

УДК 622.831.312:622.817

Булат А.Ф., акад. НАНУ, д-р техн. наук, професор,
Слащев И.Н., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Слащева Е.А., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
(ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины)

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СРЕДЫ ШАХТ

Булат А.Ф., акад. НАНУ, д-р техн. наук, професор,
Слащов І.М., канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Слащова О.А., канд. техн. наук, ст. наук. співр.
(ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України)

КОМПЛЕКСУВАННЯ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ГЕОМЕХАНІЧНИХ ТА ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПОРОДНОМУ МАСИВІ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ВИРОБНИЧОГО СЕРЕДОВИЩА ШАХТ

Bulat A.F., Acad. NASU, D. Sc. (Tech.), Professor,
Slashchov I.N., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Slashchova Ye.A., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher
(N.S. Polyakov IGTM NAS of Ukraine)

EVALUATION METHODS OF INTERCONNECTED GEOMECHANICAL AND GAS DYNAMIC PROCESSES IN THE ROCK MASSIF FOR THE SYSTEMS OF WORKING MEDIUM CONTROL IN THE MINES

Аннотация. В статье приведены результаты исследований по комплексированию методов оценки параметров геомеханических и газодинамических процессов в породном массиве для систем контроля безопасности шахт. Дальнейшее развитие получила модель фильтрационного переноса газов в породном массиве при отработке угольных пластов смежными лавами, которая отличается: определением изменений ориентировки в геопространстве и раскрытости систем магистральных трещин; расчетом компонент главных деформаций элементов геомеханической модели, характеризующих изменения структуры и формирование областей газового питания в процессе ведения горных работ. Установлено, что: в зонах беспорядочного обрушения за лавой трещины разрыва не препятствуют движению газов в различных направлениях; в областях неупругого деформирования пород в условиях неравнокомпонентного сжатия максимальный газоперенос происходит по магистральным трещинам в направлении зон с пониженным давлением; в зонах опорного давления поры сжаты, а газопроницаемость пород предельно снижена до 1...2 мД. Для систем контроля производственной среды шахт обоснованы параметры геомеханического и газодинамического процессов в массиве пород, в частности, характеристики объемов, расположения и проницаемости порово-трещинного пространства, которые в наибольшей степени определяют интенсивность миграции газов и пути их фильтрации. На базе параметров ориентации систем трещин техногенного происхождения и шаровой части тензора деформаций установлены закономерности изменений формы и объемов порово-трещинного пространства на различных этапах отработки смежных лав.

Научные результаты положены в основу разработки аналитико-экспериментального метода контроля производственной среды шахт, а также создания информационных систем безопасности на промышленных предприятиях.

Ключевые слова: геомеханические и газодинамические процессы, проницаемость, фильтрация, моделирование массива пород, системы контроля безопасности шахт.

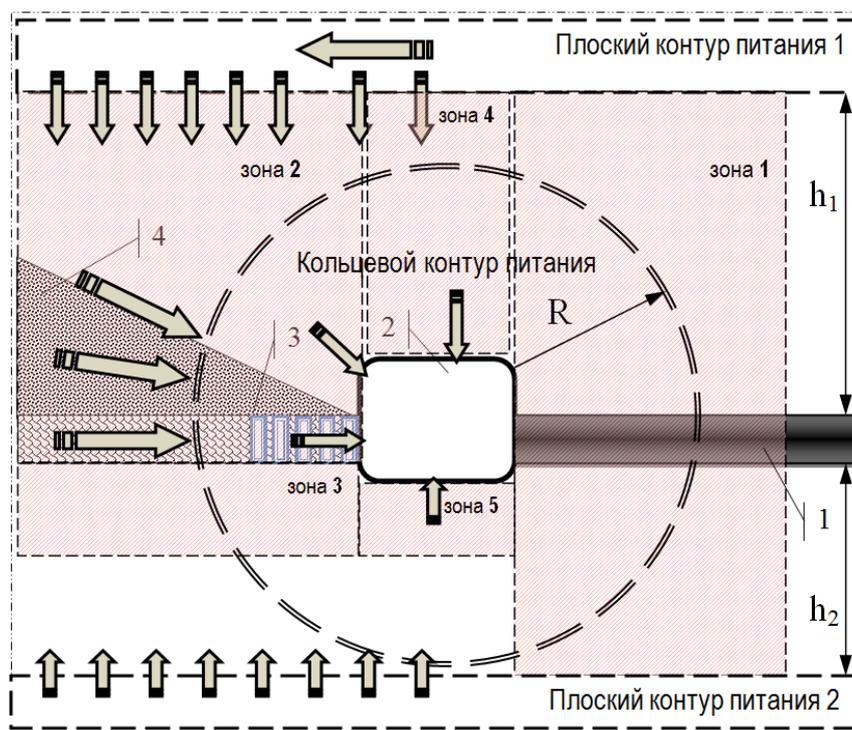
Производственную среду шахт можно трактовать как часть геотехнологической системы, которая имеет высокую концентрацию рисков проявлений негативных факторов. В качестве источников рисков выступают разные вредные и опасные факторы: транспорт, падения с высоты, движущиеся части оборудования, электрические системы, нарушения дисциплины и организации деятельности работающих, нарушения микроклимата рабочей зоны и другие, но основными остаются факторы, связанные с внезапными проявлениями геомеханических и газодинамических процессов, которые происходят в породном массиве при ведении горных работ [1-4]. Статистика показывает, что травматизм от обрушений и вывалов пород, горных ударов, взрывов газа и пыли только за первое полугодие 2017 года составил 47 % от общего числа пострадавших (от обвалов пород – 33 %, от взрывов газа и пыли – 12 % [5]). При этом коэффициент частоты смертельного производственного травматизма на миллион тонн добытого угля за первое полугодие 2017 года по сравнению с аналогичным периодом 2016 года увеличился на 1,06 и составил 4,6 против 3,0 в 2016 году.

Существенными остаются и материальные затраты. Опыт ведения подземных горных работ показал, что в результате активизации процессов сдвижений пород происходит снижение поперечных сечений выработок и интенсивное поступление в шахтную атмосферу газа метана, что делает необходимым существенное повышение затрат на восстановление работоспособности систем крепления и на увеличение расхода воздуха для проветривания. Снижение рисков возникновения аварийных и травмоопасных ситуаций возможно путем обеспечения в оперативном режиме мониторинга параметров состояния горных пород вокруг выработок, оценки принимаемых решений с помощью современных информационных технологий прогнозирования напряженно-деформированного состояния пород и выработки мер по повышению уровня безопасности геотехнической системы. Это требует комплексирования методов оценки параметров геомеханических и газодинамических процессов для информационных систем превентивного контроля состояния массива пород.

Управление процессом функционирования геотехнической системы, являющейся объектом моделирования, представляется возможным, если известны математические зависимости, связывающие искомые показатели с начальными условиями и параметрами исследуемой системы. Явные математические зависимости для такой сложной системы малоприменимы, поэтому следует применять имитационное моделирование, например, с использованием метода конечных элементов [6, 7]. Исходные параметры физико-механических свойств геомеханических моделей для условий

обводненного газонасыщенного массива пород представлены в работах [8-10]. В работе [11] исследованы процессы формирования зон неупругих деформаций в породном массиве и объемы нарушенных пород при отработке смежных выемочных участков. Вместе с тем, условия совместного протекания и взаимосвязи между параметрами геомеханических и газодинамических процессов в массиве пород не рассматривались.

Исходные условия активизации газодинамических процессов вокруг горных выработок можно представить в виде двух основных групп. Первая группа факторов определяется наличием и параметрами источников газовыделения, которые могут быть представлены как плоские и кольцевые контуры питания, рис. 1. При этом контуры питания понимаются как линии, на которых в период эксплуатации горных выработок газовое давление остается либо постоянным, либо изменяется по определенному закону, не зависящему от расхода газа из газоносного пласта или других источников. Вторая группа факторов определяется проницаемостью горных пород на пути фильтрации газов в выработки и разностью давлений на галерее стока и на контуре питания исследуемых интервалов.



