

УДК 622.831.312 : 622.817

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

**ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
И ЭМИССИЕЙ ГАЗА МЕТАНА И ПРОДУКТОВ РАСПАДА РАДОНА
В ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

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

**ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКИ МІЖ ГЕОМЕХАНІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ І ЕМІСІЄЮ
ГАЗУ МЕТАНУ ТА ПРОДУКТІВ РАСПАДУ РАДОНУ
В ГІРНИЧІ ВИРОБКИ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ**

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

**INTERDEPENDENCIES BETWEEN GEOMECHANICAL PROCESSES
AND EMISSION OF METHANE AND RADON DECAY PRODUCTS
INTO UNDERGROUND WORKINGS OF THE COAL MINES**

Аннотация. В статье решена актуальная задача по оценке условий фильтрации в породном массиве газа метана совместно с продуктами распада радона и изменения их физических параметров в горных выработках угольных шахт.

Предложена методика численного моделирования перемещения потоков газа метана и изотопов радона из областей повышенного горного давления через трещины в зонах сдвигов и растяжений пород в горные выработки. Для описания процесса газопереноса использована интегральная форма закона Дарси для случая радиального установившегося потока. В шахтных условиях исследованы взаимосвязи между содержанием метана и изотопов радона в атмосфере горной выработки. Для оценки условий совместного газопереноса метана и аэрозолей радона через породы предложено использовать минимальные главные деформации элементов геомеханической модели и девиатор тензора деформаций, определяющие параметры сжатия, сдвига и растяжения порово-трещинного пространства. Впервые установлен ряд физических особенностей эмиссии в горные выработки метана совместно с дочерними продуктами распада радона, согласно с которыми: концентрация α -излучения Po^{218} возрастает в зависимости от расстояния до забоя штрека, а его интенсивность в 2-4 раза превышает интенсивность изотопов Pb^{214} и Bi^{214} ; существует устойчивая взаимосвязь между динамикой изменений концентрации метана и приведенной концентрацией продуктов распада радона в диапазоне отклонений от среднего значения $\pm 20\%$, при этом скачкообразные всплески в диапазоне выше 40% объясняются различными источниками формирования и скоростями переноса потоков метана и аэрозолей радона через поры и трещины в тектонически нарушенных зонах массива; эмиссия радионуклида Po^{218} слабо связана с выделениями α -частиц Pb^{214} и

Bi^{214} , и, напротив, между эмиссиями Pb^{214} и Bi^{214} с более длительным периодом полураспада наблюдается тесная взаимосвязь, что объясняется физикой процесса распада радионуклидов. Установленные взаимосвязи служат базой для разработки новых методов прогнозирования проявлений геомеханических и газодинамических процессов.

Ключевые слова: фильтрация метана, продукты распада радона, геомеханические процессы, газодинамические процессы, моделирование массива пород, прогноз опасных явлений

Радон в нетронutom породном массиве присутствует во всем свободном поровом пространстве и представляет собой неустойчивый газ с очень хорошей проникающей способностью. Продукты распада радона (Rn^{222}) и торона (Rn^{220}) – это твердые вещества (металлы), которые образуют аэрозоли, представляющие собой мелкие частицы (дочерние продукты распада –ДПР и ДПТ). Аэрозоли могут долго находиться во взвешенном состоянии в порах и трещинах породного массива. Радон и продукты его распада, также как и газ метан, имеют хорошую диффузионную способность, вследствие чего они легко проникают через пористые и трещиноватые горные породы. Перемещение происходит под действием градиентов давления в земной коре, газоподъемной силы при заполнении пор водой, турбулентных эффектов, за счет процессов влагооборота, теплообмена, и др. Процессы и механизмы переноса изотопов радона в настоящее время труднопрогнозируемы и, кроме молекулярной диффузии, изучены недостаточно.

В горных выработках содержания газа метана и аэрозолей радона определяются, прежде всего, геомеханическими процессами в породном массиве, поскольку его напряженно-деформированное состояние (НДС) влияет на проницаемость пород по пути фильтрации газов от источников их образования до обнаженных поверхностей. Объемная активность радона и концентрации радиоактивных аэрозолей в шахтной атмосфере неравномерны. Поэтому мониторинг пространственных и временных вариаций концентраций метана и продуктов распада радона, при постоянстве природных источников их поступления, позволяет отслеживать изменения геомеханических и газодинамических процессов, происходящих в породном массиве по длине горных выработок [1, 2]. Установление условий фильтрации через поры и трещины горных пород газа метана и радиоактивных аэрозолей радона, а также закономерностей изменения их физических параметров в горных выработках является актуальной научной задачей, решение которой дает возможность прогнозирования опасных явлений за счет своевременного обнаружения малоамплитудных тектонических нарушений, скоплений газа метана и концентрации напряжений в породном массиве.

Радон продуцирует семейство α -излучателей, представляющих собой твердые вещества в виде нестабильных изотопов полония, свинца и висмута, которые представляются наиболее перспективными информативными параметрами для оперативного контроля шахт, рис. 1. Как показано, при рассмотрении ДПР радона достаточно ограничиться частью цепочки, которая имеет практически значимые для контроля изотопы α -излучения. К ним относятся объемная активность радиоактивных изотопов полония Po^{218} (C_{RaA} – период полураспада 3,05 мин), свинца Pb^{214} (C_{RaB} – период полураспада 26,8 мин), висмута Bi^{214} (C_{RaC} –

период полураспада 19,7 мин), эквивалентная равновесная объемная активность дочерних продуктов распада радона $^{222}\text{Cm}_{\text{дпр}}$ (ЭРОА Ra, энергетический вклад $\sim 98\%$) и торона $\text{C}_{\text{дпр}}$ (ЭРОА To, энергетический вклад $\sim 2\%$). Это связано с тем, что интенсивность основных ДПР распада α -излучения радона с полупериодом 3,825 дня во много раз выше интенсивности всех продуктов распада α -излучения урана и радия вместе взятых. β - частицы и γ - кванты различных энергий, но в меньших количествах, легко отсекаются радиометрическими приборами за счет их меньшей энергии.

