

УДК 622.831.312 : 622.817

Булат А.Ф., Акад. НАНУ, д-р техн. наук, профессор,
Слащев И.Н., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
(ИГТМ НАН України)

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОДУКТОВ РАСПАДА РАДОНА
КАК ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ
ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

Булат А.Ф., Акад. НАНУ, д-р техн. наук, професор,
Слащов І.М., канд. техн. наук, ст. наук. співр.
(ІГТМ НАН України)

**ВИКОРИСТАННЯ ПРОДУКТІВ РАСПАДА РАДОНОУ
ЯК ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ОЦІНКИ
ГЕОМЕХАНІЧНОГО СТАНУ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

Bulat A.F., Acad. NASU, D. Sc. (Tech.), Professor,
Slashchev I.N., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher
(IGTM NAS of Ukraine)

**THE USE OF RADON DECAY PRODUCTS
AS INFORMATIVE PARAMETERS FOR EVALUATION
OF THE ROCKS GEOMECHANICAL CONDITION**

Аннотация. В статье приведены результаты исследований процесса поступления обогащенной радоном воздушной (или метановоздушной) смеси из массива пород в атмосферу горных выработок. Показано, что параметры изменений активности α -излучений отдельных изотопов радона, концентраций метана и их соотношений могут быть использованы для прогнозирования геомеханических и газодинамических процессов в породном массиве путем дифференциации во времени изменений напряженно-деформированного состояния пород и порово-трещинного пространства вокруг выработок в процессе ведения горных работ. Это связано с закономерностями распада изотопов радона, эмиссии дочерних продуктов распада радона и газопереноса метана во времени от источников их образования в горные выработки, так как, во-первых, изменения концентрации изотопа Po^{218} с учетом времени его распада зависят от изменения трещиноватости ближней к контуру выработки части горных пород. Во-вторых, изменения отклонений от среднего уровня концентрации дочерних продуктов распада радона характеризуют процессы трансформации объемов порово-трещинного пространства в процессе ведения горных работ. Это позволяет, при известных параметрах проницаемости пород и фильтрации изотопов радона, прогнозировать изменения геомеханического состояния не только приконтурных, но и удаленных от выработки зон породного массива.

Ключевые слова: продукты распада радона, геомеханические процессы, проницаемость, фильтрация, моделирование массива пород, прогнозирование геомеханического состояния

В ранее выполненных работах [1-3] достаточно аргументированно был показан механизм образования аномальных зон радона в воздухе на поверхности земли, в помещениях, в подземных водах. В работах [4, 5] обоснованы теоретические предпосылки и проведена аналитико-экспериментальная оценка [5]

условий фільтрації в породному масиві газу метану спільно з продуктами розпаду радона і змінення їх фізических параметрів в горних виробках шахт. Показано, що в атмосфері горних виробок об'ємна активність α -випромінювання (еманація) дочерніх продуктів розпаду (ДПР) радона визначається проникністю всієї порушеної горними роботами зони породного масива, яка має максимальні значення в зонах неупругих деформацій і тектоніческх порушень, на виходах магістральних тріщин і в вироботаних пространствах очистних забоев.

Вместе с тем, процеси і закономірності поступлення обогаченних радоном повітряної (або метановоздушною) суміші із приконтурної і більш віддалених від обнаження зон породного масива в атмосферу горних виробок з урахуванням трансформації порово-тріщинного пространства під впливом горних робіт вивчені недостатньо і потребують дальніших досліджень.

В зв'язі з тим, що радон представляє собою нестійкий газ з дуже хорошою проникаючою здатністю, його підвищене (або понижене) вміщення в виробках визначається сукупністю змін двох основних груп факторів: активністю джерела утворення радона (і, відповідально, продуктів його розпаду) і напружено-деформованим станом породи на шляху переносу радіоактивних газів від джерела до обнаження горної виробки. Оскільки родовища корисних копалин формувалися тисячі років в умовах постійного радіоактивного розпаду ізотопів урану, то активність джерел вихідного радіаційного поля в межах шахтного поля достатньо постійна. Тому в нетрубоватому породному масиві радон, як результат ділення урану, заповнює вільне порове пространство відносно рівномірно (за винятком зон геологіческх порушень). В той же час змінення параметрів напружено-деформованого стану породи надають суттєво більше впливу на міграцію газів в масиві і їх поступлення в горні виробки. Це пов'язано з тим, що в результаті неперервних змін фізических властивостей горних порід в зонах неупругих деформацій і зростанню техногенних навантажень на породний масив в процесі ведення горних робіт відбувається проростання і заповнення газами знову утворених тріщин. При цьому особливістю еманационних газопотоків є їх розподіл не тільки по великим геологіческх порушенням і тектоніческх зонам, а й по малоамплітудним зонам і малим тріщинам частково порушеними міжмолекулярними зв'язями.

Так як горні породи представляють собою багатокомпонентні системи, включаючі тверду, рідину і газоподібну фази, то рух газів в пористій і тріщинуватій середі має ряд особливостей. Така середа складається з великої кількості випадково розташованих зерен різної форми і розміру. Тому пространство, в якому рухається газ, представляє собою систему пор і тріщин, неперервно переходящих одна в другу. Нерегулярний характер структури порового пространства не дозволяє вивчати рух газів в ньому безпосереднім застосуванням звичайних методів гідродинаміки, т. є. шляхом розв'язання рівнянь руху в'язкої рідини для області, представляючої собою

совокупность всех пор и трещин. Вместе с тем, в таком решении и нет необходимости, так как с увеличением числа отдельных микродвижений, составляющих макроскопическое фильтрационное течение, начинают проявляться суммарные статистические закономерности, характерные для движения газов в целом и несправедливые для одного порового (или порово-трещинного) канала или нескольких каналов. Возникающая ситуация характерна для систем с большим числом элементов, которые слабо связаны между собой. Такие системы могут быть описаны как некоторые сплошные среды, свойства которых не выражаются непосредственно через свойства составляющих элементов, а являются осредненными характеристиками больших объемов среды.