1 – угольный пласт; 2 – горная выработка; 3 – элементы охранных конструкций; 4 – выработанное пространство; зона 1 – повышенного горного давления (с низкой проницаемостью); зоны 2, 3 – разгрузки в кровле (с высокой проницаемостью) и почве разрабатываемого пласта, соответственно; зоны 4, 5 – разгрузки в кровле и почве подготовительной выработки; R – радиус кольцевой зоны дренирования; h_1 , h_2 – расстояния до плоских контуров питания в кровле и почве горной выработки, соответственно.

Рисунок 1 – Схема к расчету геомеханических и газодинамических параметров в слоистом породном массиве вокруг горной выработки на сопряжении смежных лав

Для плоских контуров питания объемный расход фильтрационного переноса газов в породном массиве с учетом турбулентности и дополнительных потерь может определяться законом Дарси, записанным для среднего давления $(p_1 + p_2)/2$ в фильтрационном потоке

$$Q = \frac{K F}{\mu} \left(\frac{p_2^2 - p_1^2}{2 l p_1} \right), \quad (1)$$

где Q – расход, м³/с; K – коэффициент проницаемости порово-трещинного пространства, м²; F – площадь поперечного сечения потока, м²; μ – динамическая вязкость фильтрующегося жидкости или газа, Па·с; l – длина пути фильтрации, м; p_1, p_2 – давление в сечениях начала и конца интервала, соответственно, Па.

Для кольцевых контуров питания объемный расход в области разгрузки радиусом r , с радиусом кругового контура дренирования R может быть рассчитан по формуле Ж. Дюпюи (интегральная форма закона Дарси для случая плоскорадиального установившегося потока (динамической вязкостью газа для практических расчетов пренебрегают)

$$Q = \frac{\pi h K}{\mu} \frac{(p_2^2 - p_1^2)}{p_a \ln \frac{R}{r}}, \quad (2)$$

где h – толщина проницаемого слоя, м; p_1, p_2 – забойное давление на прямолинейной галерее стока и на контуре питания интервала, соответственно, Па; p_a – атмосферное давление, Па.

Как видно из соотношений (1) и (2) геомеханический процесс неупругого деформирования горных пород связан с объемными расходами фильтрационного переноса газов в породном массиве через параметры проницаемости порово-трещинного пространства и градиенты давлений, которые являются важнейшими характеристиками газодинамического процесса. Параметры проницаемости в наибольшей степени зависят от степени разрушения горных пород (раскрытия пор и трещин) и ориентации в геопространстве путей фильтрации газов. Изменения градиентов давлений в породном массиве зависят от условий проведения и поддержания горных выработок и могут быть определены аналитическими методами в результате оценки напряженно-деформированного состояния породного массива современными информационными системами [4, 6, 7].

Трещинно-поровое пространство можно представить в виде сети связанных пор, а также трещин природного и техногенного происхождения. Природная пористость и трещиноватость определяются на этапе разведочного бурения лабораторными испытаниями и для большинства горных пород разрабатываемых месторождений известна. Техногенные трещины развиваются

в процессе ведения горных работ в результате деформационных процессов. Подавляющее большинство природных и техногенных трещин объединяются в ориентированные системы, стенки которых можно принять за плоскости, оказывающие сопротивление потоку газа за счет сил трения. Поэтому зависимость проницаемости пород от трещинной пористости и величины раскрытия трещин можно получить, используя уравнение Буссинеска:

$$q = \frac{b_T^3}{12\mu} \frac{dp}{dx}, \quad (3)$$

где q – расход на единицу протяженности щели, м³/с; b_T – раскрытость трещины, м; dp/dx – градиент давления, Па.

Длину трещин, приходящуюся на площадь фильтрующей поверхности представим через трещинную пористость и раскрытость системы трещин b при условии $b_T = \text{const} = b$:

$$l_T = \frac{m_T F}{b}, \quad (4)$$

где m_T – трещинная пористость, отн. ед.; b – раскрытость системы трещин, м.

Подставляя (4) в (3) получим расход газа в породах через площадь поперечного сечения фильтрационного потока

$$Q = \frac{m_T F b^2}{12\mu} \frac{dp}{dx}. \quad (5)$$

Последовательно приравнивая правые части уравнений (1), (2) и (5) получаем взаимосвязь между коэффициентом трещинной фильтрации и трещинной пористостью

$$K_T = \frac{m_T b^2}{12}, \quad (6)$$

а также выражения для расчетов расхода фильтрационного переноса газов через трещиноватый массив с учетом его напряженно-деформированного состояния, когда трещины перпендикулярны поверхности фильтрации:

- для плоских контуров питания

$$Q = \frac{(m + m_T b^2) F}{24l\mu} \left(\frac{p_2^2 - p_1^2}{p_1} \right), \quad (7)$$

- для кольцевых контуров питания

$$Q = \frac{(m + m_T b^2) \pi h}{12\mu \ln \frac{R}{r}} \left(\frac{p_2^2 - p_1^2}{p_a} \right), \quad (8)$$

где m – природная пористость, отн. ед.

Проницаемость трещиноватых пород зависит от простирания систем трещин и направления фильтрации. Наибольшие потери энергии потока происходят при его движении поперек доминирующим системам трещин и слоистости пород. Для произвольного расположения системы трещин модель фильтрационного переноса газов будет определяться соотношениями:

- для плоских контуров питания

$$Q = \frac{(m + m_T b^2) (\sin^2 \varpi \cos^2 \theta + \cos^2 \varpi) F \left(\frac{p_2^2 - p_1^2}{p_1} \right)}{24l\mu}, \quad (9)$$

- для кольцевых контуров питания

$$Q = \frac{(m + m_T b^2) (\sin^2 \varpi \cos^2 \theta + \cos^2 \varpi) \pi h \left(\frac{p_2^2 - p_1^2}{p_a} \right)}{12\mu \ln \frac{R}{r}}, \quad (10)$$

где ω – угол падения системы трещин, град.; θ – угол между задаваемым направлением фильтрации и простиранием данной системы трещин.

Полученные соотношения (9, 10) устанавливают взаимосвязи параметров геомеханического процесса (трещинной пористостью, углами падения и простирания систем трещин) с параметрами газодинамического процесса (интенсивностью, расходами и направлением перемещения газов), справедливы для плоских и кольцевых контуров питания и могут быть интегрированы в информационные системы превентивного контроля состояния производственной среды шахт. Прогнозирование показателей геомеханических и газодинамических процессов позволяет рассчитать вероятность возникновения проявлений опасных факторов (базового параметра для систем безопасности), предупредить персонал и принять меры для предотвращения неблагоприятных событий.

Изменения напряженно-деформированного состояния породного массива исследовались на примере отработки смежных лав. Для математического моделирования использованы схемы, включающие отработку угольного пласта смежными лавами без оставления целиков с повторным использованием подготовительных выработок [11]. Рассчитывались величины максимальных главных и касательных напряжений в области влияния смежных очистных выработок, расположение и параметры зон разрушения, ориентация систем техногенных трещин:

- для зон упругого деформирования проводился анализ сжатия и растяжения порово-трещинного пространства под воздействием разности давлений;

- для зон неупругого деформирования в области неравнокомпонентного сжатия дополнительно анализировались направленные микротрещины (т.к. поры слабо влияют на фильтрацию), а также протяженные магистральные сжатые трещины;

- для зон неупругого деформирования в зоне растяжения (беспорядочного обрушения) – магистральные раскрытые трещины и породные блоки.