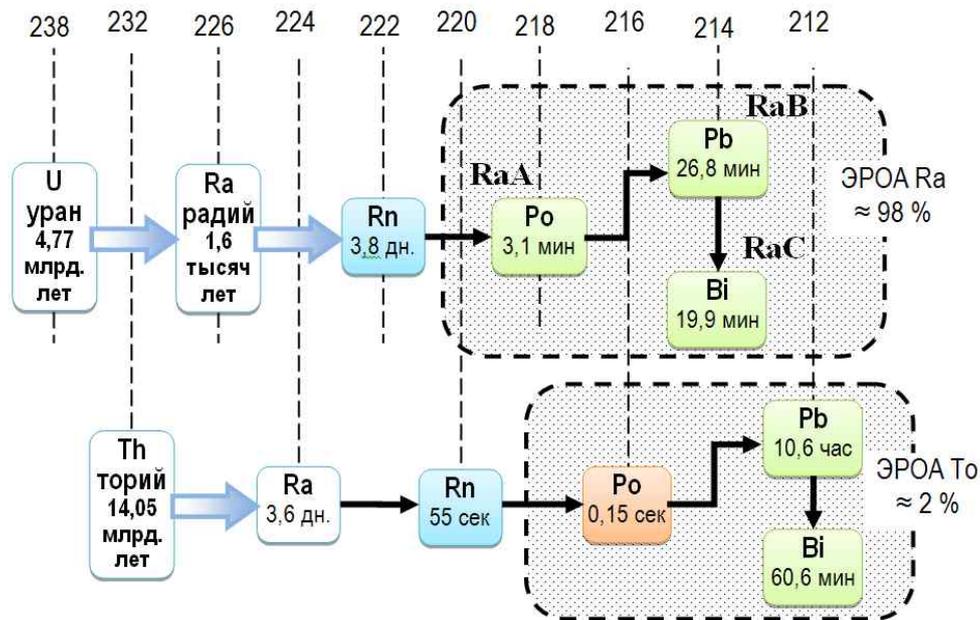


Рисунок 1 – Практически значимые для контроля изотопы α -излучений

Перемещение смеси газов и аэрозолей вокруг горных выработок зависит от фильтрационных свойств пород, которые определяются состоянием многокомпонентной системы, включающей твердую, жидкую и газообразную фазы. Если закон фильтрации линейный, то решением дифференциального уравнения движения будет известная формула Дарси, для использования которой необходимо знать характер изменения давления в точках пласта и на его границах, а также расход пластовых флюидов через какие-либо ограничивающие поверхности [3-5]. В частности, 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

$$Q = \frac{\pi h k (p_2^2 - p_1^2)}{p_{\text{atm}} \ln \frac{R}{r}}, \quad (1)$$

где Q – расход, $\text{м}^3/\text{с}$; k – коэффициент проницаемости пористой среды, м^2 ; p_1 , p_2 – давление в начале (забойное на прямолинейной галерее стока) и конце (на контуре питания) интервала, соответственно, Па; p_{atm} – атмосферное давле-

ние, Па.

Для оценки фильтрационных процессов совместного газопереноса метана и радона в породном массиве в качестве информативных параметров предложено использовать компоненты главных деформаций элементов геомеханической модели, определяющие параметры неравнокомпонентного сжатия или растяжения порово-трещинного пространства в породах. Это связано с тем, что 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. Под элементарным макрообъемом в данном случае понимается множество минеральных частиц породы, которые сцементированы в мягкую или жесткую структуру с порами и трещинами, часто заполненными газами или жидкостями (например, образец породы). В математической модели, реализуемой на базе метода конечных элементов, размеры элементарных макрообъемов, моделирующих соответствующие участки реального массива, будут определяться величиной симплекс элементов расчетной схемы. Общая деформация элемента модели (тензор деформации) описывается суммой векторов узловых перемещений и подразделяется на шаровую и девиаторную части. Шаровая часть тензора деформаций определяется величиной минимальных главных нормальных деформаций элементов модели, которые будут характеризовать изменения объема порово-трещинного пространства, а девиаторная часть тензора деформаций – изменение его формы в процессе разрушения породного массива.

С учетом того, что сжимаемость частиц скелета мала по отношению к общей сжимаемости породы, можно считать, что деформация трещинно-поровой среды равна изменению объема порового пространства. Для метода конечных элементов решение задачи фильтрационной консолидации производится путем совместного решения уравнений равновесия системы и уравнений фильтрации [6], при этом объемная деформация конечного элемента определяется из выражения:

$$\frac{d\varepsilon_V}{dt} = \frac{\eta}{K} \frac{dp}{dt} - q, \quad (2)$$

где ε_V – объемные деформации элементов геомеханической модели; K – модуль объемной сжимаемости; η – пористость; p – поровое давление, Па; q – объем газа в поровом пространстве, м^3 ; t – время, с.

Процесс консолидации затухает во времени, поэтому используется логарифмический шаг во времени [7]:

$$p(t) = \Delta t(1 - k)p_{n-1} + \Delta tkp_n, \quad (3)$$

где p_{n-1} и p_n – давление в начале и конце интервала, k – коэффициент, зависящий от вида функции:

$$k = 1 + \frac{t_{n-1}}{\Delta t} - \frac{1}{\ln(1 + \Delta t/t_{n-1})}. \quad (4)$$

В рамках поставленных задач разработана геомеханическая модель, выполнены расчеты НДС массива горных пород с учетом особенностей его геологического строения и физико-механических свойств. Анализ деформационных процессов проведен на примере условий отработки горизонта 1380 м пласта m_3 шахты им. А.Ф. Засядько, рис. 2.

