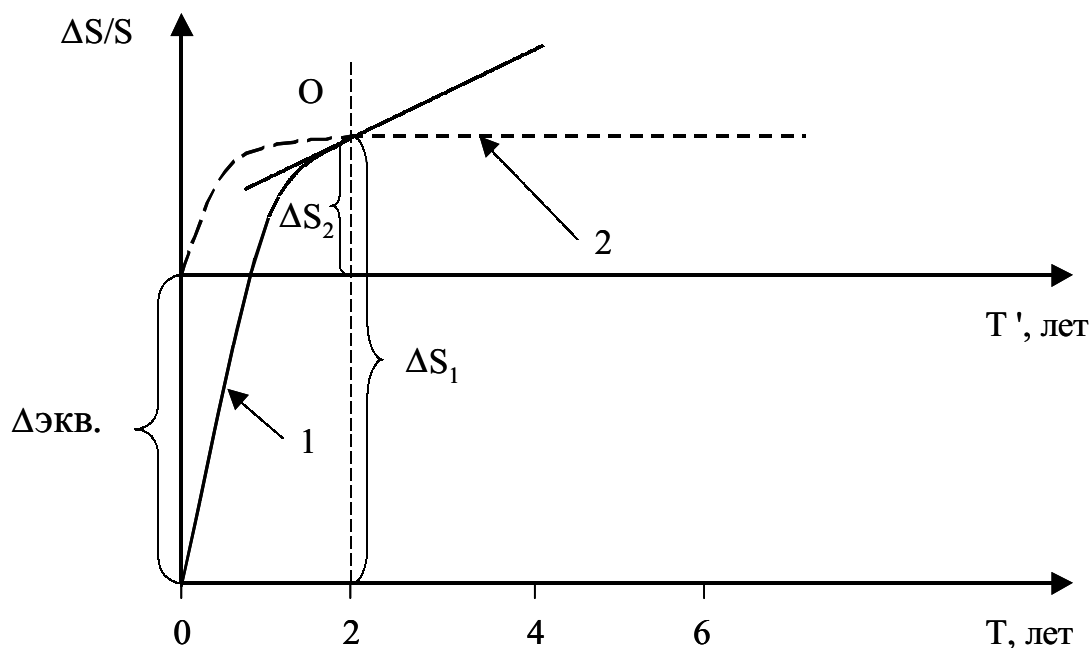


Рис. 3 - График, иллюстрирующий принцип эквивалентного напряжения или прочности вмещающих пород при эксплуатации выработки в разных геомеханических ситуациях, характеризующихся падением величины критерия устойчивости

Таким образом, автором предложен 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.**

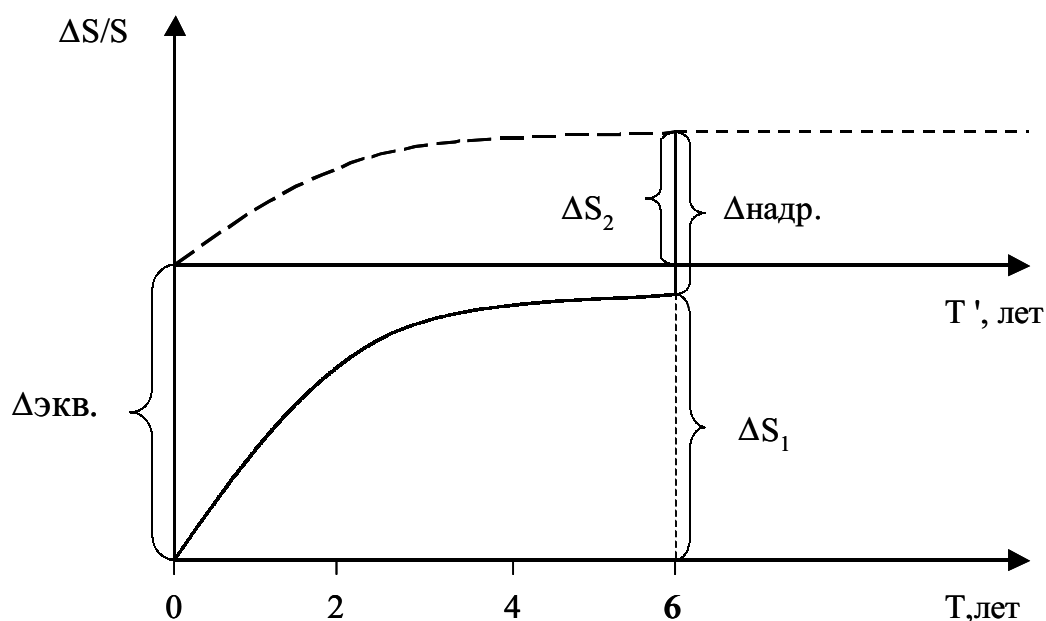


Рис. 4 - Применение принципа эквивалентных напряжений для расчета смещений на контуре выработки в процессе ее последующей наработки