После расчета параметров трещин определялись пути перемещения газовых потоков из областей питания в выработки выемочного участка на границе отработанного и подготовленного к отработке смежного выемочного столба. Для изучения выделена серия из шести квазистационарных состояний (табл. 1), которые определяют характерные этапы отработки выемочных столбов. Первоначально исследовались геомеханические и газодинамические процессы в породном массиве при отработке первой лавы, далее изучалось процессы при отработке второй лавы.

Таблица 1 – Исследуемые этапы отработки смежных лав

Этапы отработки		Характеристика квазистационарного состояния
1	Отработка первой лавы	В окне лавы
2		Выработанное пространство – потеря устойчивости непосредственной кровли (НК) 5-40 м за лавой
3		Выработанное пространство – разрушение основной кровли (ОК) 30-70 м за лавой
4	Дальнейшая отработка смежной лавы	В окне лавы
5		Выработанное пространство – потеря устойчивости непосредственной кровли 5-40 м за лавой
6		Выработанное пространство – разрушение основной кровли 30-70 м за лавой

При комплексном анализе геотехнологической системы, включающей породный массив и горные выработки, принимается обоснованное допущение, что изменение относительных объемов порово-трещинного пространства (трещинной пористости) под влиянием горных работ соответствует изменениям шаровой части тензора деформаций в объеме исследуемого элемента породного массива (за исключением участков разрыва сплошности в зонах беспорядочного обрушения) [6, 12]. Тензор деформации описывается суммой векторов узловых перемещений. При этом его шаровая часть определяется величиной минимальных главных нормальных деформаций элементов геомеханической модели, рассчитанных для различных квазистационарных состояний процесса отработки лав.

Анализ характера изменений минимальных главных деформаций (объемов порово-трещинного пространства) в породах кровли очистного забоя и формирование зон различной проницаемости (рис. 2, 3) показывает, что со стороны угольного пласта в зоне опорного давления породы основной кровли находятся в состоянии переуплотнения и их газопроницаемость низкая, а в интервале -10...+20 м от конвейерного штрека первой лавы они, напротив, имеют максимальный коэффициент разуплотнения и значительные разрушения. Поэтому в этой зоне газопроницаемость очень велика и может способствовать либо аккумуляции газа, либо его миграции в любом направлении. За 30...40 метровой зоной в обрушенных породах начинается процесс восстановления гидростатического давления.

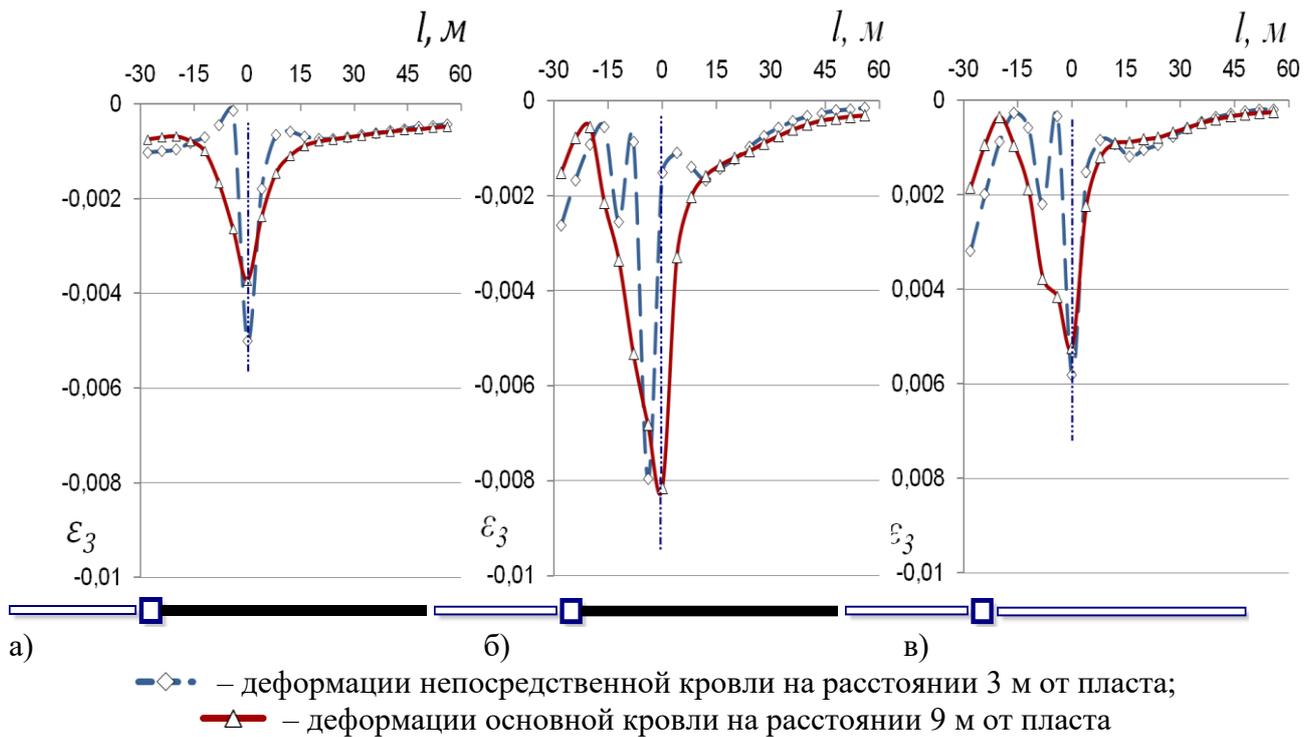


Рисунок 2 – Изменения минимальных главных деформаций (объемов порово-трещинного пространства) кровли на этапах отработки смежных лав: а – на уровне окна первой лавы; б – 30-70 м после осадки ОК первой лавы; в – 30-70 м после осадки ОК смежной лавы.