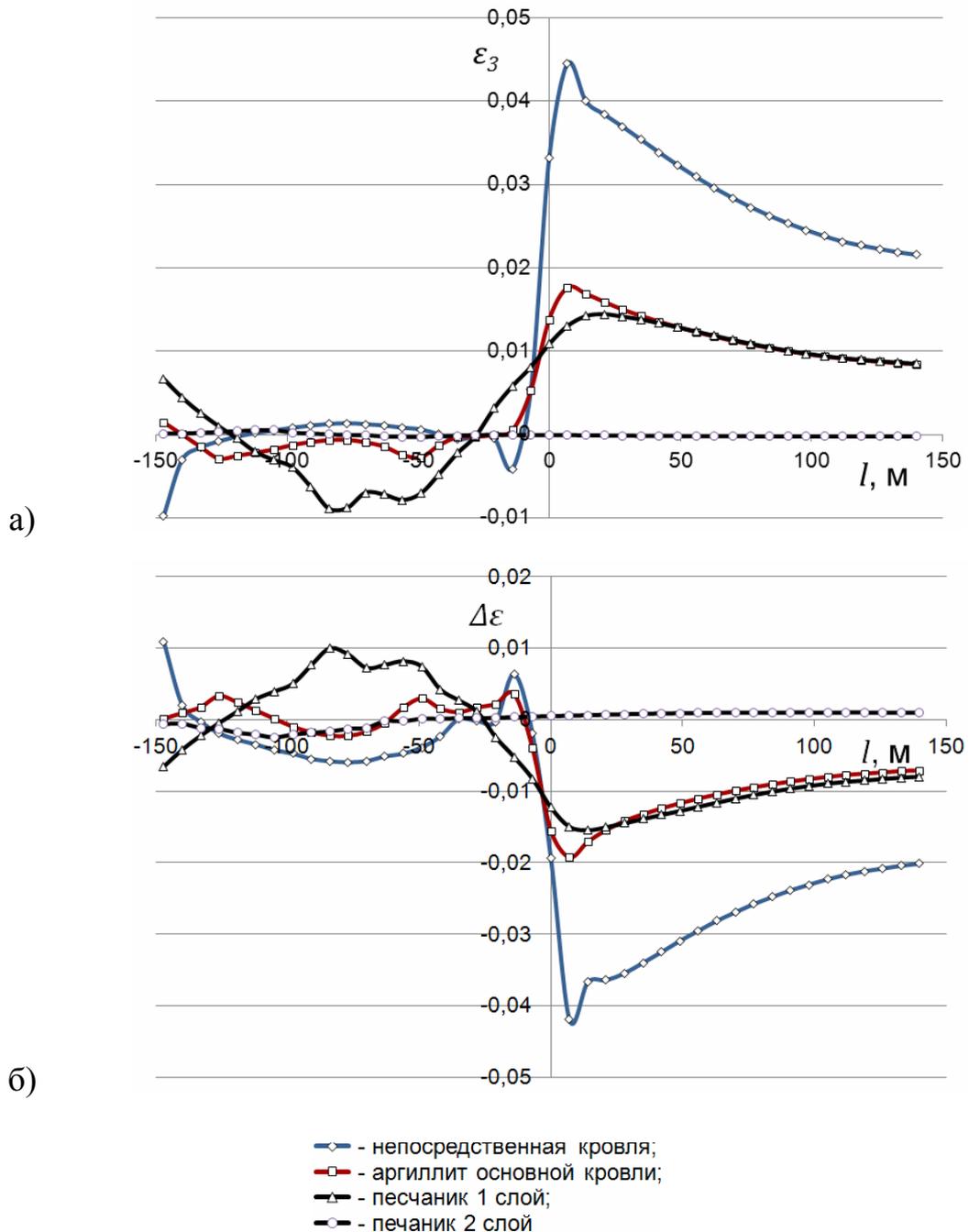


Рисунок 2 – Расчетные послойные деформации кровли на границе отработанного и подготовленного к отработке выемочного столба: а – минимальные главные нормальные деформации (изменение объема порового пространства); б – девиаторная часть объемной деформации (максимальные деформации сдвига)

На рисунке показаны расчетные деформации пород кровли на границе отработанного и подготовленного к отработке выемочного столба (нулевое значение – краевая часть угольного пласта). Как показано на рис. 2, а, на уровне 3–15 м от краевой части вглубь массива ($l > 0$) происходит сжатие пор и трещин в слоях непосредственной и основной кровли, которое сопровождается деформациями изгиба (изменениями формы элементов среды, рис. 2, б). В зоне разгрузки от напряжений ($l < 0$) деформационный процесс, напротив, характеризуется локальными неравномерными расширениями систем трещин. Развитие зон неупругих деформаций сопровождается заполнением газом прорастающих и вновь образовавшихся трещин. Порово-трещинное пространство имеет максимальную газопроницаемость, что способствует аккумуляции газов и их миграции в разных направлениях.

Исследования выполнены на базе математической модели, имеющей возможность расчета разрыва связей в элементах модели и совместного учета природных структурных дефектов, внутрипластовых газовых давлений и количественных соотношений газ-вода в трещинах и порах. Учет влияния давления газа проводился на основе первичного определения разрушений породного массива силами горного давления путем дополнительного пересчета новых разрывов связей в элементах модели под воздействием газовой составляющей, отличием которой является то, что она действует во всех направлениях равномерно по закону Паскаля. Математическая модель реализована в новой версии информационной системы «GEO-RS», которая отличается: интерактивностью функций управления расчетами; произвольной дифференциацией уровней полученных параметров; возможностями выбора, корректировки и фильтрации свойств пород в модели; процедурами вычисления интегральных характеристик состояния моделируемой среды (разработка и программная реализация новых функций системы выполнена на базе исследований [8, 9]). Объемное решение представляется как расчет серии плоских слоистых моделей, выполненных в упругопластической постановке с учетом разрушения для центральных частей исследуемого объекта во взаимноперпендикулярных направлениях.

В результате расчетов получены данные по распространению в породном массиве зон неупругих деформаций и проведена оценка изменений его фильтрационного состояния в активной и установившейся стадиях деформационного процесса. Анализ градиентов газовых давлений и доминирующих направлений движения газовых потоков (из зон высокого давления в зоны низкого давления) показал, что движение фронта разрушения над краевой частью угольного пласта приводит к освобождению дополнительных объемов газов и повышению фильтрационной способности массива. При этом можно выделить три основные зоны, влияющие на газоперенос: зону беспорядочного обрушения, где движение газовых потоков не ограничено во всех направлениях; зону неупругого деформирования при неравнокомпонентном сжатии, где газоперенос происходит по магистральным трещинам (master crack); зону повышенного горного давления (локальных концентраций напряжений), где поры сжаты, вследствие чего газопроницаемость пород существенно снижена (см. рис. 3). Особенностью движения газовых потоков в указанных зонах является наличие препятст-

вий, которые мешают потоку непрерывно фильтроваться и скоростное поле имеет весьма сложную неравномерность. Переформирование скоростного поля обуславливает большие потери энергии потока при его движении, чем объясняется пониженный коэффициент фильтрации газов из основной кровли. Основной поток газов по магистральным трещинам перемещается в сторону зоны беспорядочного обрушения над отработанной лавой, откуда они, в основном, и поступают в горные выработки.

