

**МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНКИ КОМПЛЕКСУ ПАРАМЕТРІВ СТАНУ МАСИВУ ПОРІД ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМОГ БЕЗПЕКИ СИСТЕМ ПІДТРИМАННЯ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК****<sup>1</sup>Слащов І.М., <sup>1</sup>Макеєв С.Ю., <sup>1</sup>Слащова О.А.**<sup>1</sup>*Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України***МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ КОМПЛЕКСА ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ МАССИВА ПОРОД ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ ПОДДЕРЖАНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК****<sup>1</sup>Слащев И.Н., <sup>1</sup>Макеев С.Ю., <sup>1</sup>Слащева Е.А.,**<sup>1</sup>*Інститут геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины***METHODOLOGY FOR ASSESSING A SET OF ROCK MASSIF STATE PARAMETERS FOR ENSURING COMPLIANCE OF THE ROADWAY SUPPORT SYSTEMS WITH SAFETY REQUIREMENTS****<sup>1</sup>Slashchov I.M., <sup>1</sup>Makeiev S.Yu., <sup>1</sup>Slashchova O.A.**<sup>1</sup>*Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine*

**Анотація.** Представлені результати досліджень з визначення комплексу методів оцінки параметрів геотехнічної системи «порідний масив - гірничі виробки» для забезпечення стійкості та безпеки гірничих виробок. Методологія поєднує принципи математичного моделювання напружено-деформованого стану породного масиву методом скінчених елементів, методи прогнозування стійкості масиву порід і систем кріплення гірничих виробок, нові способи виявлення зон малоамплітудної тектоніки методом радіометричного контролю. Сукупність наукових результатів покладено в основу науково-методичних рекомендацій з комплексної оцінки геомеханічних і газодинамічних параметрів стану масиву порід для забезпечення безпеки ведення гірничих робіт. Рекомендації регламентують основні принципи параметричної ідентифікації геоінформаційними системами спільного протікання геомеханічних і фільтраційних процесів в породному масиві, що відрізняються урахуванням параметрів головних напружень і деформацій, розташування і поширеності зон непружних деформацій, змін об'ємів порово-тріщинного простору, а також залученням нових алгоритмів ідентифікації тріщинуватих зон методами радіометричного контролю продуктів розпаду радону в атмосфері гірничих виробок. Показано, що різні ізотопи радону можуть бути надійно зафіксовані аспіраційними методами радіометрії, а їх кількісні характеристики характеризують прояви геомеханічних і газодинамічних процесів в породному масиві. Визначення параметрів непружного деформування масиву гірських порід, як об'єкта параметричної ідентифікації в умовах інформаційної невизначеності, проводиться на базі сучасного програмного забезпечення GEO-RS®, що розроблене під керівництвом авторів в ІГТМ НАН України. Отримані наукові результати дають основу для подальшого удосконалення існуючих та розробки нових гібридних аналітико-експериментальних методів контролю безпеки геотехнічних систем, а також створення цифрових інформаційних систем попередження небезпечних ситуацій на промислових підприємствах.

**Ключові слова:** геотехнічна система, методи контролю масиву порід, напружено-деформований стан порід, моніторинг радону, безпека систем кріплення гірничих виробок.

**1 Вступ. Фактори невизначеності у методах превентивного контролю безпеки виробничого середовища шахт, які стримують інтенсифікацію гірничих робіт**

Підвищення інтенсивності та безпеки гірничих робіт при сучасній техніці і технологіях є досяжним завданням, оскільки технічні можливості сучасного обладнання і технологій видобутку вугілля в 3-5 разів перевищують досягнутий рівень навантаження на лаву. Разом з тим, інтенсифікація процесів вуглевидобутку стримується низькою стійкістю гірських порід і виробок, складною газодинамічною ситуацією, необхідністю обов'язкового дотримання

вимог безпеки виробничого середовища шахт, які пред'являються до гірничих технологій і систем підтримання виробок [1, 2]. Основними факторами ризику залишаються раптові різноманітні прояви геомеханічних і газодинамічних процесів, які відбуваються в породному масиві при веденні гірничих робіт [3].