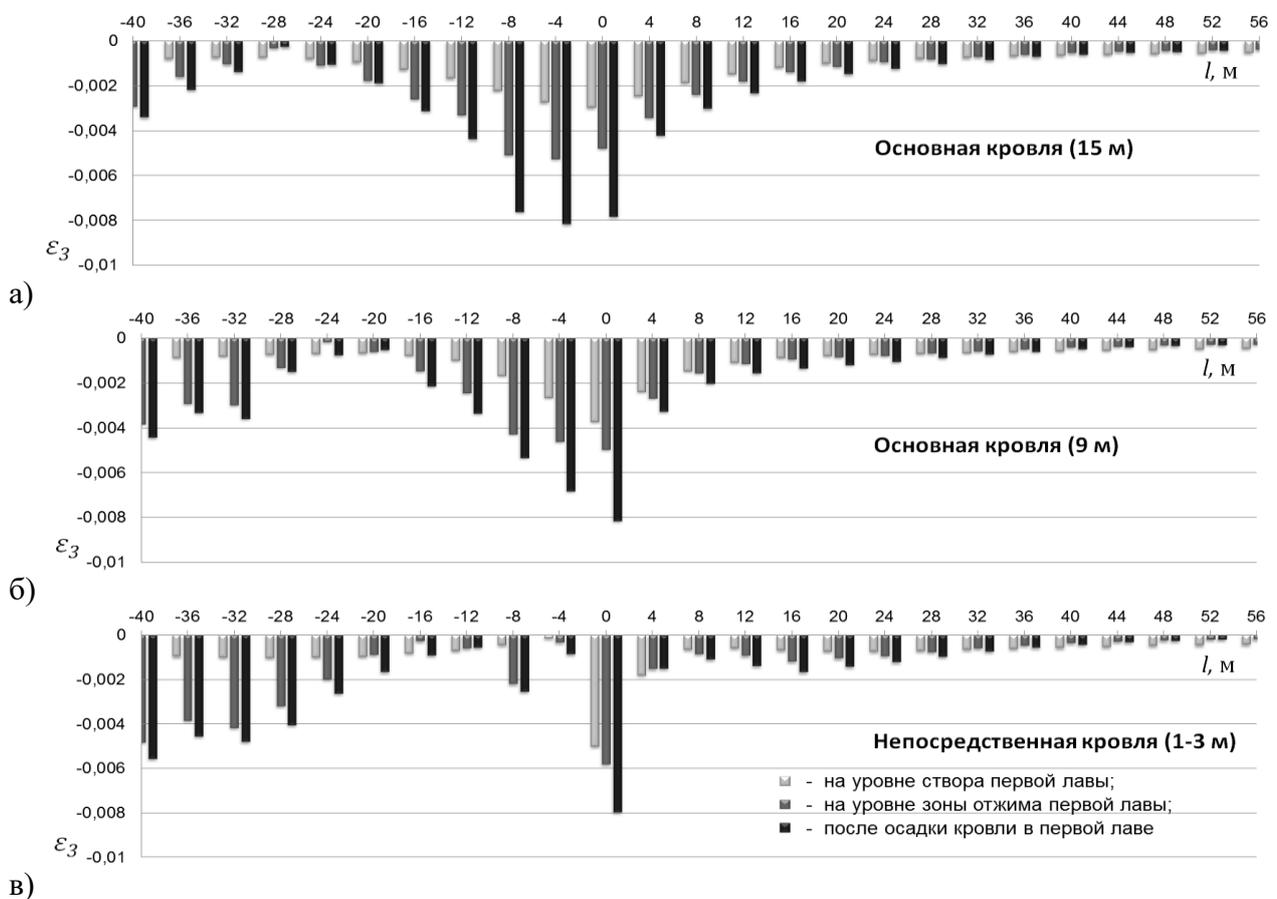
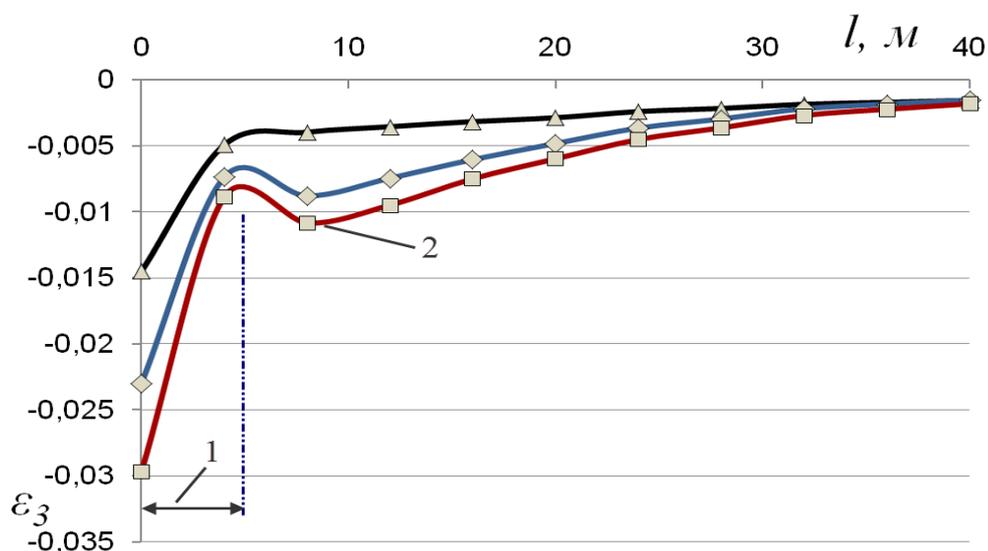


Рисунок 3 – Динамика изменений объемов порово-трещинного пространства при отработке первой лавы на плоских контурах питания в кровле области сопряжения смежных лав

Так как технология горных работ при столбовой системе разработки (как наиболее часто применяемая на практике) может предусматривать поддержание подготовительных выработок после прохода очистного забоя, то газопроницаемость массива пород на пути фильтрации в горную выработку при отработке первой лавы будет определяться, преимущественно, характером деформаций подработанных пород и параметрами системы охраны горной выработки. Выделение газов непосредственно в подготовительные горные выработки зависит от проницаемости приконтурной части породного массива. При отработке очистного забоя первой лавы в боковой приконтурной части подготовительной выработки со стороны смежной лавы в результате действия опорного горного давления образуется зона неупругих деформаций (в угольном пласте – зона отжима, рис. 4). Объемы порово-трещинного пространства в процессе движения лавы увеличиваются в два раза. Далее в пласте наблюдается формирование локального максимума напряжений и сжатие порово-трещинного пространства.



- ▲ - деформации на уровне окна первой лавы;
- ◆ - деформации 5-40 м после прохода первой лавы;
- - деформации 30-70 м после прохода первой лавы

- 1 – зона отжима со стороны второй лавы на уровне угольного пласта;
- 2 – сжатие порово-трещинного пространства в зоне опорного давления

Рисунок 4 – Изменение порово-трещинного пространства в зоне повышенного горного давления в целике угля со стороны смежной лавы

Для условий деформационной упругопластической модели среды методология определения ориентации в геопространстве доминирующих систем трещин представлена в работах [6, 12]. Установлено, что развитие систем техногенных трещин происходит, преимущественно, в направлениях или близких к перпендикулярному максимальным нормальным растягивающим напряжениям в условиях деформации растяжения (трещины отрыва), или по

направлению максимальных напряжений сдвига (линий скольжения) в условиях неравнокомпонентного сжатия (трещины скалывания). Системы магистральных трещин являются причиной резкого снижения устойчивости и внезапных подвижек пород кровли и почвы, увеличения отжима угля и вмещающих пород, расслоений приконтурной части массива, внезапных обрушений, динамических нагрузок на крепи, выделением газа в выработки и других опасных производственных факторов. Поэтому прогнозирование параметров магистральных трещин необходимо рассматривать в качестве превентивных способов оценки производственной среды шахт, позволяющих повысить уровень безопасности и эффективности производства.

В результате аналитических исследований определены направления двух систем главенствующих трещин, возникающих при отработке смежных лав (показаны черными линиями на рис. 5). Системы близких к горизонтальным трещин в основной кровле распространяются над очистным забоем, где образуют дополнительные разрывы сплошности массива. Как показано на диаграммах по поперечным сечениям выемочного столба при отработке смежных лав деформационные процессы, происходящие в поле разнокомпонентных напряжений породного массива, влияют на структуру и объемы трещинно-порового пространства, формируют области газового питания. Вместе с тем, ориентация основных систем газопроводящих трещин определяет направленность газопереноса в выработки.

Выделены три основные зоны, влияющие на газоперенос: зона беспорядочного обрушения за лавой, где движение газовых потоков неограничено во всех направлениях (зоны 1, 5 высокой проницаемости, рис. 5); зона неупругого деформирования при неравнокомпонентном сжатии, где газоперенос происходит по магистральным трещинам (зоны 2, 3 направленного газопереноса, рис. 5); зону повышенного горного давления перед лавой (низкой проницаемости), где поры сжаты, вследствие чего газопроницаемость пород существенно снижена.

Рассмотрим динамику совместного развития геомеханических и газодинамических процессов при отработке смежных очистных забоев. Вследствие образования выработанных пространств снижается горное давление, свободные и ранее адсорбированные газы освобождаются из порово-трещинного пространства. Газ метан имеет хорошую диффузионную способность и легко проникает через трещиноватые горные породы. Перемещение происходит под действием градиентов давления в земной коре, газоподъемной силы при заполнении пор водой, за счет процессов влагооборота, теплообмена, и др. В горных выработках содержание газа метана зависит, прежде всего, от геомеханических процессов в породном массиве, поскольку возникающие в результате трещины определяют проницаемость пород по пути фильтрации газов от источников их образования до обнаженных поверхностей.