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, причем данные этой модели не использовались при обработке результатов для определения конкретного вида зависимости смещений от исходных факторов. В шахтных условиях был отобран такой экспериментальный участок, где за относительно короткое время в окрестности поддерживаемой выработки произошло дважды ступенчатое увеличение горного давления.

Отдельная 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 15 м^2 . В пересчете на натуру прочность вмещающих пород на одноосное сжатие составляла около 50 МПа. Начальная глубина заложения выработки равнялась 500 м. 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 результате обработки данных установлено, что отклонения расчетных величин смещений от измеренных в модели имеют разные знаки и не превышают 27,3%.

Наиболее достоверная проверка расчетной зависимости может быть проведена только на результатах натуральных инструментальных наблюдений.

Шахтные инструментальные наблюдения проводились на экспериментальном участке восточного полевого откаточного штрека гор. 824 м. Выработка пройдена в непосредственной близости от пласта c_{11} и выполняет главные

транспортные функции для лав, обрабатываемых обратным ходом на гор. 824 м. Особенностью выбранного участка является то, что полевые штреки испытывают в настоящее время многократное воздействие смежных очистных работ. Это приводит к многократной активизации смещений на контуре выработок. Полевой штрек сечением в свету 15 м^2 был пройден на экспериментальном участке в 1996 году. Сечение выработки расположено под слоем песчаника, мощность которого колеблется от 1,4 м до 3,1 м, а прочность на одноосное сжатие составляет 50-60 МПа, временами 40-50 МПа. Выше залегает непосредственная почва пласта c_{11} и сам пласт мощностью 1,5-1,65 м. Прочность пород непосредственной почвы 30-40 МПа, пласта 15 МПа. Само сечение полевого штрека пересекает в основном слой алевролита мощностью от 2,8 м до 4,8 м, а прочность пород составляла 30-40 МПа. В подошве выработки залегает слоистая толща песчано-глинистых пород средней прочности.

Конвергенция на контуре выработки измерялась на участке, расположенном напротив 25-й восточной лавы.

Экспериментальный участок полевого откаточного штрека гор. 824 м испытывал влияние нескольких смежных лав. В 1998 году была отработана 25-я восточная лава, а в 2000 году закончила работу на обратный ход 25-бис восточная лава. По мере отработки смежных лав наблюдалась активизация конвергенции на контуре экспериментальной выработки, причем скорость конвергенции увеличивалась каждый раз после приближения смежной лавы. Еще одно преимущество выбранного участка состояло в том, что с момента проходки до развития очистных работ прошло мало времени и эксперимент удалось провести в относительно сжатый срок. Это обеспечивает чистоту измеренных данных и отсутствие таких побочных факторов, как выветривание пород и других длительных факторов, которые могли бы внести искажения в результаты измерений конвергенции.

Конвергенция на контуре активизировалась 3 раза: в момент ее проведения, после подхода 25-й восточной лавы, и затем после подхода 25-бис восточной лавы. При этом активное влияние первой лавы зарегистрировано в тот момент, когда опускания кровли достигли примерно 300 мм, а второй лавы – при 300 мм. Пучение почвы в эти периоды составило несколько большую величину: 300 мм и 430 мм. Примерно такой же характер смещений вмещающих пород наблюдался и в боках выработки.

Измерение смещений на контуре выработки старались проводить регулярно, по возможности ежемесячно. Фактически удалось выполнить 82 измерения, что вполне представительно для трех исследуемых интервалов времени, когда происходило изменение геомеханической ситуации. При этом максимальное отклонение составило 30% при среднем уровне отклонений не более 10%. Это свидетельствует о хорошей сходимости расчетных и экспериментальных величин смещений на контуре экспериментальной выработки.