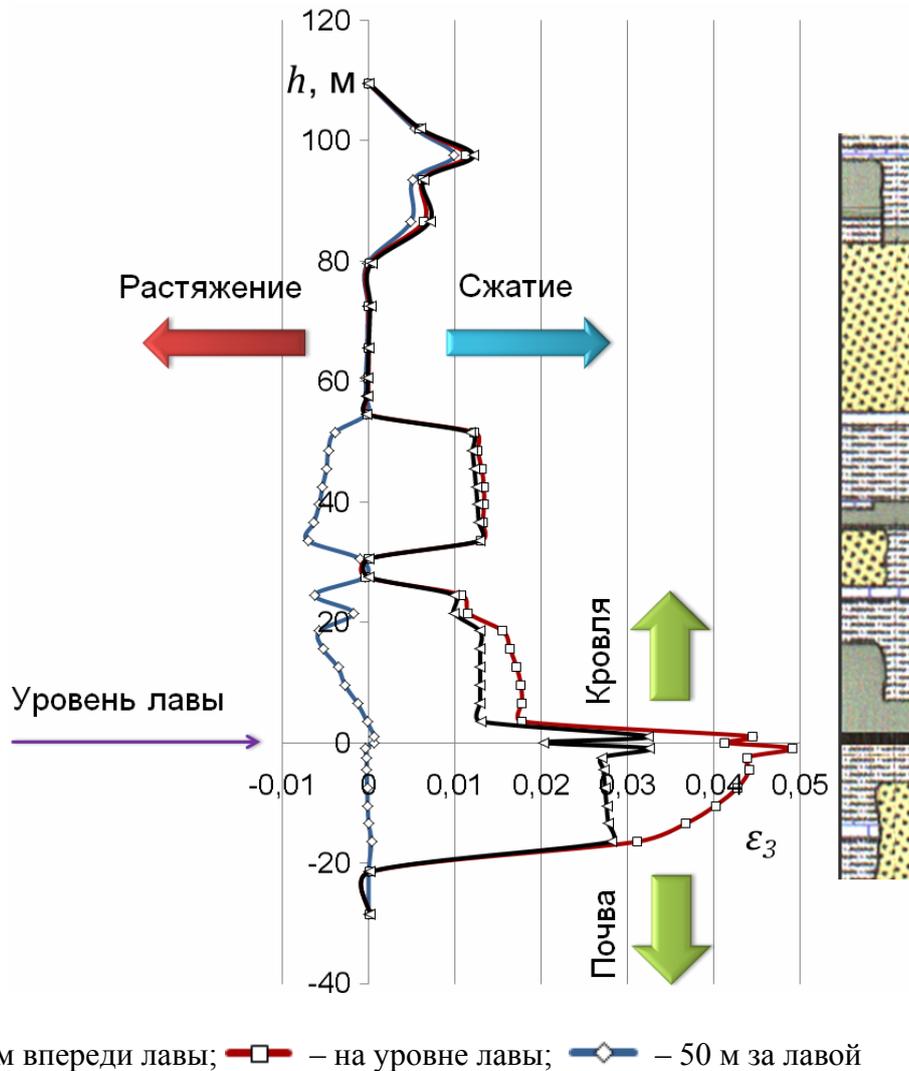


Рисунок 3 – Изменения минимальных главных деформаций слоев кровли (по вертикальным сечениям), определяющие трансформацию объемов порово-трещинного пространства в процессе отработки выемочного столба

Таким образом, с учетом слоистости, трещиноватости, особенностей и закономерностей неупругого деформирования пород определены условия, при которых под влиянием горных работ происходит формирование в газонасыщенных пластах зон дезинтеграции, активизация процессов газопереноса метана и продуктов распада радона из областей повышенного горного давления через трещины в зонах сдвига и растяжения в выработанное пространство и в горные выработки угольной шахты.

Закономерности изменения в пространстве и времени содержания в атмосфере горных выработок газа метана и ДПР радона исследованы радиометром РГА-09МШ в 18 конвейерном штреке пл. m_3 шахты им. А.Ф. Засядько (измерения проведены совместно с персоналом шахты). Методика измерений включала в себя последовательность следующих операций: отбор проб аэрозолей из воздуха на фильтр путем прокачки воздуха через фильтр; регистрация α -излучения аэрозолей ДПР радона и торона, осевших на фильтр; расчет значений ЭРОА радона и торона методом Маркова.

На рис. 4 показана взаимосвязь изменений содержания метана и приведенной ЭРОА ДПР радона по длине выработки. Усреднение данных методом наименьших квадратов показало, что, как и содержание метана, так и приведенная ЭРОА ДПР радона по длине горной выработки изменяются квазипериодически. Чередование зон повышенного и пониженного выделения метана и приведенной ЭРОА ДПР радона в пространстве над штреком очевидно связано с закономерностью самоорганизации породного массива вокруг протяженных подземных выработок [10], которая реализуется в виде квазипериодических геодилатационных полей, что обусловлено саморазрушениями перенапряженных участков массива за счет рекомбинационной смены альтернативных квазистационарных равновесных состояний. Это свидетельствует о том, что на характер газовыделения по длине штрека превалирующее влияние оказывают происходящие в породном массиве геомеханические процессы.

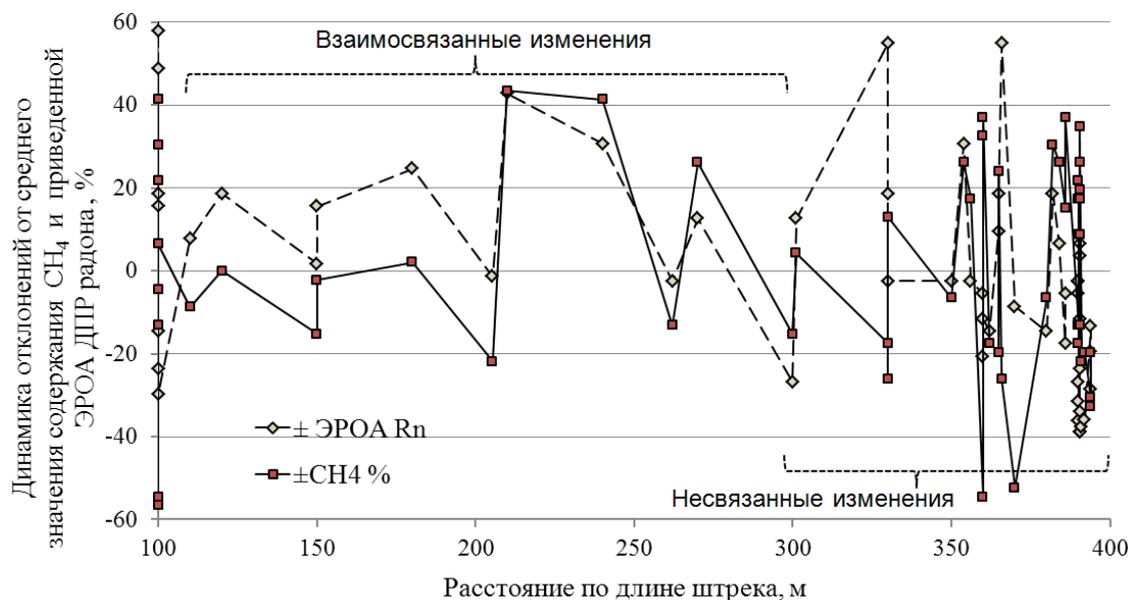


Рисунок 4 – Изменения содержания метана и приведенной ЭРОА ДПР радона

Вместе с тем, колебания концентраций метана и приведенных концентраций ДПР радона на одних участках горной выработки взаимосвязанные, а в зонах тектонических нарушений и повышенной газодинамической активности – эта связь нарушается. Это свидетельствует о возможности надежной фиксации в горных выработках вновь образовавшихся систем трещин и зон повышенного горного давления.