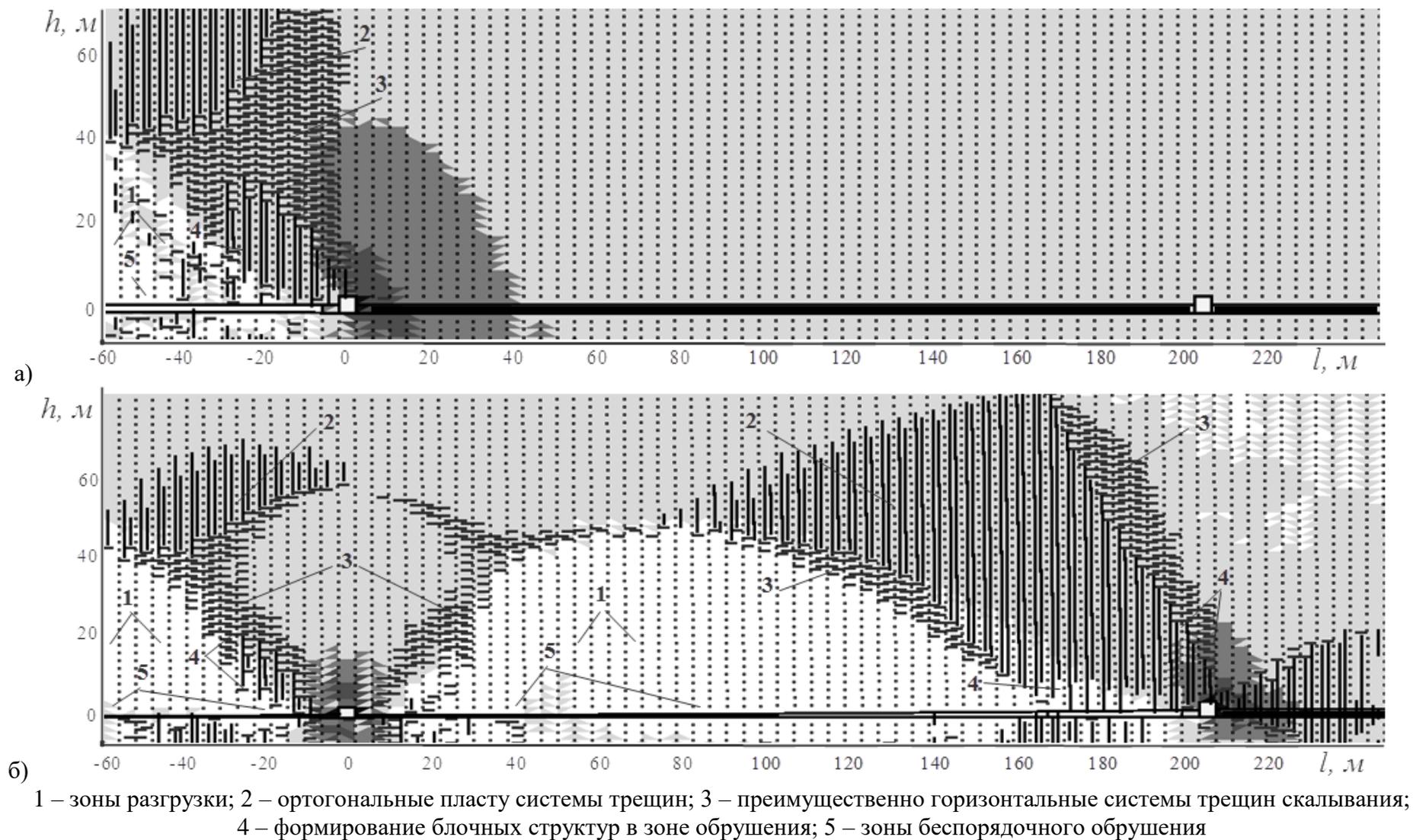


Рисунок 5 – Развитие систем трещин при отработке смежных лав:

а – после прохода первой лавы на уровне зоны обрушения; б – после отработки двух лав на уровне зон обрушения

Как было показано, основными факторами для перемещения газов в массиве будут изменения главных напряжений, определяющие разность давлений между соседними участками, а также изменения объемов порово-трещинного пространства, определяющие фильтрационную способность горных пород, и ориентация систем магистральных трещин, влияющая на доминирующие направления движения свободного газа. На рис. 6 показаны совмещенные графики, которые позволяют оценить изменения указанных параметров в процессе отработки смежных лав.

С точки зрения изменений фильтрационных способностей массива горных пород область, затронутую горными работами, можно разделить на шесть основных зон (зоны I-VI, рис. 6). Области выработанных пространств отработанных лав характеризуются низкими напряжениями (зоны I и IV). Вместе с тем, максимальные главные напряжения в зонах разгрузки первой и смежной лав над зонами беспорядочного обрушения различны. Напряжения на уровне основной кровли над первой лавой составляют 5...10 МПа, над смежной – 10...20 МПа (исходные условия приняты для однородного массива на глубине 1000 м). Очевидно, что это различие связано с расширением зон неупругих деформаций над выработанными пространствами с течением времени и реологическими процессами в вышележащих горных породах. В зоне влияния конвейерного штрека первой лавы в основной кровле зона повышенного горного давления сохраняется (коэффициент концентрации напряжений составляет 1,5...2,5), что объясняется работой средств крепления, обеспечивающих устойчивость штрека, например, с применением анкерных систем [13].

Фильтрационная способность пород над выработанными пространствами имеет свои особенности. Увеличение объемов порово-трещинного пространства в основной кровле над зоной беспорядочного обрушения происходит в 3...4 раза меньше, чем в зонах перегиба, где активно идут деформационные процессы (зоны II, III, и V, расположены над штреками на расстояниях от -15...20 м до +35...40 м от конвейерного штрека первой лавы и от -15...20 м до +5...10 м от конвейерного штрека смежной лавы, см. рис. 5, 6). Вместе с тем, фильтрационная способность беспорядочно обрушенных пород максимальна. Это связано с тем, что непосредственно над очистными выработками после прохода лав формирование зоны беспорядочного обрушения происходит в виде блоков разделенных открытыми газопроводящими трещинами различной направленности (в результате действия растягивающих напряжений). Эти трещины практически не препятствуют движению газов в различных направлениях, чем и объясняются зафиксированные на практике факты интенсивных перетоков метана через выработанные пространства между далеко расположенными лавами. Породы внутри блоков, которые образуются в зоне беспорядочного обрушения, испытывают только деформации упругого восстановления после снятия нагрузки при подработке пласта, поэтому они незначительно увеличивают свое порово-трещинное пространство и в фильтрационных процессах фактически не участвуют.