Дослідження зазначених проблем, в більшості випадків, спрямовані на вивчення зміни стану масиву порід на основі надмірно ідеалізованих моделей і справедливих тільки для локальних умов емпіричних залежностей, часто, без урахування впливу раніше відпрацьованих виїмкових ділянок і газодинамічних процесів в породному масиві. Існуючі методи оцінки параметрів геомеханічної стійкості гірських порід і виробок, контролю і прогнозу проявів газодинамічних факторів недостатньо ефективні, так як вони враховують зі значними похибками реальний геомеханічний стан порід, їх газонасиченість і тріщинуватість. Невизначеність геомеханічних параметрів зон обвалення порід і вироблених просторів виїмкових ділянок шахт приводить до виникнення невизначеності параметрів систем підтримання гірничих виробок. Все це в комплексі обумовлює невідповідність параметрів охоронних систем реальним гірничотехнічним умовам і недотримання вимог безпеки щодо підтримання виробок, що призводить до неможливості збільшення інтенсивності гірничих робіт.

Забезпечення стійкості систем підтримання гірничих виробок, а, отже, і зниження ризиків виникнення аварійних і травмонебезпечних ситуацій можливо шляхом забезпечення моніторингу параметрів стану гірських порід навколо виробок, оцінки приймання рішень за допомогою цифрових інформаційних технологій, обґрунтування геомеханічних параметрів для систем превентивного контролю безпеки ведення гірничих робіт, вироблення практичних заходів щодо підвищення рівня безпеки геотехнічної системи з урахуванням параметрів напружено-деформованого стану (НДС) масиву гірських порід. Найбільш гостро стоїть питання розробки науково-методичного забезпечення з комплексної оцінки параметрів геотехнічної системи «породний масив - підтримання виробок», що включає сучасні принципи математичного моделювання геомеханічного і газового станів породного масиву, нові методи шахтного контролю процесів руйнування, способи виявлення зон малоамплітудної тектоніки, методи прогнозування стійкості масиву порід і охоронних систем гірничих виробок.

## **2 Методи досліджень**

Методи математичного моделювання геомеханічних і фільтраційних процесів з використанням законів фізики гірських порід і механіки суцільних середовищ; метод скінченних елементів, аналітичні і програмні моделі його реалізації; аналіз експериментальних даних; радіометричні методи шахтного контролю.

### 3 Результати і обговорення

#### 3.1 Базові співвідношення математичної моделі на основі теорії пружності

Управління процесом функціонування геотехнологічної системи «породний масив - гірничавиробка» представляється можливим, якщо відомі математичні залежності, що зв'язують розрахункові показники з початковими умовами і параметрами досліджуваної системи. Математичні методи механіки гірських порід засновані на положеннях теорії суцільного середовища, теорій пружності, пластичності і повзучості. Від того наскільки правильно і в рамках якої математичної моделі відтворені реальні умови залежить адекватність рішення задач.

Гірські породи відрізняються неоднорідністю і складаються з окремих мікрочастинок. Частинки зцементовані в м'яку або жорстку структуру з порами і тріщинами, часто заповненими газами або рідинами, і утворюють елементарний макрооб'єм. Поведінка такого середовища під навантаженням вельми складна, але його можна представити в більш простому вигляді, якщо розміри всіх елементів мікроструктури незрівнянно менше, ніж середній масштаб опису елемента породного масиву. Таким чином, розглядається гірська порода з хаотично організованими порами і тріщинами, для якої приймається допущення, що характеристики структури всередині кожного елемента однорідні, а поле параметрів вважається гладким і може порушуватися лише на поверхнях розриву.

Напруження в масиві описуються тензором напружень :

$$T = T_g + T_m = \begin{vmatrix} \frac{\nu}{1-\nu} \gamma H & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\nu}{1-\nu} \gamma H & 0 \\ 0 & 0 & \gamma H \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} T_0 + \Delta\sigma_m H & 0 & 0 \\ 0 & \psi(T_0 + \Delta\sigma_m H) & 0 \\ 0 & 0 & \chi(T_0 + \Delta\sigma_m H) \end{vmatrix}, \quad (1)$$

де  $T_g$  і  $T_m$  - гравітаційна і тектонічна складові силового поля,  $\nu$  - коефіцієнт Пуассона,  $\gamma$  - об'ємна вага;  $H$  - глибина розробки;  $T_0$  - значення горизонтальних тектонічних напружень на рівні денної поверхні або іншій площині відліку глибини;  $\Delta\sigma_m$  - вертикальний градієнт тектонічних сил (в загальному випадку змінна величина, що залежить від будови масиву і рельєфу земної поверхні);  $\psi$ ,  $\chi$  - коефіцієнти горизонтального і вертикального розпору в полі тектонічних сил.