Обоснование метода расчета горного давления, учитывающего основные необратимые процессы при развитии очистных работ в свите сближенных пластов [14-22] осуществлялось на основе анализа известных методик расчета горного давления. При этом учитывались особенности решения постав-

ленной в данной работе задачи. Прежде всего, следует учесть то обстоятельство, что в подавляющем числе случаев выработки эксплуатируются при переменном уровне горного давления. Как правило, в процессе развития очистных работ величина горного давления в окрестности разных участков выработки изменяется в несколько раз. Чаще горное давление увеличивается в силу объединения смежных выработанных пространств и формирования целика вокруг определенного участка выработки. Однако бывают и случаи уменьшения горного давления при последующей надработке выработок. Таким образом необходим был инструмент, способный оперативно при разумных затратах времени и сил на подготовку и анализ данных расчета обеспечить достоверную оценку уровня горного давления в окрестности анализируемой подготовительной выработки.

Применение известных пакетов для многократного расчета перераспределения горного давления в процессе развития очистных работ нецелесообразно, а практически невозможно по следующим причинам. Большой объем подготовки данных, необходимость расчета напряжений по всему объему (хотя в данном случае необходимо только вдоль трассы выработки), невозможность менять граничные условия по ходу расчета (а это надо делать на каждом этапе отработки, то есть 10-20 раз в типичной задаче). В связи с этим приняты два метода расчета горного давления.

Первый базируется на процедуре разрывных перемещений метода граничных элементов и предназначен для вычисления всех компонент напряжений в плоскости угольного пласта. Указанный метод применяется в данной работе эпизодически при необходимости определения полного набора компонент напряженного состояния в окрестности подготовительной выработки. Обычно для оценки ее устойчивости достаточно знания о вертикальной и горизонтальной компонентах вдоль трассы анализируемой выработки. Именно такая информация понадобится в массовом порядке в процессе устойчивости подготовительной выработки. Напомним, что пересчет распределения горного давления в процессе геомеханической планировки очистных работ необходимо производить при динамически меняющихся граничных условиях десятки раз.

Для решения такой задачи применяется известный метод тонкой эквивалентной плиты на неоднородном основании, разработанный проф. М.П. Зборщиком. Такой метод успешно применялся ранее для оценки динамики напряженного состояния толщи в процессе развития очистных работ.

Область массива, окружающего разрабатываемый угольный пласт разбивается на три характерные зоны. Перекрывающие выработанное пространство слои пород можно представить как плиту мощностью h , покоящуюся на неоднородном основании. Жесткость этого основания максимальна в нетронутым массиве (K_1) и минимальна над проекциями выработанных и обрушенных пространств (K_2). Чем больше выработанных пространств совмещено в горизонтальной проекции, тем меньше жесткость основания плиты-кровли

Мощность плиты-кровли, перекрывающей выработанное пространство и определяющей перераспределение горного давления, составляет, как правило, 25-50 м. По сравнению с типичной шириной минимального выработанного

пространства, образующегося в результате обработки одной лавы толщина плиты-кровли в 5-10 раз меньше. Это дает основание рассматривать данную совокупность породных слоев в кровле пласта как тонкую плиту, опирающуюся на неоднородное основание и пригруженную весом вышележащей толщи. Прогибы такой плиты описываются дифференциальным уравнением в смешанных производных четвертого порядка:

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = \frac{q}{D} - \frac{K\omega}{D}, \quad (5)$$

где ω – прогибы точек плиты; q – нормальная к срединной плоскости и распределенная по поверхности плиты пригрузка от вышележащей толщи; K – коэффициент жесткости основания, изменяющийся в зависимости от наличия или отсутствия выработанного пространства; D – цилиндрическая жесткость плиты; $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ (где h – мощность плиты; E – модуль упругости пород кровли; μ – коэффициент поперечных деформаций вмещающих пород).