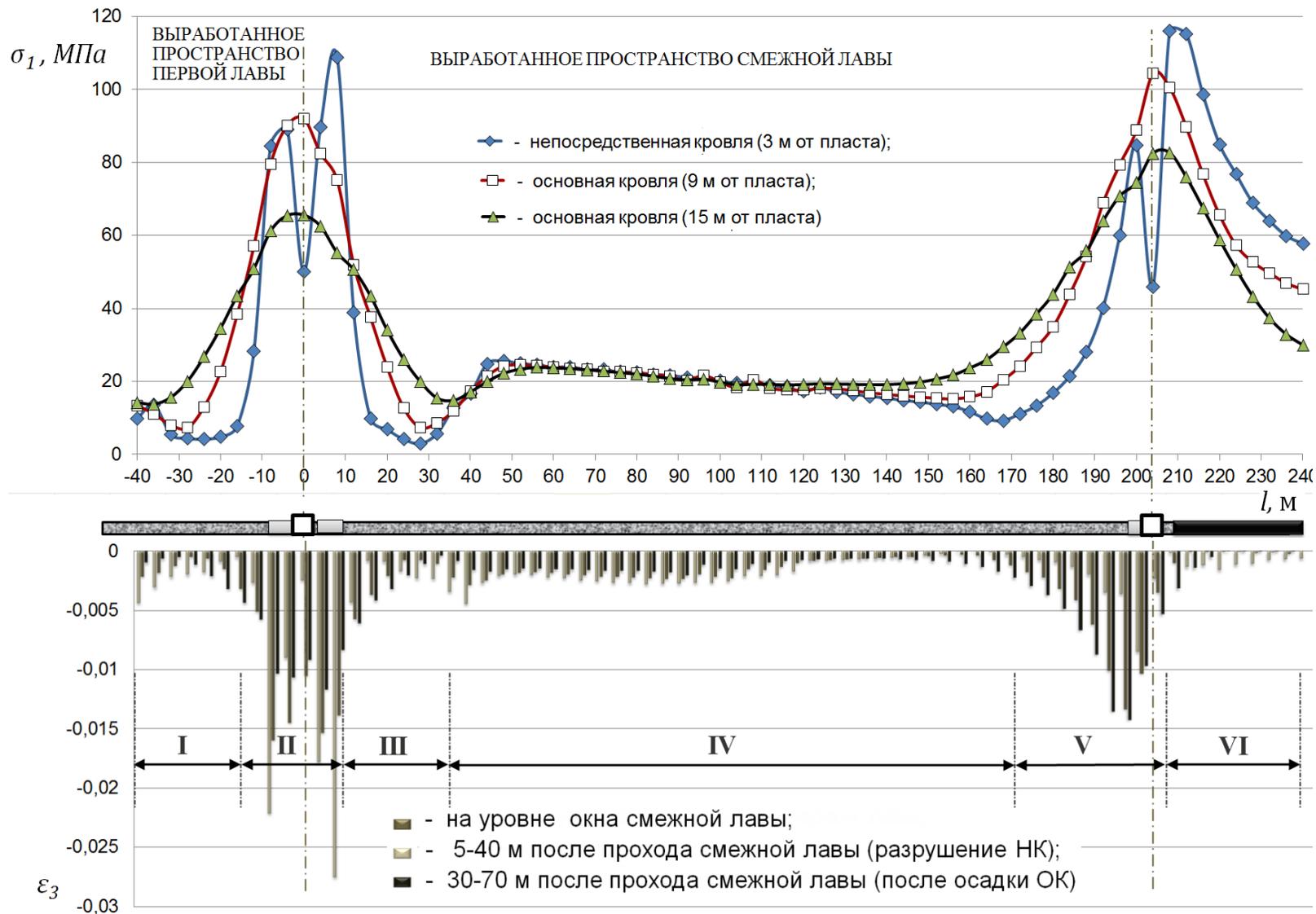
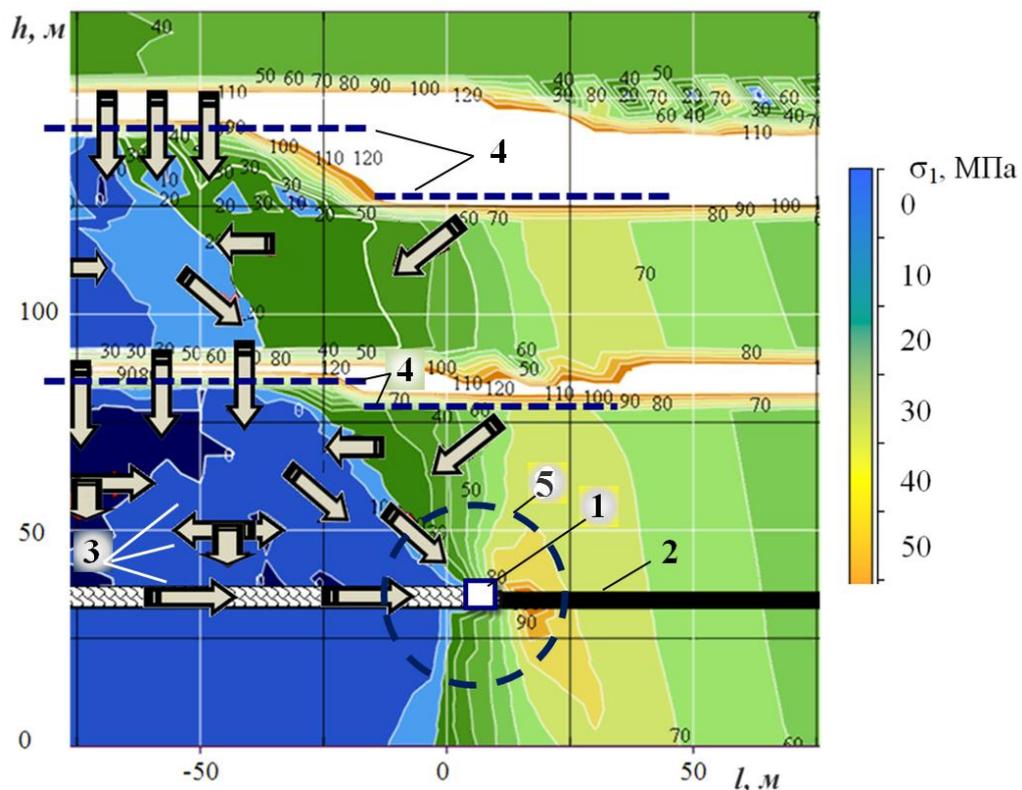


Рисунок 6 – Взаимосвязь изменений максимальных главных напряжений и объемов порово-трещинного пространства после отработки двух смежных лав

Наибольшую проницаемость породы имеют в зонах перегиба основной кровли, где наблюдается наибольшая интенсивность роста порово-трещинного пространства вследствие формирования систем трещин, ориентированных, в основном, по напластованию слоев кровли. На различных этапах отработки смежных лав породный массив в зонах II, III, и V разрушается последовательно, подключая к газодинамическому процессу новые контуры питания и изменяя характеристики дренирования. Зона VI характеризуется сжатием пор и трещин, что в свою очередь обеспечивает предельно низкую проницаемость горных пород в зоне ПГД.

В исследуемых областях при отработке смежных лав породы основной кровли имеют разную степень разрушения. Там где породы не разрушены, они являются природными препятствиями для фильтрации газов, а на разрушенных участках, характеризующихся сетью новых и раскрытием существующих трещин и пор, газы перемещаются в сторону горных выработок и выработанных пространств (на примере слоистого породного массива, рис. 7). Самые интенсивные сдвиги горных пород происходят над движущимся забоем лавы и за ним. Впереди очистного забоя в зоне динамического опорного давления напряжения превышают геостатические, проницаемость массива низкая до 1-2 мД.



1 – подготовительная горная выработка; 2 – угольный пласт; 3 – выработанное пространство; 4 – плоские контуры питания; 5 – кольцевой контур питания.

Рисунок 7 – Распределение максимальных главных напряжений σ_1 в слоистом породном массиве вокруг очистного забоя (стрелками показаны направления движения метана от газоносных пластов спутников)

В процессе ведения очистных работ происходит разрушение подработанных породных слоев, в результате чего метан из нарушенных газоносных пластов начинает мигрировать в выработанное пространство, создавая в массиве пород потоки различного направления и интенсивности. Анализ полученной в результате математического моделирования информации позволил выявить пути перемещения потоков метана через трещины в зонах сдвига и растяжения в выработанное пространство и рабочую зону лавы (показаны стрелками, см. рис. 7). При этом фильтрация газа в выработки происходит, в основном, из сближенных пластов и высокопористых песчаников, которые в сумме имеют большую мощность и могут интенсивно расслаиваться, выделяя в выработки значительные объемы накопившегося в образовавшихся полостях газа. При этом выделение метана из выработанного пространства в горные выработки выемочного участка в 2...3 раза превышает газовыделение из других источников. Наиболее интенсивный процесс газовыделения наблюдается во время прохождения забоя лавы или на некотором удалении за лавой, что соответствует периоду наибольших сдвижений массива пород. При высоком темпе подвигания очистного забоя интенсивное расслоение и разрушение кровли происходит в обрушаемой части массива, поэтому максимальное газовыделение происходит за линией очистных работ в области развития максимальных растягивающих напряжений.