Адвекция радона (его перемещение с сохранением свойств) происходит под действием градиентов давления в земной коре, газоподъемной силы при заполнении пор водой, турбулентных эффектов за счет процессов теплообмена, газопереноса, влагооборота и др. Математическое описание разных процессов и механизмов переноса изотопов радона, кроме молекулярной диффузии, являются труднопрогнозируемыми и к настоящему времени недостаточно изучены. Тем не менее, для определения скорости адвекции предложено несколько способов. Например, у нас и за рубежом наиболее распространен подход, в котором скорость адвекции рассматривают как скорость фильтрационного переноса радона [5-8], который описывается законом Дарси. Закон Дарси в дифференциальной форме для одномерного фильтрационного потока (в данном случае по оси абсцисс) и при пренебрежении силами тяжести определяет скорость фильтрации

$$v = -\frac{K}{\mu} \frac{dp}{dl} = -\frac{K}{\mu} \frac{p_2 - p_1}{x_2 - x_1}, \quad (1)$$

где K – коэффициент проницаемости пористой среды, м^2 ; μ – динамическая вязкость фильтрующейся жидкости или газа, $\text{Па}\cdot\text{с}$; $x_2 - x_1 = dl$ – расстояние между сечениями вдоль оси абсцисс, м ; p_1, p_2 – давление в сечениях начала и конца интервала, соответственно, отстоящих на расстоянии dl друг от друга, Па .

Для двух- и трехмерных фильтрационных потоков используют методы суперпозиции осевых скоростей фильтрации.

Если при больших расходах вследствие возникновения турбулентности и дополнительными потерями давления закон Дарси нарушается, то объемный расход Q , отнесенный к среднему давлению в фильтрационном потоке $(p_1 + p_2)/2$ определяется из выражения

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

где Q – расход, $\text{м}^3/\text{с}$; F – площадь поперечного сечения потока, м^2 ; l – длина пути фильтрации, м .

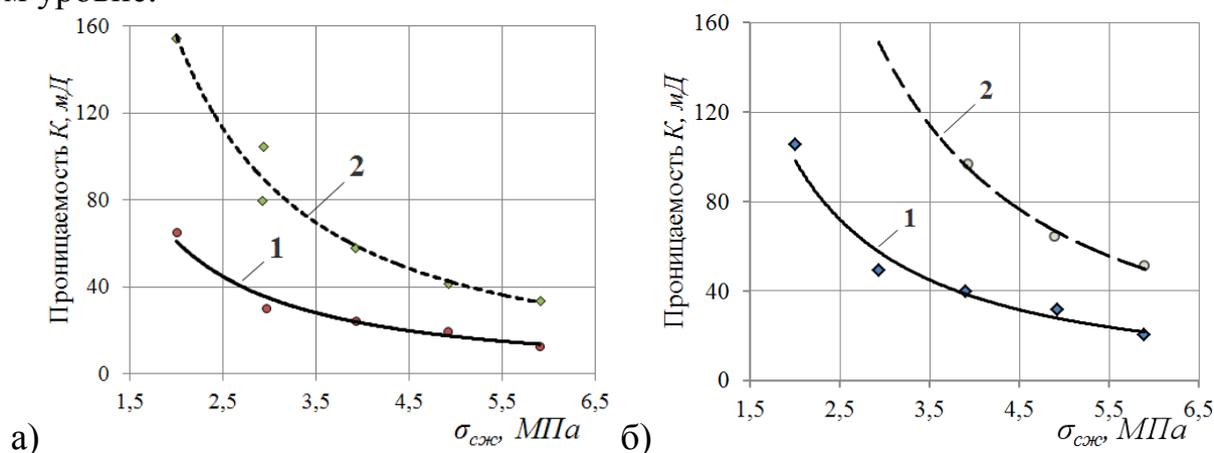
Если рассчитывается расход в области разгрузки радиусом r , с радиусом

кругового контура дренирования R и толщиной проницаемого слоя h , то расход газов по формуле Ж. Дюпюи (интегральная форма закона Дарси для случая плоскорадиального установившегося потока) определяется из выражения

$$Q = \frac{\pi h K (p_2^2 - p_1^2)}{p_a \ln \frac{R}{r}}, \quad (3)$$

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

При равных условиях объемного сжатия проницаемость горных пород и диффузионная способность фильтрующихся через них воздуха, метана и радона будут ключевыми информативными параметрами, по которым можно определять степень трещиноватости породного массива в зонах неупругих деформаций. Высокая проникающая способность инертного радиоактивного газа радона объясняет его свойство селективно проникать (фильтроваться) через очень мелкие поры и микротрещины горных пород. Газ метан (CH_4) имеет диффузионную способность в 1,6 раз больше, чем у воздуха, вследствие чего он может вместе с радоном проникать через пористые и трещиноватые горные породы. Различие проницаемостей для метана (K_{CH_4}) и инертного газа (гелия (K_{He}), как наиболее близкого по диффузионной способности и миграционным свойствам к радону) иллюстрируют построение и анализ сравнительных зависимостей по результатам лабораторных исследований ИГТМ НАНУ образцов угля шахт «Суходольская № 1» и «Ясиновская-Глубокая» (рис. 1). Замеры осуществлялись через различные промежутки времени, начиная с момента, когда в образце устанавливалась постоянная скорость фильтрации и по истечении 22 часов, в течение которых была приложена внешняя загрузка, поддерживаемая на прежнем уровне.