Решение дифференциального уравнения осуществляется численным методом с учетом граничных условий. Расчетная область разбивается на равномерную сетку, шаг которой соизмерим с толщиной плиты-кровли. Выбор этой модели обоснован следующими преимуществами:

- параметры сетки расчетной области полностью совпадают с параметрами поикетной разбивки трассы подготовительных выработок, что дает возможность легко состыковать программные пакеты по расчету горного давления и смещений на контуре выработки;

- имеется возможность моделировать выработанные пространства произвольной конфигурации, что обеспечивает проведение геомеханического анализа планировок горных работ в реальных горнотехнических условиях угольных шахт;

- автоматический поэтапный ввод выработанных пространств и обновление граничных условий облегчает расчет эволюции горного давления в процессе развития очистных работ в пределах панели, блока или горизонта, причем при одновременной обработке свиты сближенных пластов;

- подготовка исходных данных и решение задачи требует минимум труда и времени. На персональном компьютере класса P200 решение одного этапа задачи о распределении горного давления и силовых характеристик плиты-кровли для расчетной области 100 на 100 узлов составляет 2,5 минуты. Это значит, что расчет полной эволюции распределения горного давления в пределах 8-ярусной панели (16 выработанных пространств или 16 этапов развития очистных работ) занимает 40 минут, что вполне приемлемо в практике проектирования или геомеханического аудита планировки горных работ.

Комплексная система геомеханической оценки устойчивости подготовляющих выработок при произвольном развитии очистных работ построена в виде пакета компьютерных программ, алгоритмы которых получили

геомеханическое обоснование на основе научных результатов, полученных в данной работе.

Система синтезирована на основе компонент, обоснование которых произведено в предыдущих разделах [23]. На рис. 5 показана общая блок-схема такой системы. Она состоит из шести основных крупных блоков.

Применение системы геомеханической оценки планировки горных работ начинается с *подготовки и обработки исходных данных*. При этом выделяется ключевой элемент анализа, который представляет собой, как правило, одну или чаще несколько подготавливаемых выработок, на основе которых произведена подготовка запасов блока, горизонта или панели к выемке. В качестве исходных данных используются следующие их группы.

Горно-геологическая. Сюда относятся, прежде всего, угол залегания пород, прочностные, деформационные, структурные и гидрогеологические данные. Для их конкретной оценки отбирают геологические разрезы и колонки в непосредственной близости от трассы анализируемой выработки (или выработок). В качестве прочностных характеристик принимаются, прежде всего, параметры, которые необходимы для расчета конвергенции на контуре выработки по зависимостям, установленным в предыдущих разделах. Главным образом используются пределы прочности на одноосное сжатие, хотя для уточнения и корректировки данных применяются и коэффициенты крепости, а также пределы прочности на одноосное растяжение. Пределы прочности в образце корректируются параметрами трещиноватости и обводнения.

В качестве деформационных характеристик используются модули деформации и коэффициенты Пуассона. Совместно с мощностью породных слоев эти данные используются для настройки параметров моделей при расчете горного давления.

Горнотехническая группа исходных данных включает в себя, прежде всего контуры горных работ и их эволюцию в ходе отработки анализируемого участка. Указанные контуры вводятся в виде координат выработанных пространств X , Y и координат трассы подготовительных выработок. При этом учитывается положение выработки, как в плане, так и в вертикальной плоскости (с помощью координаты Z). Это весьма важно с точки зрения достоверности результатов геомеханического анализа, поскольку сечение выработки вписывается в конкретный разрез и учитывается конкретное положение отдельных породных слоев относительно поперечного сечения выработки. Ввод координат выработанных пространств производится в том порядке, в котором они обрабатываются. Это дает возможность учесть порядок и очередность выемки запасов, что существенно повышает достоверность результатов анализа.

Горно-технологическая группа данных включает, прежде всего, основные характеристики подготовительных выработок, а именно: способ проведения, тип крепи и плотность ее установки, размеры сечения. Весьма важными характеристиками также являются допустимые зазоры, при исчерпании которых производится ремонт выработки. В качестве таких параметров вводятся критическое опускание кровли, пучение почвы и смещения боков. Кроме того, вво-

дятся предельно допустимые вертикальный и горизонтальный габариты выработки.