Газовыделение из выработанных пространств в смежные выработки может изменяться в зависимости от глубины разработки, крепости вмещающих пород, длины очистных забоев и скорости их подвигания. С увеличением глубины разработки доля метановыделения из разрабатываемого пласта уменьшается, а из выработанных пространств увеличивается. Изменение составляющих газового баланса с глубиной связано: во-первых – с увеличением содержания газа в породах, вмещающих угольный пласт; во вторых – с ростом геостационарного давления и тектонических напряжений, что влияет на увеличение деформаций пород вокруг выработок, выработанных пространств и соответственно величину зон трещиноватости по которым поступает газ из более отдаленных участков породного массива. Увеличение прочности горных пород вокруг смежных выработок приводит к снижению газовыделения из выработанных пространств вследствие увеличения несущей способности пород и уменьшения количества газопроводящих трещин над выработанными пространствами. Увеличение длины лавы приводит к росту высоты свода зон разгрузки и газонасыщенные пласты, которые ранее не входили в контур газового питания, становятся новыми источниками газовыделения.

По результатам исследований можно сделать следующие **выводы**:

1. Снижение рисков возникновения аварийных и травмоопасных ситуаций на шахтах возможно путем обеспечения в оперативном режиме мониторинга параметров состояния горных пород вокруг выработок, оценки принимаемых решений с помощью информационных технологий прогнозирования напряженно-деформированного состояния пород и выработки мер по повышению уровня безопасности геотехнической системы. Это требует комплексирования методов оценки параметров протекания геомеханических и

газодинамических процессов для информационных систем превентивного контроля состояния массива пород.

2. Исходные условия для активизации газодинамических процессов вокруг горных выработок в процессе ведения горных работ предложено представлять в виде двух основных групп. Первая группа факторов определяется наличием и параметрами источников газовой выделению, которые могут быть представлены как плоские и кольцевые контуры питания. Вторая группа факторов определяется проницаемостью горных пород на пути фильтрации газов в выработки и разностью давлений между соответствующими контурами питания исследуемых интервалов и галереями стока на границах зон разгрузки (обнажений лав, выработанных пространств и подготовительных выработок).

3. Дальнейшее развитие получила модель фильтрационного переноса газов в породном массиве, которая отличается: определением изменений ориентировки в геопространстве и раскрытости систем магистральных трещин; расчетом компонент главных деформаций элементов геомеханической модели, характеризующих изменения структуры и формирование областей газового питания в процессе ведения горных работ. Полученные соотношения устанавливают взаимосвязи параметров геомеханического процесса (трещинной пористостью, углами падения и простирания систем трещин) с параметрами газодинамического процесса (интенсивностью, расходами и направлением перемещения газов), и могут быть интегрированы в информационные системы превентивного контроля состояния производственной среды шахт.

4. Для систем контроля производственной среды шахт обоснованы рациональные параметры геомеханического и газодинамического процессов в массиве пород: характеристики объемов, расположения и проницаемости порово-трещинного пространства, которые в наибольшей степени определяют расходы и пути фильтрации газов. Впервые на базе полученных параметров ориентации систем магистральных трещин техногенного происхождения и шаровой части тензора деформаций установлены закономерности изменений формы и объемов порово-трещинного пространства на различных этапах отработки смежных лав.

5. Доминирующим фактором, определяющим изменения деформационных и фильтрационных характеристик массива пород в процессе отработки смежных выемочных участков, служит специфика последовательной активизации процессов разрушения и интенсивности газопереноса в породном массиве: в зонах беспорядочного обрушения за лавой трещины разрыва не препятствуют движению газов в различных направлениях; в областях неупругого деформирования пород в условиях неравнокомпонентного сжатия максимальный газоперенос происходит по магистральным трещинам в направлении зон с пониженным давлением; в зонах опорного давления поры сжаты, а газопроницаемость пород предельно снижена до 1...2 мД.

Научные результаты положены в основу разработки аналитико-экспериментального метода контроля безопасности производственной среды шахт, а также создания информационной системы предупреждения опасных ситуаций на промышленных предприятиях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шевченко, В.Г. Обоснование параметров и разработка информационной системы безопасности ведения подземных горных работ с учетом геомеханических факторов / В.Г. Шевченко, А.И. Слащев // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепр, 2016. – Вып. 128. – С. 70-78. (на англ.)
2. О единой концепции техногенной безопасности угольных шахт / А.Ф. Булат, Т.В. Бунько, И.Е. Кокоулин И.Е. [и др.] // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. – Вып. 124. – С. 3-15.
3. Слащев, А.И. Обоснование параметров информационной системы обеспечения безопасности подземных горных работ / А.И. Слащев // Науковий вісник НГУ. – 2016. – №1. – С. 77–85.
4. Слащев, И.Н. Применение информационных технологий для повышения эффективности и безопасности горных работ / И.Н. Слащев // Уголь Украины. – 2013. – № 2. – С. 40-43.
5. Інформаційно-аналітичний матеріал щодо стану охорони праці та промислової безпеки на підприємствах вугільної промисловості за II квартал та I півріччя 2017 року [Ел. ресурс]. – Режим доступу: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245254303&cat_id=202151. – Загол. з екрану.
6. Булат, А.Ф. Разработка компьютерных систем математического моделирования геомеханических процессов / А.Ф. Булат, И.Н. Слащев // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 99. – С. 16-27.
7. Слащев, И.Н. Оптимизация информационной системы оперативного прогноза геомеханических процессов для поддержки принятия решений по безопасности шахт / И.Н. Слащев, В.Г. Шевченко, А.И. Слащев // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 112. – С. 129-144.
8. Обоснование исходных параметров для моделирования геомеханических процессов в задачах оценки безопасности поддержания горных выработок / А.А. Яланський, И.А. Сапунова, А.И. Слащев, Л.А. Новиков // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 119. – С. 282-295.
9. Слащева, Е.А. Особенности решения геомеханических задач для условий обводненного газонасыщенного массива горных пород / Е.А. Слащева, И.Н. Слащев, А.А. Яланский // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 115. – С. 232-244
10. Математическое моделирование в задачах оценки эффективности и безопасности горных работ: монография / М.Ю. Иконников, Ю.Р. Иконников, Е.А. Слащева, И.Н. Слащев, А.А. Яланский ; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Днепропетровск: НГУ, 2015. – 215 с.
11. Слащев, И.Н. Исследование процесса формирования зон разрушения в породном массиве при отработке смежных выемочных участков шахт / И.Н. Слащев, Е.А. Слащева // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепр, 2016. – Вып. 128. – С. 179-191.
12. Слащев И.Н. Оценка техногенной трещиноватости методами математического моделирования / И. Н. Слащев // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2010. – Вып. 85. – С. 239-250.
13. Система забезпечення надійного та безпечного функціонування гірничих виробок із анкерним кріпленням. Загальні технічні вимоги : СОУ 10.1.05411357.010:2014. – [Чинний від 2014-11-10] / А. Булат, О. Круковський, Ю. Буліч [та ін.] – Офіц. вид. – К. : Міненерговугілля України, 2014. – 84 с. – (Нормативний документ Міненерговугілля України. Стандарт).

REFERENCES

1. Shevchenko, V.G. and Slashchev, A.I. (2016), "Validation of parameters and design of information system on the underground mining job safety with taking into account geomechanical factors", *Geo-Technical Mechanics*, no. 128, pp. 70-78.
2. Bulat, A.F., Bunko, T.V., Kokoulin, I.Ye., Yashchenko, I.A., Shevchenko, V.G. and Zhalilov, A.Sh. (2015), "About the united conception of technogen safety of coal mines", *Geo-Technical Mechanics*, no. 124, pp. 3-15.
3. Slashchev, A.I. (2016), "Justification of the parameters of the information system assuring the underground mining safety", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no.1, pp. 77–85.