1 – проницаемость для метана; 2 – проницаемость для инертного газа

Рисунок 1 – Проницаемость образца угля для инертного газа и метана под воздействием сил объемного сжатия $\sigma_{сж}$ (МПа) при различных градиентах газового давления:

а – $\Delta p = 0,5$ МПа ($K_{\text{He}} = 422 \sigma_{сж}^{-1,4}$, $R^2 = 0,97$; $K_{\text{CH}_4} = 160 \sigma_{сж}^{-1,4}$, $R^2 = 0,97$);
 б – $\Delta p = 0,2$ МПа ($K_{\text{He}} = 837 \sigma_{сж}^{-1,6}$, $R^2 = 0,99$; $K_{\text{CH}_4} = 259 \sigma_{сж}^{-1,4}$, $R^2 = 0,97$).

Изменение усилий гидрообжима на образцах в пределах от $\sigma_{сж} = 1$ МПа до $\sigma_{сж} = 6$ МПа при градиенте давления $\Delta p = 0,5$ МПа ($\Delta p = p_2 - p_1$) приводит к снижению проницаемости по метану на 50 мД, по инертному газу на 120 мД (рис. 1, а), а при градиенте давления 0,2 МПа – на 80 мД и 90 мД, соответственно (рис. 1, б). При значениях объемных напряжений в диапазоне 2...6 МПа проницаемость среды по метану и инертному газу снижается на 15-35 %, а по абсолютным значениям инертный газ имеет в 2,0-2,7 раз большую диффузионную способность, чем метан ($n = K_{He}/K_{CH_4}$, среднее взвешенное значение коэффициента $n = 2,4$, рис. 2). Как показано на графиках, отклонения этого показателя в зависимости от сжимающих напряжений не превышает 22-28 %.

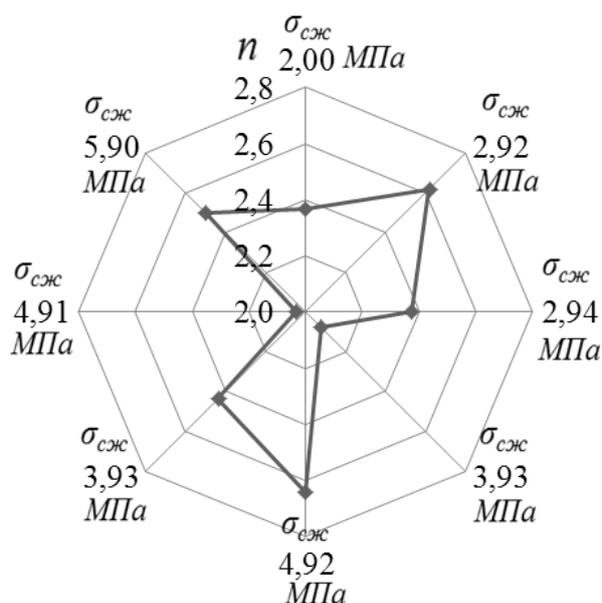


Рисунок 2 – Различия проницаемости инертного газа и метана под воздействием сил объемного сжатия

Анализ сравнительных зависимостей показал, что в зонах упругого деформирования горных пород вокруг выработок в условиях роста опорных давлений происходит сжатие пор и микротрещин, проницаемость пород для всех газов снижается. Вместе с тем, благодаря высокой диффузионной способности инертных радиоактивных аэрозолей появляется возможность проводить фиксацию даже незначительных изменений напряжений и деформаций. Количественные показатели отличия проницаемостей инертных газов и метана дают возможность использовать новые интегральные критерии для контроля состояний горных пород.

Полученные данные используются для формализации граничных условий в методологии оценки совместного протекания геомеханических и газодинамических процессов в породном массиве, а также решения задач фильтрации газа метана, радона и продуктов его распада в горные выработки.

В атмосферу горных выработок образующиеся в процессе распада и эманации ДПР радона попадают путем диффузии через поры и микротрещины горных пород, где они захватываются струями воздуха (и газа метана, в случае его наличия) и перемещаются к обнажениям на значительные расстояния. Относительное постоянство природных источников поступления ДПР радона и их изменчивость под воздействием сил горного давления создает предпосылки для идентификации изменений параметров происходящих в породном массиве геомеханических и газодинамических процессов непосредственно из горных выработок. Несмотря на то, что атмосфера горных выработок представляет собой постоянно изменяющуюся сложную неравновесную смесь газов и пыли, наличие радиометрических маркеров характеризует именно состояние горных пород

независимо от изменений параметров шахтной атмосферы, вызванных работой систем вентиляции. Так как процессы разрушения горных пород и фильтрации газов взаимосвязаны, то для практических расчетов необходимо иметь представления о деформациях порово-трещинного пространства и ориентации газо-проводящих трещин вокруг горных выработок.

Для оценки объемов порово-трещинного пространства можно использовать закономерности изменения деформаций пород вокруг горных выработок. В большинстве случаев объемные деформации сжатия, растяжения, изгиба и др. представляют собой комбинацию простейших видов деформаций – линейную и сдвиговую. Линейные деформации оценивают показателем относительной линейной деформации, равным отношению приращения линейного размера элементарного макрообъема к исходному, а деформации сдвига определяют по величине угла сдвига его грани. Для определения объемных деформаций используют принцип суперпозиции. В предложенной математической модели [5, 9, 10], реализуемой на базе метода конечных элементов, общая деформация элемента модели (тензор деформации) описывается суммой векторов узловых перемещений и подразделяется на шаровую и девиаторную части. Девиаторная часть тензора деформаций характеризует изменение формы элементов породного массива в процессе разрушения. Шаровая часть тензора деформаций определяется величиной минимальных главных нормальных деформаций элементов модели, которые будут характеризовать изменения объема порово-трещинного пространства, а, следовательно, и его проницаемость. Принимается допущение, что деформация пористой среды равна изменению объема порово-трещинного пространства, поскольку сжимаемость частиц скелета ничтожно мала по отношению к общей сжимаемости породы.