В умовах об'ємної задачі теорії пружності в декартовій системі координат  $(x_1, x_2, x_3)$  умова статичного рівноважного напруженого стану визначається трьома (одержуваними шляхом кругової підстановки індексів  $i=1, 2, 3$ ) диференціальними рівняннями [4, 5]:

$$\frac{d\sigma_{x_i}}{dx_i} + \frac{d\tau_{x_i x_{i+1}}}{dx_{i+1}} + \frac{d\tau_{x_i x_{i+2}}}{dx_{i+2}} + \rho X_i = 0, \quad (2)$$

де:  $\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \sigma_{x_3}$  – нормальні компоненти тензора напружень по координатним осям  $x_1, x_2, x_3$ ;  $\tau_{x_1 x_2}, \tau_{x_1 x_3}, \tau_{x_2 x_3}$  – дотичні компоненти тензора напружень;  $X_1, X_2, X_3$  – проекції вектора об'ємних сил на координатні осі;  $\rho$  – щільність.

Умови сумісності деформацій для суцільного середовища визначаються шістьма (підстановкою  $i=1, 2, 3$ ) рівняннями:

$$\varepsilon_{x_i} = \frac{du_{x_i}}{dx_i}, \quad \gamma_{x_i x_{i+1}} = \frac{du_{x_i}}{dx_{i+1}} + \frac{du_{x_{i+1}}}{dx_i}, \quad (3)$$

де  $\varepsilon_{x_1}, \varepsilon_{x_2}, \varepsilon_{x_3}$  – нормальні відносні деформації по координатним осям  $x_1, x_2, x_3$ ;  $u_{x_1}, u_{x_2}, u_{x_3}$  – переміщення;  $\gamma_{x_1 x_2}, \gamma_{x_1 x_3}, \gamma_{x_2 x_3}$  – деформації зсуву.

Зв'язок між напруженнями і деформаціями в пружному середовищі в найбільш простому випадку ізотропного однорідного або неоднорідного лінійно деформованого тіла, якщо обмежуватися досить малими інтервалами деформацій:

$$\sigma_{x_i} = \frac{E}{1-\nu^2} \frac{du_{x_i}}{dx_i} + \frac{\mu E}{1-\nu^2} \frac{du_i}{dx_{i+1}}, \quad (4)$$

де  $E$  – модуль пружності, Па.

Умова сумісності деформацій і напружень:

$$\frac{d^2}{dx_{i+1}^2} (\sigma_{x_i} - \nu \sigma_{x_{i+1}}) + \frac{d^2}{dx_i^2} (\sigma_{x_{i+1}} - \nu \sigma_{x_i}) = 2(1+\nu) \frac{d^2 \tau_{x_i x_{i+1}}}{dx_i dx_{i+1}}. \quad (5)$$

Явні математичні залежності для такої складної системи малоприматні, тому слід застосовувати імітаційне моделювання, наприклад, з використанням методу скінченних елементів.

### 3.2 Реалізація математичної моделі методом скінченних елементів

Суть методу скінченних елементів (МСЕ) полягає в тому, що шукану безперервну величину апроксимують кусковим набором простіших функцій. У межах кожного елемента розрахункової схеми фізична модель залишається суцільною і безперервною. Послідовність проведення досліджень МСЕ: формування розрахункових вузлів, в яких визначаються величини роздільної функції і поділ досліджуваного об'єкта на скінченні елементи; встановлення залежностей між зусиллями і переміщеннями в «контактних» вузлах елемента, тобто побудова матриці жорсткості; складання системи алгебраїчних рівнянь, що виражають кінематичну (статичну) сумісність деформацій досліджуваного об'єкта, їх рішення та обчислення значень роздільної функції в розрахункових

вузлах; визначення компонент напружено-деформованого стану порід на основі знайдених значень роздільної функції системи [5-9].

Для двовимірної задачі значення невідомих вузлових переміщень:

$$\left[ u^{xy} \right] = \left[ u_j^x, u_j^y \right] \leftarrow \{u\} \Big|_{i++ j++}, \quad (6)$$

де:  $\{u^{xy}\}$  – вектор розрахованих переміщень вузлів

$$\{u\} = \left\{ u_k^x, u_l^x, u_m^x, u_k^y, u_l^y, u_m^y \right\}_i \leftarrow \left[ K^{MSS} \right]^{-1} \left\{ F^{El} \right\} \Big|_{i++};$$

$[K^{MSS}]$  – матриця жорсткості системи (Matrix Stiffness of Systems, MSS);  $\{F^{El}\}$  – вектор сил системи.