Можно утверждать, что суммарная объемная активность α -излучения ДПР радона (эманация) в атмосфере горных выработок (также как и содержание метана) характеризует проницаемость всей нарушенной горными работами зоны породного массива, которая имеет максимальные значения в зонах тектонических нарушений, на выходах магистральных трещин и выработанных пространствах очистных забоев. То есть, общая эманационная активность породного массива позволяет качественно оценить зональность распределения трещиноватых зон и исходных полей напряжений по площади шахтных полей, например, как это было выполнено для шахт им. А.И. Гаевого и им. К.А. Румянцева [11] путем совместного применения метода локального гидроразрыва, структурно-геодинамического картирования и определения параметров НДС массива горных пород в зонах с различной концентрацией эманаций. Были выявлены общие закономерности проявлений действия тектонических сил и разработаны основные принципы повышения устойчивости подготовительных выработок с учетом геодинамического поля напряжений. В свою очередь, скорости фильтрации α -частиц отдельных ДПР радона через порово-трещинное пространство и различное время их существования ограничивают глубину массива, из которой они могут поступать в шахтную атмосферу и, следовательно, являются более точными индикаторами геомеханических процессов.

Сравнительный анализ динамики отклонений содержания метана от приведенной концентрации ДПР радона RaA по длине выработки (рис. 5) показал, что, с одной стороны, в диапазоне отклонений от среднего значения $\pm 20\%$ существует достаточно устойчивая взаимосвязь указанных параметров, а с другой – наблюдаются скачкообразные всплески с отклонениями $> 40\%$. Очевидно, что такие изменения параметров обусловлены различными источниками образования газа метана и ДПР радона, различными скоростями их перемещения через поры и трещины в тектонически нарушенных зонах массива, а также динамическими изменениями НДС пород в приконтурной зоне выработок.

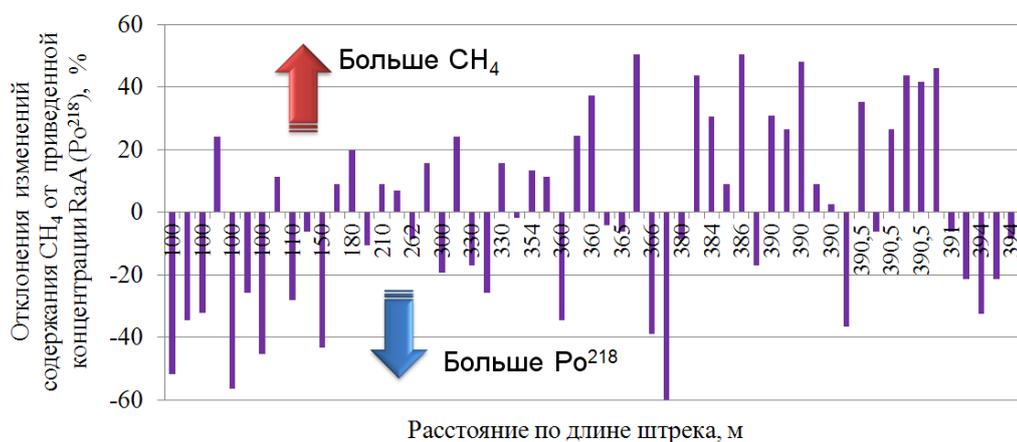


Рисунок 5 – Динамика отклонений содержания метана от приведенной концентрации ДПР радона RaA по длине штрека

Как показано на рис. 6, концентрация ДПР радона возрастает в зависимости от расстояния от забоя подготовительной выработки. При этом, интенсивность

роста α -излучения Po^{218} (рис. 6, а) в 2-4 раза превышает интенсивность роста ДПР радона Pb^{214} (рис. 6, б). Это показывает, что газовыделение в выработку происходит из трещин, вновь образовавшихся в процессе деформирования.

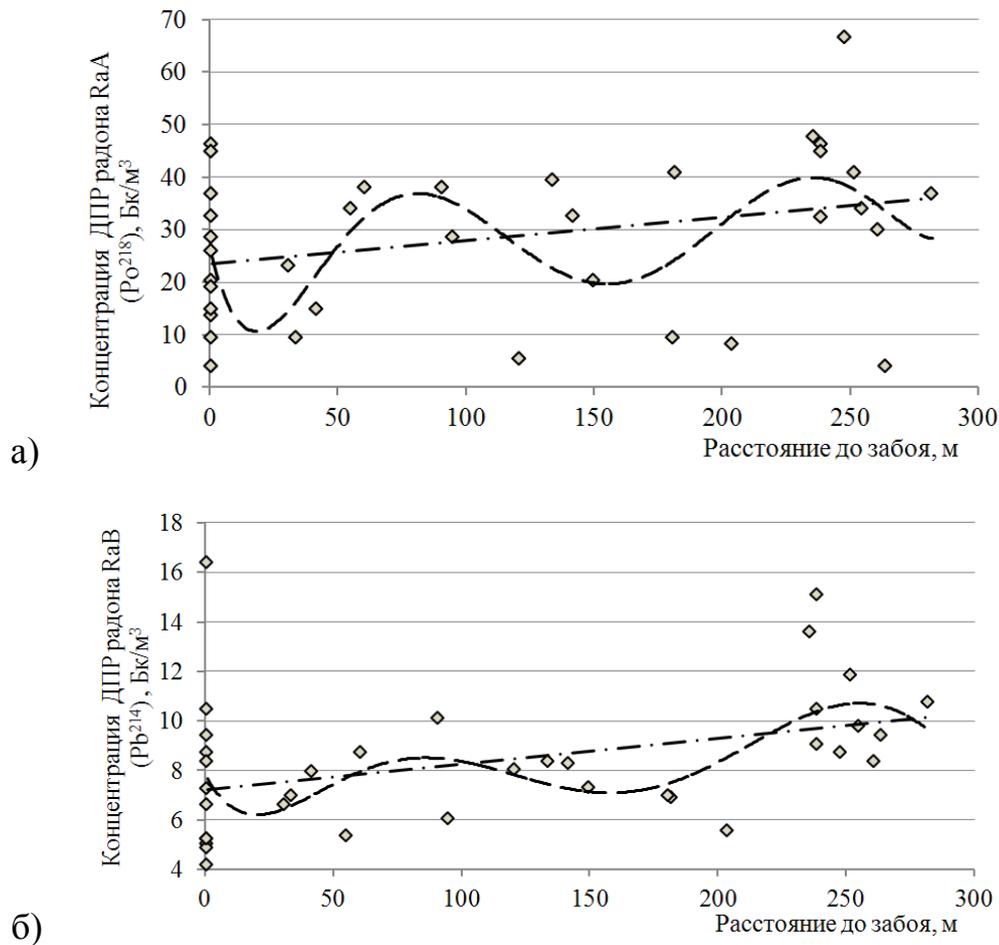


Рисунок 6 – Распределение концентраций ДПР радона относительно подготовительного забоя: а – концентрация Po^{218} ($C_{RaA}=0,044 l + 23,4$); б – концентрация Pb^{214} ($C_{RaB}=0,022 l + 3,3$)