Расчет главных деформаций выполняется по формулам [11] механики горных пород:

– для зон упругого деформирования

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= 0,5 \left((\varepsilon^x + \varepsilon^y) + \sqrt{(\varepsilon^x - \varepsilon^y)^2 + 4\gamma^{xy^2}} \right), \\ \varepsilon_3 &= 0,5 \left((\varepsilon^x + \varepsilon^y) - \sqrt{(\varepsilon^x - \varepsilon^y)^2 + 4\gamma^{xy^2}} \right),\end{aligned}\quad (4)$$

где ε^x , ε^y – нормальные компоненты тензора деформаций по координатным осям x и y , определяемые в результате решения матрицы жесткости системы; γ^{xy} – деформации поперечного сдвига;

– для зон неупругого деформирования предельные максимальные главные деформации, выраженные через фактический предел прочности породы и ее реальные физико-механические свойства

$$\varepsilon_1^{\text{lim}} = \frac{\sigma_1^{\text{lim}} (1 - \nu_i^2)}{E \left(1 + \nu \operatorname{ctg} \xi - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} (\operatorname{ctg} \xi + \nu) \right)}, \quad (5)$$

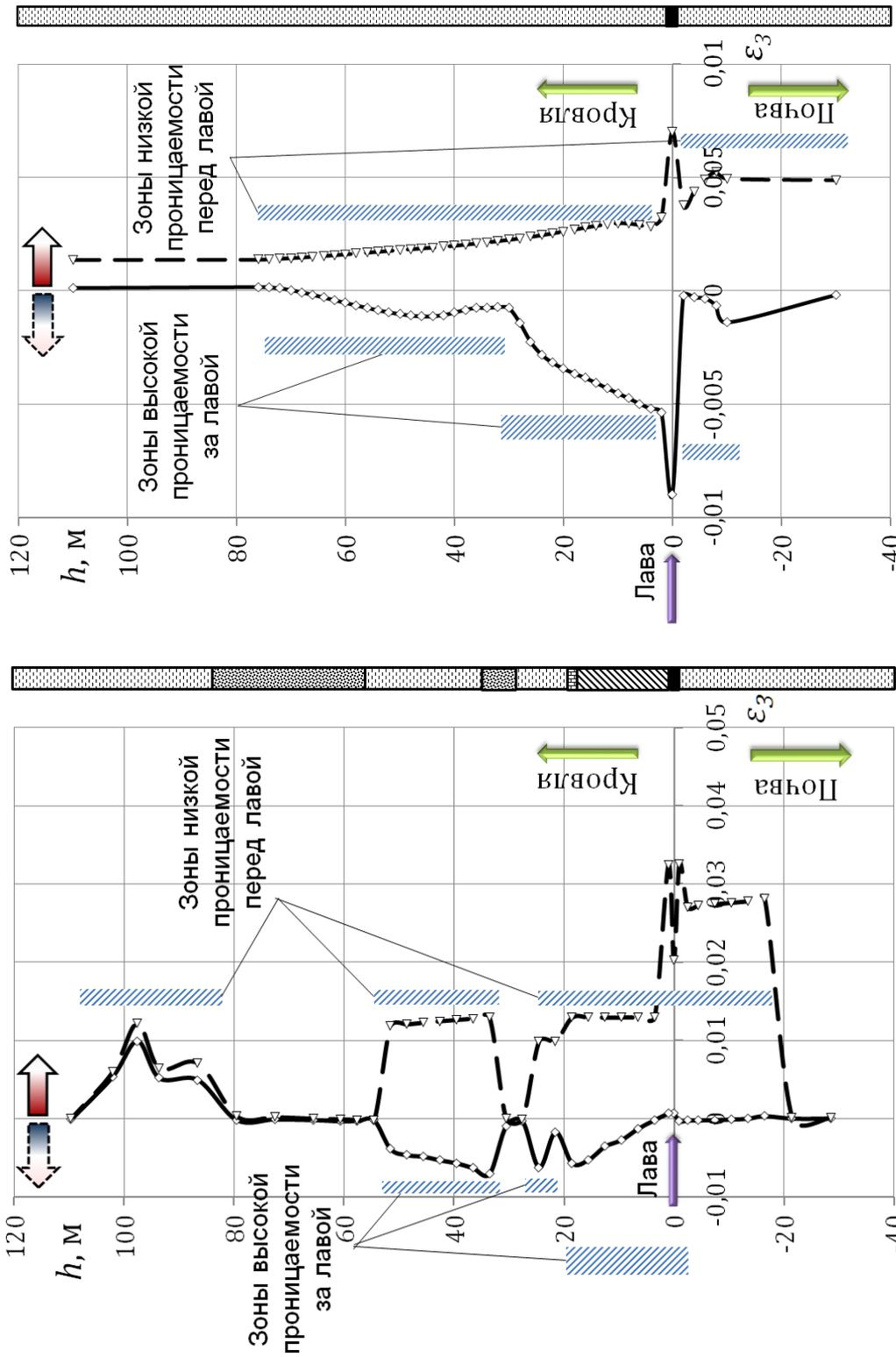
где σ^{lim} – предельные максимальные главные напряжения, МПа; E – модуль упругости, МПа; ν – коэффициент Пуассона; φ – угол внутреннего трения, град.

Имея результаты решения уравнений (4, 5) получаем векторы, содержащие значения минимальной и максимальной компонент упругих и неупругих деформаций. В уравнении (5) минимальная главная предельная деформация $\varepsilon_3^{\text{lim}}$ представлена как функция максимальной главной деформации через заданный параметр $\operatorname{ctg} \xi$ ($\varepsilon_1 \operatorname{ctg} \xi = \varepsilon_3$), определяющий закон пластического течения (при $\xi = \pi/4$ – течение равнообъемное). Значения рассчитанных главных деформаций в результате вычислений равны фактическим главным деформациям, которые соответствуют заданной деформационной модели среды.