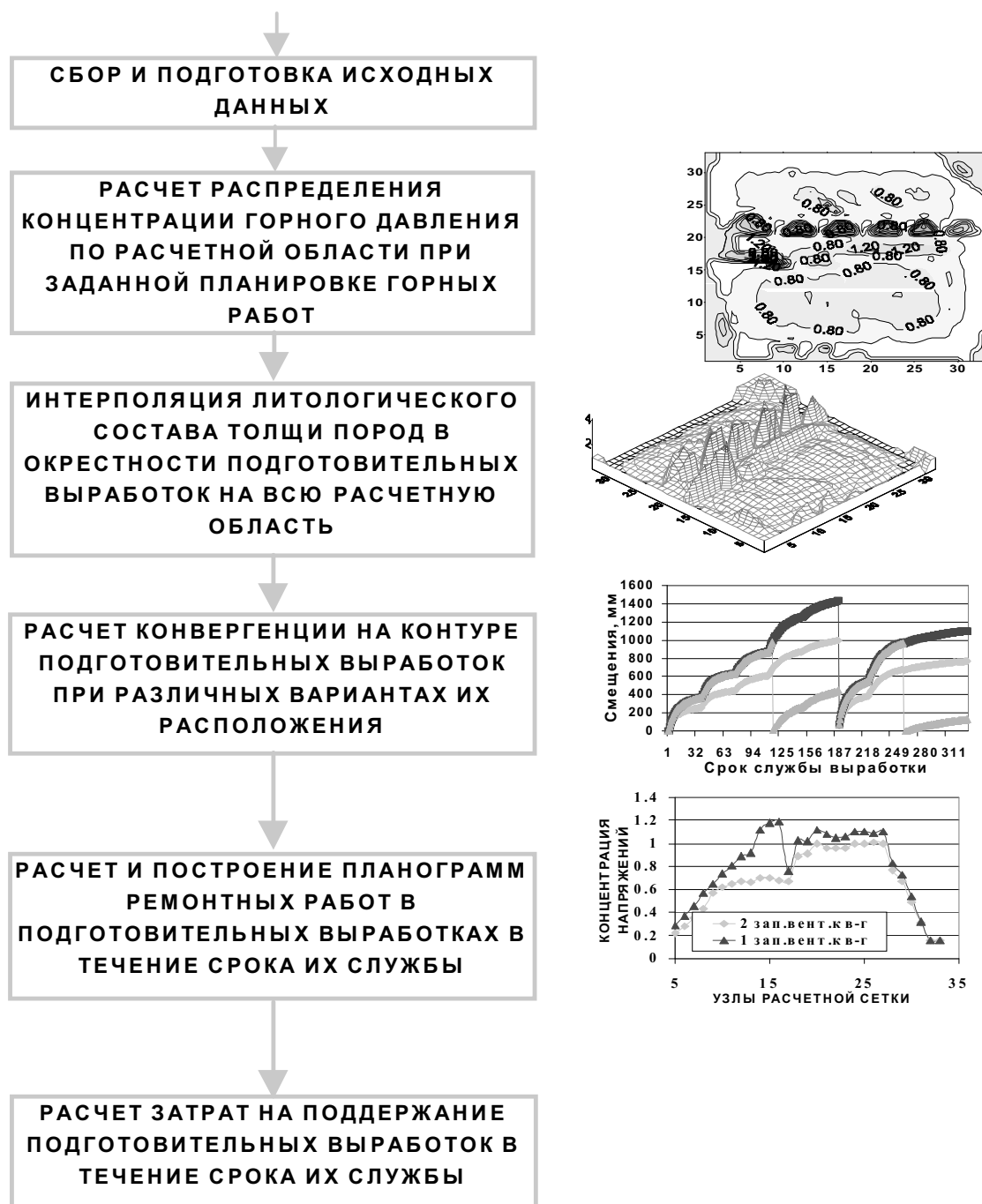


Рис. 5 - Блок-схема системы поэтапной геомеханической оценки планировки горных работ

Весьма важный параметр – время проведения выработки, а часто и ее отдельных отрезков. От соотношения этого параметра и времени отработки смежных запасов выработка может попадать в принципиально разные ситуации. Например, она может быть проведена в предварительно разгруженной региональной зоне, а может быть подвергнута последующей надработке. Во вто-

ром случае смещения на ее контуре при прочих равных условиях будут намного больше.

Второй блок системы включает очень емкий этап расчета перераспределения напряжений в плоскости пласта, плоскости расположения выработки или другой интересующей нас плоскости при развитии очистных работ. По мере отработки лав меняется или эволюционирует напряженное состояние в окрестности трассы проектируемой или фактически существующей выработки. Как правило, после анализа исходной ситуации намечается несколько (чаще всего 3-4) возможных варианта планировки горных работ. Эти варианты тщательно увязываются и согласовываются со схемами вентиляции, транспорта и водоотлива. Это делается для того, чтобы геомеханически приемлемые возможные варианты могли быть реализованы технологически, и отвечать требованиям правил безопасности.