Основные особенности газовыделений метана совместно с ДПР радона в горные выработки заключаются в различиях скоростей их проявлений, распределении в пространстве и времени процессов их протекания. 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 НДС пород и порово-трещинного пространства вокруг выработок в процессе ведения горных работ. Это связано с временными закономерностями распада изотопов радона, эмиссии ДПР радона и газопереноса метана от источников их образования в горные выработки, так как, во-первых, изменения концентрации изотопа RaA с учетом времени его распада зависит от изменения трещиноватости приконтурной части горных пород, а RaB и RaC – приконтурной и глубинной. Во-вторых, изменения отклонений от среднего уровня концентрации метана и приведенной концентрации ДПР радона зависят от технологических процессов в горных выработках, что позволяет,

при известных параметрах расположения в геопространстве источников поступления метана, прогнозировать изменения состояния не только приконтурных, но и дальних зон породного массива.

Исследования динамики изменений ДПР радона в подготовительном забое конвейерного штрека, рис. 7, показали, что выделения короткоживущих радионуклидов RaA слабо связаны с выделением α -частиц RaB и RaC. И, напротив, взаимосвязь между собой концентраций долгоживущих изотопов RaB и RaC достаточно тесная, что подтверждает взаимосвязь их возникновения и эмиссии в атмосферу горной выработки.

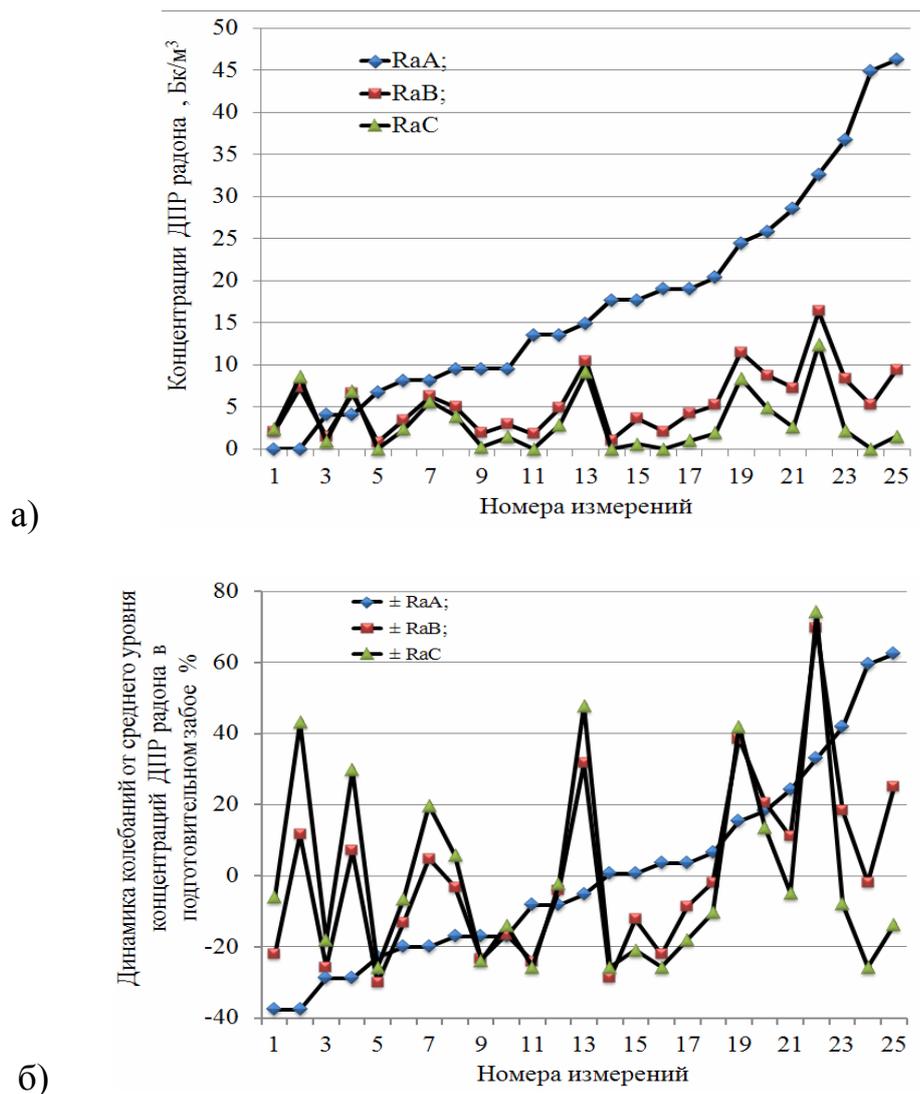


Рисунок 7 – Динамика изменений ДПР радона в подготовительном забое:
а – концентрации ДПР; б – отклонения ДПР от среднего уровня

Таким образом, получены следующие научные результаты:

1) впервые предложено в качестве информативных параметров для оценки совместного газопереноса метана и дочерних продуктов распада радона использовать компоненты главных деформаций элементов геомеханической модели, определяющие параметры сжатия, сдвига и растяжения породного массива. При этом трансформация объема порово-трещинного пространства опреде-

ляется по изменениям минимальных главных нормальных деформаций, а изменение его формы в процессе разрушения – в результате оценки девиаторной части тензора деформаций. Информативные параметры дают возможность прогнозировать изменения проницаемости участков породного массива под влиянием горных работ и мест скоплений газа метана в горных выработках.

2) дальнейшее развитие получил метод оценки условий формирования в газонасыщенных пластах зон дезинтеграции горных пород, в которых активизируются процессы газопереноса метана и продуктов распада радона из областей повышенного горного давления через трещины в зонах сдвига и растяжения в выработанное пространство и в горные выработки угольной шахты. Метод отличается технологией расчета разрыва связей в элементах модели, комплексным учетом природных структурных дефектов, внутрипластовых газовых давлений и количественных соотношений газ-вода в трещинах и порах. Математическая модель реализована в новой версии информационной системы «GEO-RS», которая отличается: интерактивностью функций управления расчетами; произвольной дифференциацией уровней полученных параметров; возможностями выбора, корректировки и фильтрации свойств пород в модели; процедурами вычисления интегральных характеристик состояния моделируемой среды.