Данные, определяющие трансформацию объемов порово-трещинного пространства в процессе отработки смежных выемочных столбов, исследованы для двух условий: для однородной кровли (по усредненным показателям физико-механических свойств пород, рис. 3, а) и для слоистой кровли (свойства горных пород соответствовали условиям отработки пласта m_3 , рис. 3, б). Расчеты проведены вычислительным комплексом «GEO-RS» (разработка и программная реализация функций системы выполнена на базе исследований ИГТМ НАНУ [8, 10, 12, 13]). Выделены три основные зоны, влияющие на газоперенос: зона беспорядочного обрушения за лавой, где движение газовых потоков неограниченно во всех направлениях (зона высокой проницаемости); зона неупругого деформирования при неравнокомпонентном сжатии, где газоперенос происходит по магистральным трещинам; зону повышенного горного давления перед лавой (низкой проницаемости), где поры сжаты, вследствие чего газопроницаемость пород существенно снижена. Особенностью движения метана и радона в указанных зонах является весьма сложная неравномерность скоростного поля. Переформирование скоростного поля обуславливает большие потери энергии потока при его движении поперек слоистости пород или через зоны концентрации напряжений (меньшее количество магистральных трещин), чем объясняется пониженный коэффициент фильтрации газов в выработку напрямую из основной кровли.

Важным фактором для оценки поступления радона и метана в горные выработки является определение ориентации в геопространстве газопроводящих трещин вокруг горных выработок.

При ведении горных работ образуются дополнительные системы трещин, параметры которых зависят от изменения поля напряжений и деформаций. В условиях неравнокомпонентного сжатия для определения ориентации трещин скалывания необходимо построение площадок сдвига (вдоль которых направлены максимальные сдвигающие силы) для каждого элемента расчетной схемы.



б)

а)

Рисунок 3 – Трансформация порово-трещинного пространства на границе смежных лав, определенная по изменениям минимальных главных деформаций ϵ_3 слоев кровли и почвы в процессе отработки выемочного столба: а – однородная кровля (по усредненным показателям породам физико-механических свойств пород); б – слоистая кровля

Предложена методология, которая, в отличие от известных решений, позволяет определять линии скольжения в условиях деформационной упругопластической модели среды с разупрочнением и учетом остаточной прочности, а также проводить интерактивный анализ всей исследуемой области по главенствующим структурным дефектам в реальном массиве пород. Ориентация векторов максимальных главных деформаций для всей исследуемой области определяется в результате вычисления параметров напряженно-деформированного состояния породного массива методом конечных элементов и исполнения процедуры метода начальных напряжений по значениям главных деформаций и деформаций поперечного сдвига. В связи с тем, что механизм пластической деформации связан со сдвигами по площадкам скольжения, то в зоне неупругих деформаций реализация условия предельного состояния происходит на двух площадках, наклоненных под углами β_1 и β_2 к вектору максимального главного сжимающего напряжения. Значения углов наклона проекций площадок скольжения на плоскость расчетной схемы для каждого элемента определяется выражением

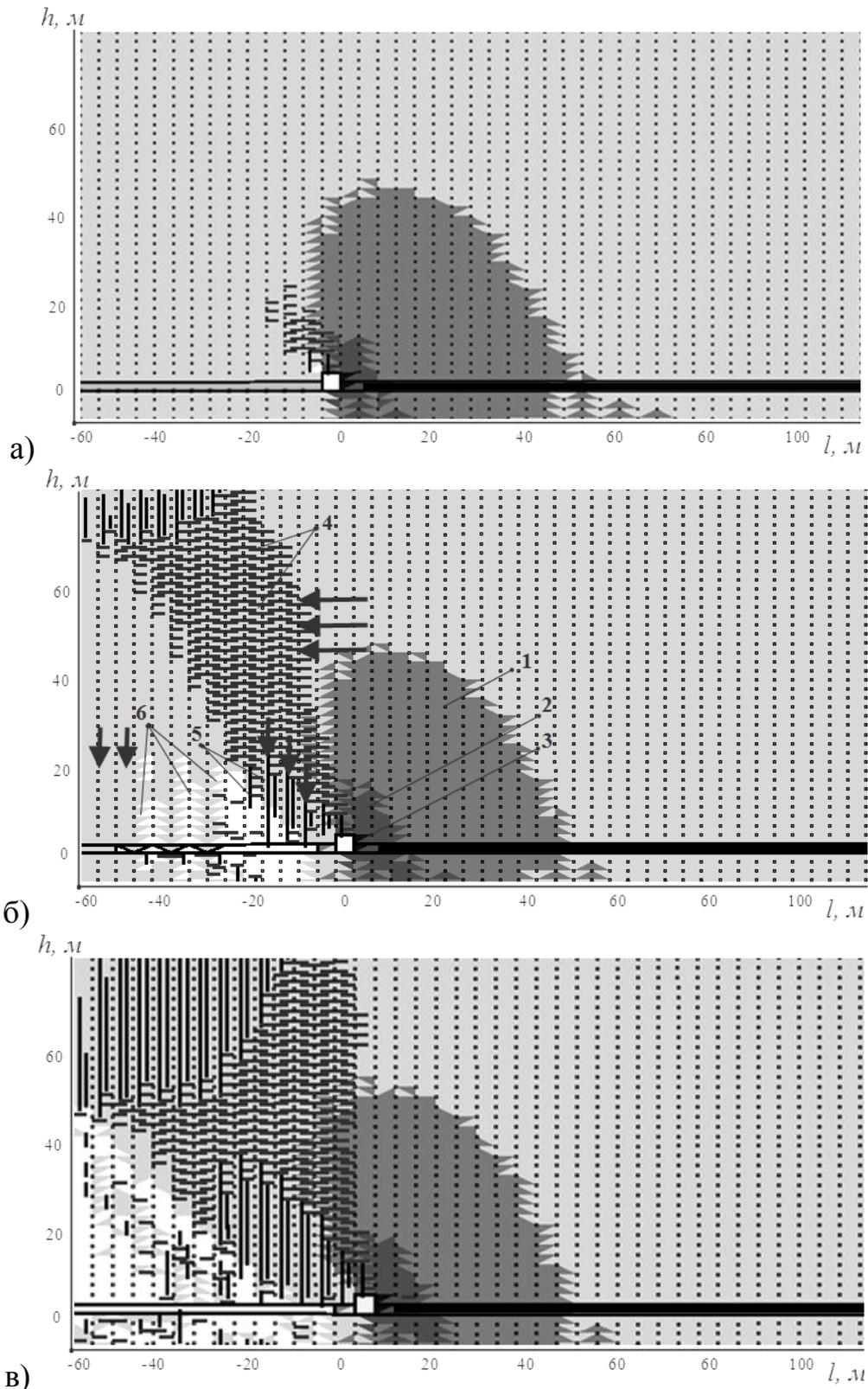
$$\beta_1, \beta_2 = \alpha_{\varepsilon}^{xy} \pm (\pi/4 - \varphi/2). \quad (6)$$