Расчет перераспределения напряжений производится на основе выбранной модели, которая представляет массив как плиту, опирающуюся на неоднородное основание. Напомним, что основными исходными данными для работы этого блока являются координаты выработанных пространств и их эволюция, а также прочностные и деформационные характеристики толщи и ее строение. Все эти данные были охарактеризованы в блоке ввода исходной информации.

Получаемые распределения напряжений автоматически сохраняются в отдельных файлах, соответствующих конкретному этапу развития горных работ. Напряжения рассчитываются и сохраняются для узлов расчетной схемы с заранее заданной плотностью, необходимой для обеспечения достаточной точности решения общей задачи. Это очень удобно с точки зрения последующей работы системы для расчета смещений на контуре выработок. Однако перед началом расчета смещений необходимо привязать сечения выработок к соответствующим породным слоям и их физико-механическим свойствам.

Специальный блок интерполяции прочностных характеристик пород предназначен для такой цели. Выработка разбивается на расчетные узлы или используя маркшейдерский термин пикеты. В результате работы блока каждое сечение выработки (или выработок) привязано к конкретной структурной колонке, при этом известны мощности, прочности породных слоев и их расстояние от центра тяжести конкретного сечения. Такие наборы данных формируются в компьютере и сохраняются для каждого попикетного сечения анализируемой выработки.

Блок расчета конвергенции на контуре выработок является одним из основных и решающих в системе в целом. Именно поэтому в данной работе основные научные исследования были посвящены обоснованию положений, заложенных в основу данного блока. Алгоритмически блок реализован следующим образом. Компьютер извлекает из подготовленных предыдущими блоками файлов данные, характеризующие строение и прочность вмещающих каждое рассматриваемое сечение пород, напряженное состояние в окрестности этого сечения и производит расчет смещений по методикам, описанным выше. .

Важно отметить, что при изменении напряженного состояния, прочности пород, отпора крепи и другими изменениями ситуации, при которой происхо-

дит скачкообразное изменение критерия устойчивости массива, применяется принцип эквивалентного времени, эквивалентной прочности или эквивалентных напряжений. *Только благодаря разработанному принципу удалось произвести достоверную оценку смещений на контуре выработок, эксплуатируемых в реалистичных обстоятельствах, когда изменение критерия устойчивости массива является массовой и весьма типичной ситуацией.*

Текущие смещения накапливаются в специальных файлах, что дает возможность производить учет состояния выработки. В частности осуществляется постоянная проверка допустимых зазоров и габаритов попикетных сечений выработок. Как только допустимые значения превышены, производится ремонт или подрывка почвы, а смещения сбрасываются до нуля. Отметим, что в практике работы шахт часто производится неоднократный ремонт одного и того же участка выработки. Это приводит к естественной саморазгрузке локальной области вокруг данного участка выработки. Такая локальная разгрузка учитывается специальными коэффициентами, уменьшающими напряжения вокруг выработки на таком участке. Данный подход повышает точность расчетов смещений и достоверность анализа в целом.

Для наглядности результатов анализа и возможности визуальной его оценки инженерно-техническими работниками шахты или проектировщиками создан специальный *блок построения планограмм ремонтных работ*. Указанный блок использует данные расчетов смещений на контуре выработок и данные о перекреплении сечения и подрывке почвы. В координатах «длина выработки–время» наносятся отметки, отражающие факт перекрепления или подрывки. Такая диаграмма дает ясное представление, когда и на каком участке выработке будут вестись ремонтные работы при заданной планировке горных работ и заданных исходных условиях.

Достоинство таких планограмм ремонтных работ состоит в том, что они сразу высвечивают сложные узкие места с точки зрения состояния выработки. Эти места легко идентифицируются с причинами, их породившими. Так, например, проанализировав планировку горных работ на момент, когда ремонтные работы интенсифицировались, можно почти наверняка указать на причину, вызвавшую эту интенсификацию.

Завершающим блоком является *блок расчета суммарных затрат* на реализацию данной планировки горных работ с точки зрения поддержания выработки. Имея такие данные, можно интегрально оценить предложенные варианты планировки горных работ. Важно, что при таком анализе часто оказывается необходимым скорректировать отдельные элементы планировки или параметры крепления и поддержания выработок. Весьма типичным и простым в реализации является изменение очередности отработки смежных лав, изменения трассы выработки, при котором она располагается в другой толще пород или в породах с другой прочностью, а также изменение локальной системы «крепь–окружающие породы» путем усиления стационарной крепи, или упрочнения вмещающих пород.