3) впервые установлен на базе экспериментальных исследований для условий глубоких горизонтов угольной шахты ряд физических особенностей эмиссии в горные выработки метана совместно с дочерними продуктами распада радона, а также ее связь с трещинообразованием и разрушением горных пород:

- концентрация ДПР радона возрастает в зависимости от расстояния до забоя подготовительной выработки, при этом интенсивность роста α -излучения Po^{218} в 2-4 раза превышает интенсивность роста изотопов Pb^{214} и Bi^{214} , что позволяет на базе радиометрического мониторинга выявлять дислокацию вновь образовавшихся в процессе деформирования систем трещин;

- существует устойчивая взаимосвязь между динамикой изменений концентрации метана и приведенной концентрацией ДПР радона в диапазоне отклонений от среднего значения $\pm 20\%$, при этом наблюдаются скачкообразные всплески приведенной концентрации ДПР радона в диапазоне отклонений 40% и выше, последние обусловлены различными источниками формирования газов метана и радона, различными скоростями их перемещения через поры и трещины в тектонически нарушенных зонах массива, а также динамическими изменениями напряженно-деформированного состояния пород в приконтурной зоне выработок;

- эмиссия в горную выработку короткоживущих α -частиц RaA (Po^{218}) слабо связана с эмиссией радионуклидов RaB и RaC (Pb^{214} и Bi^{214}), и напротив, взаимосвязь между собой изотопов с более длительным периодом полураспада RaB и RaC достаточно тесная, что говорит о сходном характере их возникновения и эмиссии в атмосферу горной выработки.

Установленные взаимосвязи служат базой для разработки новых методов прогнозирования проявлений геомеханических и газодинамических процессов в горных выработках.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Теоретичне обґрунтування застосування методу радіаційного випромінювання як фактора виробничого контролю стану вуглепородного масиву / А.Ф. Булат, В.Г. Перепелиця, А.А. Яланський [та ін.] // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 66. – С. 3-14.
2. Кабанов, М.В. Региональный мониторинг атмосферы / Под общей ред. В.Е. Зуева. - Томск: «Спектр» Институт оптики атмосферы СО РАН, 1997. - 211 с.
3. 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.
4. Koarashi, J., Amano, H., Iida T. et al. (2000), "Development of Model for Dynamical Behavior oil of Water and Rn in Unsaturated Soil", Harmonization of Radiation, *Human Life and the Ecosystem: Proc. of 10th Intern. Congr. Intern. Rad. Prot. Association (IRPA-10)*, Hiroshima, Japan, pp. 16-23.
5. Togo, L. and Gheorghe, R. (1999), "Mathematical simulation of radon migration in porous materials", *Proc. IRPA Regional Congr. on Rad. Prot. in Central Europe*, Budapest, Hungary, pp. 606-615.
6. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев. - М.: Недра, 1987.–221 с.
7. Hwang, C.T., Morgenstern, N.R. and Murray, D.W. (1971), "On solution of plain strain consolidation problems by finite element methods", *Can. Geotech.*, № 109. pp. 109-118.
8. Слащев, И.Н. Применение информационных технологий для повышения эффективности и безопасности горных работ / И.Н. Слащев // Уголь Украины. – 2013. – № 2. – С. 40-43.
9. 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 // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 112. – С. 129-144.
10. Открытие № 318. Закономерность самоорганизации грунтовых и породных массивов вокруг протяженных подземных выработок / Л.В. Байсаров, М.А. Ильяшов, В.В. Левит и др. Рег. № 399, приор. 26.10.2006 г.
11. Слащев, И.Н. Устойчивость штреков в условиях повышенной тектонической активности породного массива / Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 76. – С. 245-254.

REFERENCES

1. Bulat, A.F., Perepelytsya, V.H., Yalanskyu, A.A., Palamarchuk, T.A., Yefremov, O.I., and Zabolotniy, A.N. (2013), "Teoretychne obgruntuvannya zastosuvannya metodu radiatsiynoho vyuprominyuvannya yak faktora vy-robnychoho kontrolyu stanu vuhleporodnoho masyvu", *Geo-Technical Mechanics*, no. 66, pp. 3-14, UA
2. Kabanov, M.V. (1997), *Regionalnyy monitoring atmosfery* [Regional monitoring of the atmosphere], in Zuyev, V.Ye. (ed.), «Spektr» Institut optiki atmosfery SO RAN, Tomsk, Russia.
3. 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.
4. Koarashi, J., Amano, H., Iida T. et al. (2000), "Development of Model for Dynamical Behavior oil of Water and Rn in Unsaturated Soil", Harmonization of Radiation, *Human Life and the Ecosystem: Proc. of 10th Intern. Congr. Intern. Rad. Prot. Association (IRPA-10)*, Hiroshima, Japan, pp. 16-23.
5. Togo, L. and Gheorghe, R. (1999), "Mathematical simulation of radon migration in porous materials", *Proc. IRPA Regional Congr. on Rad. Prot. in Central Europe*, Budapest, Hungary, pp. 606-615.
6. Fadeyev, A.B. (1987), *Metod konechnykh elementov v geomekhanike* [The finite element method in geomechanics], Nedra, Moscow, SU.
7. Hwang, C.T., Morgenstern, N.R. and Murray, D.W. (1971), "On solution of plain strain consolidation problems by finite element methods", *Can. Geotech.*, № 109. pp. 109-118.
8. Slashev, 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.
9. Slashev, 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, UA.
10. Baysarov, L.V., Ilyashov, M.A., Levit, V.V., Palamarchuk, T.A., Sergiyenko, V.N., Usachenko, V.B. and Yalanskiy, A.A., M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the NAS of Ukraine (2006), *Zakonomernost samoorganizatsii gruntovykh i porodnykh massivov vokrug protyazhennykh podzemnykh vyrobotok* [The regularity of self-organization of ground and rock massifs around underground

workings], International Public Academy of Authors of Scientific Discoveries and Inventions, Moscow, Russia, Discovery № 318, UA.

11. Slashchev, I.N. (2008), "Stability roadway under conditions of elevated of tectonic activity rock massif", *Geo-Technical Mechanics*, no. 76, pp. 245-254, UA.

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 НАН Украины), Днепропетровск, Украина, igtmnanu@yandex.ru.