Масиви головних компонент пружних напружень  $\sigma^{Pr.el}$  і деформацій  $\varepsilon^{Pr.e}$ :

$$\left[ \sigma^{Pr.el} \right] = \left[ \sigma_{1_i}^{Pr.el}, \sigma_{3_i}^{Pr.el} \right] = 0,5 \left( \left( \sigma_i^x + \sigma_i^y \right) \pm \sqrt{\left( \sigma_i^x - \sigma_i^y \right)^2 + 4\tau_i^{xy}} \right) \leftarrow \left[ \sigma^{el} \right] \Big|_{i++},$$

$$\left[ \varepsilon^{Pr.el} \right] = \left[ \varepsilon_{1_i}^{Pr.el}, \varepsilon_{3_i}^{Pr.el} \right] = 0,5 \left( \left( \varepsilon_i^x + \varepsilon_i^y \right) \pm \sqrt{\left( \varepsilon_i^x - \varepsilon_i^y \right)^2 + 4\gamma_i^{xy^2}} \right) \leftarrow \left[ \varepsilon^{el} \right] \Big|_{i++}. \quad (7)$$

де  $[\sigma^{el}]$  і  $[\varepsilon^{el}]$  – осьові і дотичні пружні напруження і деформації;  $\sigma^x, \sigma^y, \varepsilon^x, \varepsilon^y$  – нормальні компоненти тензора напружень і деформацій по координатним осям  $x$  і  $y$ , які визначаються в результаті рішення матриці жорсткості системи МСЕ;  $\gamma^{xy}$  – деформації поперечного зсуву.

В результаті розрахунків отримуємо базові інформативні параметри напружено-деформованого стану породного масиву, табл. 1.

Таблиця 1 – Базові інформативні параметри оцінки НДС гірських порід

Найменування параметрів	Познач.	Од. вим.	Використання параметрів
Вузлові сили по осях $x$ і $y$	$F^x, F^y$	Н	Визначення сил, що діють в масиві
Вузлові зміщення по осях $x$ і $y$	$u^x, u^y$	м	Прогноз зсувів і деформацій контуру виробок
Максимальні і мінімальні головні напруження	$\sigma_1^{act}, \sigma_3^{act}$	Па	Прогноз розташування зон опорних навантажень, розвантажень, концентрації напружень
Значення осьових напружень	$\sigma_1^x, \sigma_3^y$	Па	Прогноз стійкості засобів кріплення
Дотичні напруження	$\tau^{xy}$	Па	Прогноз зародження зон зсуву і тріщин сколювання в масиві
Головні деформації	$\varepsilon_1, \varepsilon_3$	м	Прогноз проникності ділянок породного масиву
Деформації елементів по осях $x$ і $y$	$\varepsilon^x, \varepsilon^y$	м	Оцінка ступеня стиснення (розтягування) елементів середовища
Деформації зсуву	$\gamma^{xy}$	м	Прогноз зсуву породних шарів

### 3.3 Комп'ютерний аналіз непружних станів гірських порід

Фактичні деформаційні характеристики порід мають різні властивості, особливо при їх руйнуванні. Одні породи мають більш крихкі властивості, наприклад піщаник, інші - тим чи іншим ступенем пластичності (аргіліт, алевроліт). Тріщинуватість впливає на структуру, просторову неоднорідність та міцність порід. При спорудженні підземних гірничих виробок виникають додаткові системи тріщин, які характеризуються рухами по контактам магістральних тріщин, їх розкриттям і зміною орієнтування в просторі. Вони визначають характер деформування гірничих виробок і є найважливішим фактором, від якого залежить проникність, колекторські властивості гірських порід, а також інтенсивність виділення газів в гірничі виробки. Прогнозування техногенної тріщинуватості, навіть наближене, становить значний науковий і практичний інтерес, так як, на відміну від первинної тріщинуватості, розвиток техногенних тріщин залежить не тільки від випадкових природних гірничо-геологічних факторів, а й від гірничотехнічних параметрів гірничих робіт, які можуть бути керованими. Маючи відомості про параметри систем тріщин можна оцінювати спільне протікання геомеханічних і газодинамічних процесів в породному масиві.

Непружні деформації гірських порід виникають в результаті мікроковзань і розвитку мікротріщин всередині їх полікристалічної або гранульованої структури, відбувається формування площин ковзання та тріщин відриву. Перевищення напруженнями зв'язків, що цементують мінерали, або сил сухого тертя досить точно описано умовою Кулона-Мора

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + \tau_0 \quad (8)$$

де  $\tau$  - напруження зсуву;  $\sigma_n$  - напруження, нормальне до площадки зсуву;  $\varphi$  - кут внутрішнього тертя;  $\tau_0$  - межа міцності на зрушення (зчеплення).