Практика применения разработанной системы показала, что весьма целесообразно производить параллельно с оценкой планировки горных работ монито-

ринг состояния отдельных контрольных участков анализируемых выработок. Это дает возможность скорректировать параметры модели для конкретных условий разработки, что часто повышает точность расчетов смещений и достоверность результатов анализа в целом.

При необходимости скорректировать планировку производится повторный анализ, начиная с работы блока №2. Конечные результаты от этого только выигрывают. В среднем типичным временем на проведение геомеханического аудита планировки горных работ в пределах блока, горизонта или панели при отработке свиты 2-4 пластов составляет 1-3 недели в зависимости от наличия и достоверности исходных данных. В следующем разделе будут детально описаны примеры промышленной проверки и внедрения геомеханической системы.

Промышленная проверка системы комплексной геомеханической оценки и ее внедрение осуществлялись при обосновании рационального размещения полевого штрека гор. 624 м при развитии очистных работ в восточном крыле шахты «Южнодонбасская №3»; обосновании рациональной планировки горных работ при развитии очистных работ на пластах c_8^B и c_8^H в условиях шахты «Западнодонбасская» ГХК «Павлоградуголь»; оценке существующей планировки горных работ на шахте им. Героев Космоса ГХК «Павлоградуголь» и обоснование рационального решения по перспективному планировочному решению; анализе существующей планировки горных работ в условиях шахты им. Бажанова ГХК «Макеевуголь»; разработке и обосновании перспективной планировки развития горных работ на шахте «Южнодонбасская №3» ГХК «Донуголь». Методика расчета смещений на контуре выработки признана в качестве нормативного инструмента, который может быть использован наряду с существующими.