4. Slashchev, I.N. (2013) "The use of information technology to increase the efficiency and safety of mining operations", *Coal of Ukraine*, vol. 2, pp. 40-43, UA.
5. Information and analytical material on the state of occupational safety and industrial safety at the enterprises of the coal industry for the 2nd quarter and 1 st half of 2017 [Online], Retrieved from: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245254303 &cat_id=202151.
6. Bulat, A.F. and Slashchev, I.N. (2012), "Development of computer systems mathematical modeling geomechanical processes", *Geo-Technical Mechanics*, no. 99, pp. 16-27.
7. Slashchev, I.N., Shevchenko, V.G. and Slashchev, A.I. (2013), "Optimized information system for on-line predicting of geomechanical process behavior and ensuring proper decision-making on the mine safety", *Geo-Technical Mechanics*, no. 112, pp. 129-144.
8. Yalanskiy, A.A., Sapunova, I.O., Slashchev, A.I. and Novikov, L.A. (2014), "Justification of the initial parameters for geomechanical processes modeling in problems of safety assessment of mine workings maintenance", *Geo-Technical Mechanics*, no. 119, pp. 282-295.
9. Slashcheva, O.A., Slashchev, I.N. and Yalanskiy, A.A. (2014), "Features solutions for problems of geomechanical watery gas-saturated rock massif", *GeoTechnical Mechanics*, no. 115, pp. 232-244.
10. Ikonnikov, M.Yu., Ikonnikov, YU.R., Slashcheva, Ye.A., Slashchev, I.N. and Yalanskiy, A.A. (2015), *Matematicheskoye modelirovaniye v zadachakh otsenki effektivnosti i bezopasnosti gornykh robot* [Mathematical modeling in solving problems of evaluating the efficacy and safety of mining operations], Natsionalnyy gornyy universitet, Dnipropetrovsk, UA.
11. Slashchev, I.N. and Slashcheva, O.A. (2016), "Study of caving zone formation in the rock massif at mining adjacent panels in the mines", *Geo-Technical Mechanics*, no. 128, pp. 179-191.
12. Slashev, I.N. (2010), "Assessment technogenic fracturing methods of mathematical simulation", *Geo-Technical Mechanics*, no. 85, pp. 239-250.
13. Bulat, A., Krukovskyy, O., Bulich, YU., Burkov, A., Vivcharenko, O., Demidenko, O., Dyehin, A., Kurnosov, S., Leshchinskyy, S., Pylyuhyn, V., Popovych, I., Ryabtsyev, O., Slashchov, I., Smirnov, A., Khvorostyan, V., Cherednichenko, YU. and Yashchenko, I. (2014), *10.1.05411357.010:2014. Systema zabezpechennya nadiynoho ta bezpechnoho funkcionuvannya hirnychkykh vyrobok iz ankernym kriplennyam. Zahalni tekhnichni vymohy: Normatyvnyy dokument Minvuhlepromu Ukraïny. Standart* [10.1.05411357.010:2014. System for ensuring reliable and safe functioning of mining workings with anchorage. General technical requirements: Regulatory Document Coal Industry of Ukraine. Standard], Ukraine Ministry of Coal Industry, Kiev, Ukraine.

Об авторах

Булат Анатолий Федорович, Академик Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, директор института, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ им. Н.С. Полякова НАНУ), Днепр, Украина, gtm.bulat@gmail.com

Слащев Игорь Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела Проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ им. Н.С. Полякова НАНУ), Днепр, Украина, IMSlashchov@nas.gov.ua

Слащева Елена Анатольевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела Проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины), Днепр, Украина, OASlashchova@nas.gov.ua

About the authors

Bulat Anatoly Fedorovich, Academician of the National Academy of Science of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Director of the Institute, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics, National Academy of Sciences of Ukraine (M.S. Polyakov IGTM NASU), Dnepr, Ukraine, gtm.bulat@gmail.com

Slashchov Igor Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in the Department of Mineral Mining at Great Depths, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics, National Academy of Sciences of Ukraine (M.S. Polyakov IGTM NASU), Dnepr, Ukraine, IMSlashchov@nas.gov.ua

Slashchova Yelena Anatolyevna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in the Department of Mineral Mining at Great Depths, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical

Анотація. У статті наведено результати досліджень комплексування методів оцінки параметрів геомеханічних і газодинамічних процесів в породному масиві для систем контролю безпеки шахт. Подальший розвиток отримала модель фільтраційного переносу газів в породному масиві при відпрацюванні вугільних пластів суміжними лавами, яка відрізняється: визначенням змін орієнтування в геопросторі і розкритості систем магістральних тріщин; розрахунком компонент головних деформацій елементів геомеханічної моделі, що характеризують зміни структури і формування областей газового живлення в процесі ведення гірничих робіт. Встановлено, що: в зонах обвалення за лавою тріщини розриву не перешкоджають руху газів в різних напрямках; в областях непружного деформування порід в умовах неравнокомпонентного стиснення максимальний газоперенос відбувається по магістральним тріщинам в напрямку зон зі зниженим тиском; в зонах опорного тиску пори стиснуті, а газопроникність порід суттєво знижена до 1...2 мД. Для систем контролю виробничого середовища шахт обґрунтовані раціональні параметри геомеханічного і газодинамічного процесів в масиві порід, зокрема, характеристики об'ємів, розташування та проникності порово-тріщинного простору, які найбільшою мірою визначають інтенсивність міграції газів і шляхи їх фільтрації. Вперше на базі параметрів орієнтації систем тріщин техногенного походження і кульової частини тензора деформацій встановлені закономірності змін форми й об'ємів порово-тріщинного простору на різних етапах відпрацювання суміжних лав. Наукові результати покладені в основу розробки аналітико-експериментального методу контролю виробничого середовища шахт, а також створення інформаційних систем безпеки на промислових підприємствах.

Ключові слова: геомеханічні і газодинамічні процеси, проникність, фільтрація, моделювання масиву порід, системи контролю безпеки шахт

Abstract. The article presents results of investigations on validation of parameter complex for interconnected geomechanical and gas-dynamic processes in the rock massif for mine safety control systems. Model of gas filtering transfer in the rock massif during the coal-seam mining by adjacent longwalls was further developed; the model differs by calculation of components of main deformations of geomechanical model elements, which are indicators of changed structure and formation of areas with gas accumulation and escape, as well as changed orientation of geospace and openness of the main crack systems in the processes of mining operations. It is established that: in zones with random roof falling behind the longwall face, fracture cracks do not impede gases to flow in various directions; in areas with the rock inelastic deformation and non-uniform compression, maximum gas transfer occurs along the main cracks developed towards zones with reduced pressure; in areas with reference pressure, pores are compressed, and rock permeability to gas is extremely low, not more than 1...2 mD. Rational parameter complex of interconnected geomechanical and gas-dynamic processes in the rock massif were validated for the control systems in the mine working medium, including such characteristics as volumes, location and gas permeability of the pore-cracked space, which are the key factors for determining intensity of gases migration and ways of their filtration. It is for the first time when regularities of changes of the pore-cracked space shape and volume at different stages of the adjacent longwall mining were established basing on parameters of orientation of the fracture systems, caused by technogeneus disturbance, and spherical part of the strain tensor. The obtained scientific results presents a basis for developing experimental-and-analytical methods for controlling working medium in mines and creating safety information systems for industrial enterprises.

Keywords: geomechanical and gas-dynamic processes, permeability, filtering, modeling of the rock massif, mine safety control systems.

Стаття поступила в редакцію 21.07. 2017

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук С.А. Курносovým