где $\alpha_{\varepsilon}^{xy}$ – углы наклона векторов максимальных главных деформаций, которые показывают, насколько бывшее поперечным до деформации сечение отклоняется от поперечного сечения деформированного элемента

$$\alpha_{\varepsilon}^{xy} = 0,5 \arctg \left(2\gamma^{xy} / (\varepsilon_1 - \varepsilon^y) \right). \quad (7)$$

Рассмотрим динамику развития геомеханических и газодинамических процессов при отработке очистного забоя (рис. 4). На границе сопряжения нетронутого массива с подработанными породами кровли лавы образуется зона наибольшего прогиба пород кровли. В слоях этой зоны возникают деформации растяжения, направленные перпендикулярно напластованию. По мере прохода первой лавы и посадки основной кровли деформации зоны наибольшего прогиба увеличиваются. Это приводит к расслоению пород, повышению объемов порово-трещинного пространства, что является причиной увеличения в десятки раз фильтрационной способности и проницаемости пород, особенно по направлению напластования (рис. 4, б, в). Зона наибольшего прогиба граничит с зоной полных сдвижений со стороны подработанного лавой массива и с зоной опорного давления со стороны нетронутого массива. Очевидно, что при подвигании лавы эти зоны тоже увеличиваются.

При этом зона полных сдвижений разгружается и характеризуется пониженными давлениями и весьма высокой проницаемостью, связанной с большим раскрытием систем техногенных трещин. В зоне опорного давления происходит противоположный процесс, который характеризуется повышенными давлениями и низкой проницаемостью (последнее происходит вследствие упругого деформирования и частичного закрытия существующих трещин).



1, 2, 3 – зоны повышенного горного давления с коэффициентом концентрации максимальных главных напряжений 1,5, 2,0 и 2,5, соответственно; 4 – зоны расслоений пород, преимущественно с горизонтальными системами трещин; 5 – зоны с горизонтальными и вертикальными системами трещин; 6 – зона беспорядочного обрушения кровли; стрелками показаны доминирующие направления газопереноса

Рисунок 4 – Динамика изменения максимальных главных напряжений и развитие систем трещин вокруг горной выработки: а – впереди лавы, б – в створе лавы, в – в зоне обрушения

Газоперенос в породном массиве происходит из зон повышенного давления в зоны пониженного давления по системам связанных трещин, следующим образом. После прохода лавы и осадки основной кровли свободный метан и ДПР радона из расслоившихся газоносных пород зоны наибольшего прогиба поступает сначала в подработанные породы, а затем в рабочее пространство лавы и выработку. Одновременно в зоне наибольшего прогиба снижается газовое давление и сюда поступают газы из нетронутого массива кровли, который дальше перемещается в породы зоны полных сдвижений, а затем в рабочее пространство лавы. Таким образом, газоперенос происходит по старым и вновь образовавшимся системам трещин из верхних газоносных слоев с большими давлениями в нижние слои зоны полных сдвижений, где давление ниже. И чем больше происходит рост техногенной трещиноватости, тем более глубинные зоны породного массива затрагивает этот процесс.

Как показано на рис. 4 под влиянием горных работ происходит активизация процессов газопереноса метана и продуктов распада радона. Основной поток метана и инертных газов перемещается в горные выработки по магистральным трещинам через зоны беспорядочного обрушения над отработанной лавой или через зоны геологических нарушений. Это подтверждается результатами измерений ДПР радона в конвейерном ходке восточной уклонной лавы, рис. 5, которые показали, что в местах дислокации геологических нарушений концентрация дочернего продукта распада радона α -излучения Po^{218} возрастает более, чем в 2-4 раза по отношению к среднему по выработке значению. На базе указанного критерия предложено использовать радиометрический мониторинг горных выработок для выявления локаций вновь образовавшихся в процессе деформирования систем трещин в качестве одного из элементов метода комплексного неразрушающего контроля состояния породного массива.

В зоне повышенного горного давления в результате разрушения горных пород и развития систем трещиноватости не только выделяется повышенное количество радона, а и значительно преобладает количество короткоживущих изотопов над долгоживущими, то есть происходят процессы, сопровождающие увеличение интенсивности горного давления. Поэтому определение мест интенсивной эманационной активности ДПР радона позволяет заблаговременно обнаруживать участки горных выработок со скрытыми малоамплитудными тектоническими нарушениями и повышенными концентрациями напряжений. Это связано с закономерностями распада изотопов радона, эмиссии дочерних продуктов распада радона и газопереноса метана во времени от источников их образования в горные выработки, так как, во-первых, изменения концентрации изотопа Po^{218} с учетом времени его распада зависит от изменения трещиноватости приконтурной части горных пород. Во-вторых, изменения отклонений от среднего уровня концентрации ДПР радона зависят от трансформации объемов порово-трещинного пространства в процессе ведения горных работ, что позволяет, при известных параметрах проницаемости и фильтрации, прогнозировать изменения состояния не только приконтурных, но и дальних зон породного массива.