Допускається, що гранична умова виконується на безлічі контактів між гранулами (зернами, блоками) і це відповідає граничному стану елементарного об'єму гірської породи. Якщо гранична умова виконана, то процес пластичного деформування розглядають спільно з рівняннями енергетичного балансу.

Базова процедура МСЕ визначає НДС пружного середовища (див. п. 3.1, 3.2). Для дослідження різних законів пластичної течії МСЕ поєднується з процедурою методу початкових напружень. Реалізація деформаційної теорії пластичності здійснюється процедурою розрахунку [7, 10, 11].

Масив осьових фактичних напружень для зони непружного деформування:

$$\left[ \sigma^{\text{el act}} \right] = \left[ \sigma_i^{x \text{ act}}, \sigma_i^{y \text{ act}}, \tau_i^{xy \text{ act}} \right] \leftarrow \begin{cases} \sigma_i^{x \text{ act}} = \sigma_1^{\text{act}} \cos^2 \alpha_\sigma^{xy} + \sigma_3^{\text{act}} \sin^2 \alpha_\sigma^{xy} \\ \sigma_i^{y \text{ act}} = \sigma_1^{\text{act}} \sin^2 \alpha_\sigma^{xy} + \sigma_3^{\text{act}} \cos^2 \alpha_\sigma^{xy} \\ \tau_i^{xy \text{ act}} = 0,5 \left( \sigma_1^{\text{act}} - \sigma_3^{\text{act}} \right) \sin 2\alpha_\sigma^{xy} \end{cases} \Bigg|_{i++} \cdot \quad (9)$$

де  $\left\{ \sigma_1^{\text{act}n} \right\}_{II}$  – вектор, що містить фактичні максимальні головні напруження для

зони розміщення (зона II) для параболічної функції зниження міцності в зоні розміщення на ділянці від граничного напруження  $\sigma_1^{\text{lim}}$  до залишкового  $\sigma_1^{\text{res}}$

$$\left\{ \sigma_1^{\text{act}_n} \right\}_{\text{II}} = \sigma_1^{\text{lim}} - \left( \frac{\varepsilon_{1_i}^{\text{Pr.el}_n} - \varepsilon_1^{\text{lim}}}{(k^{\text{in}} - 1)\varepsilon_1^{\text{lim}}} \right)^2 (\sigma_1^{\text{lim}} - \sigma_1^{\text{res}}) - \varepsilon_1^{\text{lim}} \leftarrow \left\{ \begin{array}{l} \left[ \varepsilon^{\text{Pr.el}} \right] \\ \left\{ \sigma^{\text{lim}} \right\}_{\text{I}} \end{array} \right|_{i++}; \quad (10)$$

де  $n$  – номер циклу обчислень (ітерації),  $\varepsilon_1^{\text{Pr.el}_n}$ ,  $\sigma_1^{\text{Pr.el}_n}$  – поточні розрахункові значення максимальних головних деформацій і напружень на  $n$ -ій ітерації.

Для зон непружного деформування граничні максимальні головні деформації, виражені через фактичну межу міцності породи та її реальні фізико-механічні властивості:

$$\varepsilon_1^{\text{lim}} = \frac{\sigma_1^{\text{lim}} (1 - \nu_i^2)}{E \left( 1 + \nu \operatorname{ctg} \xi - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} (\operatorname{ctg} \xi + \nu) \right)}, \quad (11)$$

де  $\sigma_1^{\text{lim}}$  – граничні максимальні головні напруження, МПа;  $E$  – модуль пружності, МПа;  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя, град.

Маючи результати вирішення рівнянь (7), (11) отримуємо вектори, що містять значення мінімальної і максимальної компонент пружних і непружних деформацій. У рівнянні (11) мінімальна головна гранична деформація  $\varepsilon_3^{\text{lim}}$  представлена як функція максимальної головної деформації через заданий параметр  $\operatorname{ctg} \xi$  ( $\varepsilon_1 \operatorname{ctg} \xi = \varepsilon_3$ ), що визначає закон пластичної течії (при  $\xi = \pi/4$  – течія рівнооб'ємна). Значення головних деформацій в результаті обчислень дорівнюють фактичним головним деформаціям, які відповідають заданій деформаційній моделі середовища.