Таким образом, в данной работе решена актуальная научно-прикладная проблема разработки геомеханической системы оценки пространственно-планировочных решений, обеспечивающих устойчивость подготавливаемых выработок при развитии горных работ в свите сближенных пластов, в результате чего установлены существенно новые закономерности деформирования вмещающих подготовительную выработку пород, заключающиеся во взаимной зависимости величин смещений пород кровли, боков и почвы, а также быстро исчезающей со временем зависимости смещений пород вокруг выработки от причины и условий, породивших эти разрушения, что позволило обосновать новый принцип эквивалентного геомеханического состояния вмещающих выработку пород, на основе чего разработана новая методика расчета смещений пород кровли, боков и почвы на контуре подготовительной выработки при произвольном изменении напряженного состояния, прочности вмещающих пород или параметров отпора крепи за время ее эксплуатации. Это имеет важное значение для угольной промышленности Украины с точки зрения надежности проектирования горных работ и экономических показателей работы шахт в современных рыночных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров В.С., Еремин А.Т., Халимендик Ю.М. Выбор рационального способа охраны региональной зоны разгрузки на шахте им. Героев Космоса // Проблемы горного давления. – 1999. – №3. – С. 74-82.
2. Захаров В.С., Напрасников С.В., Лаптеев А.А. Количественная оценка способа охраны выработок целиками угля // Известия Донецкого горного института. – 1999. – №3. – С. 6-10.
3. Захаров В.С., Грядущий Ю.Б., Еремин А.Т., Красько Н.И. Анализ результатов микросейсмического мониторинга в окрестности примыкающего к ранее выработанному пространству длинного очистного забоя // Известия Донецкого горного института. – 2000. – №1. – С. 37-40.
4. Захаров В.С., Вишневецкий В.В., Еремин А.Т., Иванов И.Е. Влияние устойчивости кровли на последовательность отработки запасов в пределах части шахтного поля // Известия Донецкого горного института. – 2000. – №2. – С. 111-114.
5. Захаров В.С., Пономарев М.А. Выбор рациональной планировки горных работ, обеспечивающей устойчивость магистральных выработок восточного крыла ш. «Южно-Донбасская №3» // Проблемы горного давления. – 2000. – №4. – С. 144-161.
6. Ведение работ при обрушениях кровли в очистных забоях пологих пластов / Халимендик Ю.М., Иванов И.Е., Добровольский Н.А., Воронин С.А., Захаров В.С. – Донецк: ДонУГИ, 2000. – 128 с.
7. Назимко В.В., Захаров В.С., Горяженко Ю.А. Анализ планировки горных работ на перспективных участках месторождений Западного Донбасса // Науковий вісник НГАУ. – 2000. – №4. – С. 92-95.
8. Перспективы развития и эффективность новых способов сохранения устойчивости выемочных выработок глубоких шахт / В.С. Захаров, В.Ф. Мартныненко, А.А. Каплюхин, В.С. Гирич // Известия Донецкого горного института. – 2001. – №1. – С. 32-35.
9. Zacharov V.S., Nazimko V.V., Aleksandrov V.S. Prognozirowanie zaciskania wyrobisk podziemnych // Budiwnictwo górnice i tunelowe. – 2001. – №2. – С. 23-29.
10. Назимко В.В., Захаров В.С. Методика расчета конвергенции на контуре подготовительной выработки, основанная на принципе эквивалентной геомеханической ситуации // Геотехническая механика. – 2001. – №26. – С. 53-59.
11. Расчет смещений на контуре подготовительных выработок с учетом разброса прочностных свойств вмещающих пород / В.С. Захаров, В.В. Назимко, В.П. Сажнев, В.Б. Грядущий // Проблемы горного давления. – 2001. – №6. – С. 48-71.
12. Назимко В.В., Захаров В.С. Новая концепция к расчету смещений на контуре подземной горной выработки в поле переменного горного давления // Физика и техника высоких давлений. – 2002. – Том 11, №3. – С. 86-93.
13. Назимко В.В., Захаров В.С., Грядущий В.Б. Анализ разброса скоростей конвергенции на контуре подготовительных выработок // Сборник научных трудов Национальной горной академии Украины. – 2002. – №13. Том 1. – Стр. 35-38.
14. Назимко В.В., Захаров В.С. Оценка напряженно-деформированного состояния толщи при произвольном порядке и очередности отработки запасов в свите пластов // Уголь Украины. – 2001. – №8. – С. 21-24.
15. Захаров В.С., Назимко В.В., Напрасников С.В., Александров С.Н., Гарковенко Е.Е. Фрактальное исследование анизотропии пород // Физика и техника высоких давлений. – 2001. – Том 11, №2. – С. 125-130.
16. Влияние размеров угольного целика на предотвращение объединения зон сдвижений над выработанными пространствами / В.С. Захаров, А.Т. Еремин, И.Е. Иванов, С.В. Кузяра // Геотехническая механика. – 2001. – №25. – С. 88-92.
17. Красько Н.И., Захаров В.С., Еремин А.Т., Бугара М.И., Коломиец В.А. Опыт надработки полевых выработок лавами со ступенчатой конфигурацией общего выработанного пространства // Проблемы горного давления. – 2002. – №7. – С. 51-58.
18. Захаров В.С., Пастернак З.Г. Анализ устойчивости выработок при ведении горных работ вблизи геологического нарушения // Труды ДонНТУ. Серия горно-геологическая. – 2002. – №54. – С. 149-154.
19. Красько Н.И., Захаров В.С., Иванов И.Е. Процессы разрушений горных выработок в окрестности целика // Физико-технические проблемы горного производства. – 2002. – №5. – С. 20-27.
20. Захаров В.С., Петров В.В., Красько А.Н., Сабынин А.В., Мирумьян А.Г., Иванов И.Е. Геомеханический анализ способа основных подготовительных выработок расположением их в зоне разгрузки у центрального целика // Известия Донецкого горного института. – 2002. – №1. – С. 21-24.
21. Захаров В.С., Пастернак З.Г., Еремин А.Т., Пожитько И.И., Иванов И.Е., Шипачев В.К. Анализ проявлений горного давления при использовании зон разгрузки для охраны выработок у опорного целика // Проблемы горного давления. – 2002. – №8. – С. 31-39.
22. Захаров В.С., Сажнев В.П. Моделирование геомеханического состояния непосредственной кровли подготовительной выработки с учетом случайного распределения неоднородностей в ней. // Геотехническая механика. – 2003. – №42. – С. 41-45.
23. Захаров В.С. Разработка комплексной системы геомеханической оценки устойчивости подготавливаемых выработок при произвольном развитии очистных работ // Физико-технические проблемы горного производства. – 2001. – №3. – С. 68-74.