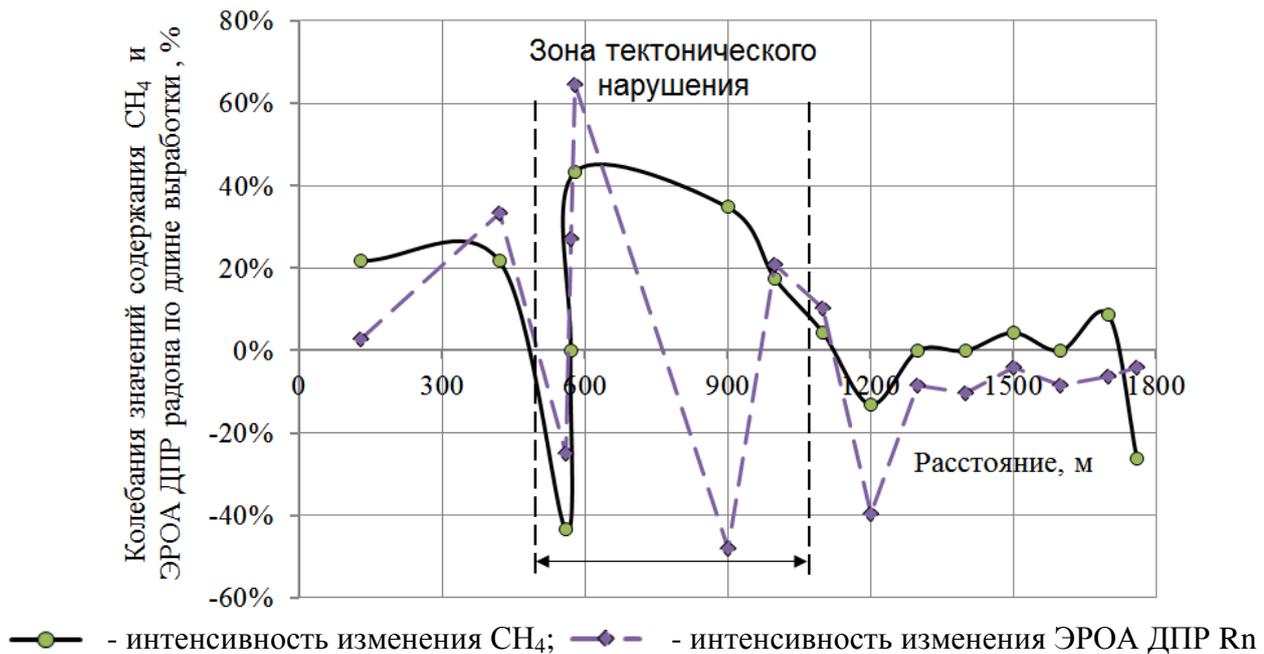


Рисунок 5 – Динамика колебаний содержания метана и приведенной ЭРОА ДПР радона относительно среднего значения в горной выработке

Таким образом, параметры изменений активности α -излучений отдельных изотопов радона, концентраций метана и их соотношений в горных выработках могут быть использованы для прогнозирования геомеханических и газодинамических процессов в породном массиве путем дифференциации во времени изменений напряженно-деформированного состояния пород, порово-трещинного пространства, ориентации доминирующих систем трещин и определения параметров газопереноса вокруг выработок в процессе ведения горных работ. Полученные научные результаты дают основу для разработки радиометрических и гибридных аналитико-экспериментальных методов контроля за безопасностью геотехнических систем, а также создания информационных систем предупреждения опасных ситуаций на промышленных предприятиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bigu, J. Radon progeny and thoron progeny relationship in canadian underground uranium mines / J.Bugi // Health Physics. - 1987. - Vol. 52, № 1. - P. 21.
2. Chameand, I. Le risqué radioactive et sa prevention dans les mines uranium de Cogema / I.Chameand // Industrie Minerale, Mines et Carriere.- 1986. - Vol. 68, pp. 295-300.
3. Dixon, D.W. Monitoring exposure to radon daughters in places of work / D.W. Dixon, M.C. O'Riordan, R.L. Burnett // Radiation Protection Dosimetry. - 1989. - Vol. 24. - Pp. 467-470.
4. Теоретическое обоснование метода радиационного излучения как фактора производственного контроля состояния породного массива / А.Ф. Булат, В.Г. Перепелица, А.А. Яланский [и др.] // Геотехническая механика. – Днепропетровск : ИГТМ НАНУ, 2006. – Вып. 66. – С. 3-14.
5. Булат, А.Ф. Взаимосвязи между геомеханическими процессами и эмиссией газа метана и продуктов распада радона в горные выработки угольных шахт / А.Ф. Булат, И.Н. Слащев, Е.А. Слащева // Геотехническая механика. – Днепропетровск : ИГТМ НАНУ, 2014. – Вып. 114. – С. 272-286.
6. Van der Spoel, W.H. Diffusive transport of radon in a column of moisturized sand / W.H.Van der Spoel, E.R. Van der Graaf and R.J. de Meijer // Health Physics. – 1999. - Vol. 77, № 2. - Pp. 163-177.
7. Anello, M.T. Theoretical Investigation of Radon Transport in Porous Media / M.T. Anello: A thesis of MSc, Melbourne, Florida, 1994. - 104 p.