Слащев Игорь Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе Проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, pgalpha.ltd@gmail.com

Слащева Елена Анатольевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе Проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, slashchevayelena@gmail.com

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 under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, igtmnanu@yandex.ru

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 Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, pgalpha.ltd@gmail.com

Slashcheva Yelena Anatolyevna, 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 Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, slashchevayelena@gmail.com

Анотація. У статті вирішено актуальне завдання по оцінці умов фільтрації в породному масиві газу метану спільно з продуктами розпаду радону і закономірностей змін їх фізичних параметрів в гірничих виробках вугільних шахт.

Запропоновано методику чисельного моделювання переміщення газу метану і адвекції ізотопів радону з областей підвищеного гірського тиску через тріщини в зонах зрушень і розтягувань порід в гірничі виробки. Для опису процесу газопереносу використана інтегральна форма закону Дарсі для випадку радіального сталого потоку. В шахтних умовах досліджені взаємозв'язки між вмістом метану та ізотопів радону в атмосфері гірничої виробки.

Для оцінки умов спільного газопереносу метану і аерозолів радону через породи запропоновано використовувати мінімальні головні нормальні деформації елементів геомеханічної моделі та девіатор тензора деформацій, які визначають параметри стиснення, зсуву і розтягування порово-тріщинного простору. Вперше встановлено ряд фізичних особливостей емісії в гірничі виробки метану спільно з дочірніми продуктами розпаду радону, згідно з якими: концентрація α - випромінювання Po^{218} зростає в залежності від відстані до забою штреку, а його інтенсивність в 2-4 рази перевищує інтенсивність ізотопів Pb^{214} і Bi^{214} ; існує стійкий взаємозв'язок між динамікою змін концентрації метану і наведеною концентрацією продуктів розпаду радону в діапазоні відхилень від середнього значення $\pm 20\%$, при цьому стрибкоподібні сплески в діапазоні вище 40% пояснюються різними джерелами формування і швидкостями перенесення потоків метану і аерозолів радону через пори і тріщини в тектонічно порушених зонах масиву; емісія радіонукліда Po^{218} слабо пов'язана з виділеннями α -частинок Pb^{214} і Bi^{214} , і, навпаки, між емісіями ізотопів Pb^{214} і Bi^{214} є більш тривалим періодом напіврозпаду спостерігається тісний взаємозв'язок, що пов'язано з фізикою розпаду радіонуклідів. Встановлені взаємозв'язки служать базою для розробки нових методів прогнозування проявів

геомеханічних і газодинамічних процесів.

Ключові слова: фільтрація метану, продукти розпаду радону, геомеханічні процеси, газодинамічні процеси, моделювання масиву порід, прогноз небезпечних явищ

Abstract. Purpose of this article is to specify conditions for joint filtration of methane and radon decay products and changes of their physical parameter in the workings of coal mines.

A method for numerical simulation of methane transfer and radon isotope from areas with high rock pressure through the cracks in zones with rock shift and stretching into the mine workings was proposed. To describe of gas transfer processes, an integrated form of the Darcy law for a case of radial steady flow was used. Interdependencies between methane and radon isotope contents in the atmosphere of mine workings were investigated in-situ.

The author proposes to assess conditions for the joint methane transfer and radon aerosol through the rocks with the help of minimum principal strains of elements in the geomechanical model and deformation tensor deviator which define compression, shift and stretching parameters of the pore-fractured space. It is for the first time when specific physical features of joint emission of methane and radon decay products into the mine working are disclosed: concentration of the Po^{218} α -radiation increases depending on the distance to the development heading and its Po^{218} intensity is 2-4 times higher than intensity of α -radiation of Pb^{214} and Bi^{214} isotopes; there is a stable interdependency between dynamics of changes in methane concentration and reduced concentration of radon decay products when deviation of concentration change is within $\pm 20\%$ from the mean value, and abrupt peaks of concentration changing above 40% can be explained by different sources of formation of methane and radon-aerosol flows and different rates of their transfer through the pores and cracks in tectonically disturbed zones of the rock massif; emission of the Po^{218} radionuclide is weakly connected with radiation of the Pb^{214} and Bi^{214} α -particles, and, conversely, between Pb^{214} and Bi^{214} emissions with a longer half-life a strong interdependency is observed. These interdependencies can be a basis for designing new methods for prediction manifestations of geomechanical and gasdynamic processes.

Keywords: Methane Filtering, Radon Decay Products, Geomechanical Processes, Gasdynamic Processes, Modeling of Rock Massif, Prediction of Dangerous Phenomena

Стаття постуила в редакцію 25.01.2014

Стаття рекомендована к печати д-ром техн. наук В.Г. Шевченко

А. Б. Бокий, аспирант
(ГВУЗ «ДонНТУ»)

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ
УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

А.Б. Бокий, аспірант
(ДВУЗ «ДонНТУ»)

**ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ
ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПІДЗЕМНОЇ РОЗРОБКИ ВУГІЛЬНИХ
КОПАЛЕНЬ**

A.B. Bokiy, M.S. (Tech.)
(SHEY «NMU»)

**BACKGROUND OF TECHNICAL DECISIONS ON IMPROVING OF
ECOLOGICAL SAFETY OF UNDERGROUND DEVELOPMENT OF THE
COAL DEPOSITS**

Аннотация. Основным направлением повышения эффективности добычи полезных ископаемых является интенсификация производства. Этот процесс имеет масштабное влияние на атмосферу, что делает актуальным обоснование технических решений по повышению экологической безопасности подземной разработки угольных месторождений.

На основании установленных закономерностей изменения относительной газообильности выемочного участка с учетом геомеханических особенностей формирования зон обрушений предложен способ уменьшения выхода газа на земную поверхность. Предложен аналитический метод выбора режимов работы вентиляторов главного проветривания, обеспечивающих создание нулевой зоны для управления метановыделением из выработанного пространства. Предложено орошение выработанного пространства специально подготовленной смесью для уменьшения метановыделения в рудничную атмосферу. Определены целесообразное количество и углы направления кустов скважин, предназначенных для дегазации выработанного пространства. Для использования смеси с низким содержанием метана в конгенерационных станциях предложено использовать предварительный электророзжиг в специальных камерах. Предложен экологический критерий оценки технологий подземной добычи угля, который включает постоянную составляющую, учитывающий выбросы метана в атмосферу из вентиляционных стволов при нормальной работе шахты и динамическую - отражающую выбросы метана в вентиляционную систему в результате возникновения аварийных ситуаций (внезапных выбросов угля и газа). Изложенные результаты использованы в системе комплексного обеспечения экологической безопасности функционирования горных предприятий.

Ключевые слова: экологическая безопасность, вентилятор главного проветривания, экологический критерий.

Основным направлением повышения эффективности добычи полезных ископаемых является интенсификация производства. Этот процесс имеет масштабное влияние на атмосферу, что делает актуальным обоснование технических решений по повышению экологической безопасности подземной разработки угольных месторождений [1,2].