8. Харитонов, В.П. Фундаментальные уравнения механики жидкости и газа. – М.: Изд-во МГТУ, 2012. – 65 с.
9. Слащев, И.Н. Применение информационных технологий для повышения эффективности и безопасности горных работ / И.Н. Слащев // Уголь Украины. – 2013. – № 2. – С. 40-43.
10. Слащев, И.Н. Оценка техногенной трещиноватости методами математического моделирования / И. Н. Слащев // Геотехническая механика. – Днепропетровск : ИГТМ НАНУ, 2010. – Вып. 85. – С. 239-250.
11. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев. - М.: Недра, 1987.– 221 с.
12. Булат, А.Ф. Разработка компьютерных систем математического моделирования геомеханических процессов / А.Ф. Булат, И.Н. Слащев // Геотехническая механика. – Днепропетровск : ИГТМ НАНУ, 2012. – Вып. 99. – С. 16-27.
13. 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. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 112. – С. 129-144.

REFERENCES

1. Bigu, J. (1987), “Radon progeny and thoron progeny relationship in canadian underground uranium mines”, *Health Physics*, vol. 52, № 1, h. 21.
2. Chameand, I. (1986), “Le risqué radioactive et sa prevention dans les mines uranium de Cogema”, *Industrie Minerale, Mines et carriers*, vol. 68, pp. 295-300.
3. Dixon, D.W., O’Riordan, M.C. and Burnett R.L. (1989), “Monitoring exposure to radon daughters in places of work”, *Radiation Protection Dosim.*, vol. 24. pp. 467-470.
4. Bulat, A.F., Perepelytsya, V.H., Yalanskyu, A.A., Palamarchuk, T.A., Yefremov, O.I., and Zabolotniy, A.H. (2013), “Teoretychne obgruntuvannya zastosuvannya metodu radiatsiynoho vyprominyuvannya yak faktora vy-robnychoho kontrolyu stanu vuhleporodnoho masyvu”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 66, pp. 3-14.
5. Bulat, A.F., Slashchev, I.N. and Slashcheva, Y.A. (2014), “Interdependencies between geomechanical processes and emission of methane and radon decay products into underground workings of the coal mines”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 114, pp. 272-286.
6. Van der Spoel, W.H., Van der Graaf, E.R. and de Meijer, R.J. (1999), “Diffusive transport of radon in a column of moisturized sand”, *Health Phys.*, vol. 77, № 2, pp. 163-177.
7. Anello, M.T. (1994), “Theoretical Investigation of Radon Transport in Porous Media”, A thesis of M.Sc., Melbourne, Florida.
8. Kharitonov, V.P. (2012), *Fundamentalnyye uravneniya mekhaniki zhidkosti i gaza* [Fundamental equations of fluid and gas mechanics], Izdatelstvo MSTU them. NE Bauman, Moscow, Russia.
9. 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.
10. Slashchev, I.N. (2010), “Assessment technogenic fracturing methods of mathematical simulation”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 85, pp. 239-250.
11. Fadeyev, A.B. (1987), *Metod konechnykh elementov v geomekhanike* [The finite element method in geomechanics], Nedra, Moscow, Russia.
12. Bulat, A.F. and Slashchev, I.N. (2012), “Development of computer systems mathematical modeling geomechanical processes”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 99, pp. 16-27.
13. Slashchev, I.N., Shevchenko, V.G. and Slashchov, 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.

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 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 НАНУ), Днепр, Украина, IMSlashchov@nas.gov.ua.

About the authors

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

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

Анотація. У статті наведено результати досліджень процесу надходження збагачених радоном повітряної (або метаноповітряної) суміші з масиву порід в атмосферу гірничих виробок. Показано, що параметри, які характеризують зміни активності α -випромінювань окремих ізотопів радону, концентрацій метану і їх співвідношень можуть бути використані для прогнозування геомеханічних і газодинамічних процесів в породному масиві шляхом диференціації в часі змін напружено-деформованого стану порід і порово-тріщинного простору навколо виробок в процесі ведення гірничих робіт. Це пов'язано з закономірностями розпаду ізотопів радону, емісії дочірніх продуктів розпаду радону і газопереносу метану в часі від джерел їх утворення в гірничі виробки, так як, по-перше, зміни концентрації ізотопу Po^{218} з урахуванням часу його розпаду залежать від зміни тріщиноватості ближньої до контуру виробки частини гірських порід. По-друге, зміни відхилень від середнього рівня концентрації дочірніх продуктів розпаду радону характеризують процеси трансформації обсягів порово-тріщинного простору в процесі ведення гірських робіт. Це дозволяє, при відомих параметрах проникності порід і фільтрації ізотопів радону, прогнозувати зміни геомеханічного стану не тільки приконтурних, але й віддалених від гірничої виробки зон породного масиву.

Ключові слова: продукти розпаду радону, геомеханічні процеси, проникність, фільтрація, моделювання масиву порід, прогнозування геомеханічного стану

Abstract. The article presents results of investigations of radon-enriched air (or methane-air) mixture escaping from the solid rocks into the mine working atmosphere. It is shown that parameters of changes of alpha-radiation intensity in some radon isotopes, methane concentrations and their proportion can be used for predicting geomechanical and dynamic processes in the rock massif by differentiated-in-time changes of stress-strain state of the rocks and porous-fractured space around the mine workings in the process of mining operations. Such changes of alpha-radiation intensity are explained by natural decay of radon isotopes, emissions of radon-decay daughter products and methane transported over time from sources of their formation into the mine workings because, firstly, changes of the Po^{218} isotope concentrations with taking into account its decay time depend on change of the rock fracturing in the marginal area of the mine working. And, secondly, changes of deviations from the average concentration of radon decay daughter products depend on transformations of porous-fractured space volume occurred in the process of mining operations. Under certain parameters of diffusion and filtration, it makes possible to predict changes of geomechanical conditions not only in the marginal areas but also in remote rocks far from the mine workings.

Keywords: radon decay products, geomechanical processes, permeability, filtering, modeling of the rock massif, prediction of geomechanical condition.

Стаття поступила в редакцію 22.02.2017

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Шевченко В.Г.