Девіаторна частина тензора деформацій характеризує зміну форми ділянок породного масиву в процесі руйнування. У той же час, зміни кульової частини тензора деформацій, яка визначається за величиною мінімальних головних нормальних деформацій елементів моделі (див. (7), характеризують зміни об'ємів порово-тріщинного простору в породах, а, отже, і зміни його проникності при проведенні гірничих виробок. При цьому приймається допущення, що деформація пористого середовища дорівнює зміні об'єму порово-тріщинного простору, оскільки стисливість частинок скелета мізерно мала по відношенню до загальної стисливості породи.

### 3.4 Оцінка параметрів орієнтації систем техногенних тріщин в породному масиві

Запропоновано метод, який, на відміну від відомих рішень, дозволяє визначати лінії ковзання в умовах деформаційної пружнопластичної моделі середовища, а також проводити аналіз всієї досліджуваної області за домінуючими структурними дефектами в масиві порід [12, 13].

Орієнтація векторів максимальних головних деформацій для досліджуваної області визначається в результаті обчислення параметрів НДС породного масиву за значеннями головних деформацій і деформацій поперечного зсуву. Реалізація умови граничного стану відбувається на двох площадках, нахилених під кутами  $\beta_1$  і  $\beta_2$  до вектору максимального головного стискаючого напруження (рис. 1).

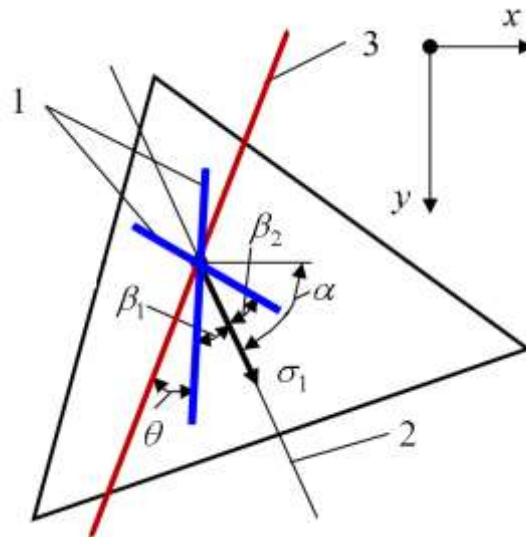


Рисунок 1 – Схема к визначенню параметрів орієнтації систем техногенних тріщин в породному масиві: 1 – орієнтація площин зсуву; 2 – орієнтація максимальних головних напружень; 3 – орієнтація структурного дефекту в породах

Оцінка кутів нахилу проекцій площадок ковзання для кожного елемента розрахункової схеми визначається виразом:

$$\beta_1, \beta_2 = \alpha_{\varepsilon}^{xy} \pm (\pi/4 - \varphi/2). \quad (12)$$

де  $\alpha_{\varepsilon}^{xy}$  – кути нахилу векторів максимальних головних деформацій, які показують, наскільки колишній до деформації поперечний перетин відхиляється від поперечного перетину деформованого елемента

$$\alpha_{\varepsilon}^{xy} = 0,5 \arctg \left( 2\gamma^{xy} / (\varepsilon_1 - \varepsilon^y) \right). \quad (13)$$

Оцінку параметрів нових систем тріщин в умовах навантаження проводять з урахуванням їх переважного поширення по існуючим системам природної тріщинуватості і структурним дефектам в гірських породах, наприклад, контактам шарів або тектонічних порушень. Системи тріщин з однаковим або близьким орієнтуванням розвиваються з найбільшою інтенсивністю і організовуються в магістральні тріщини, які часто є причиною різкого зниження стійкості і раптових зрушень порід покрівлі і підосви, збільшення віджиму вугілля і порід, розшарувань приконтурної частини масиву, раптових обвалень, динамічних навантажень на кріплення та ін. Більшість таких проявів гірського тиску супроводжується виділенням газу в виробки і вимагає вжиття заходів щодо безпеки гірничих робіт.



### 3.5 Особливості урахування надлишкових газових тисків при оцінці геомеханічного стану гірських порід

Урахування надлишкових газових тисків в масиві порід можна виконати тільки із застосуванням гібридних технологій моделювання. Методика комп'ютерного аналізу заснована на тому, що в процесі розміщення порід вплив на породний масив гірського і газового тиску, з одного боку, мають близьку фізичну сутність, а з іншого – суттєві відмінності. Гірський тиск в породах призводить до їх всебічного нерівнокомпонентного стиску або розтягу. Газовий тиск діє тільки в порово-тріщинному просторі з однаковою інтенсивністю в усіх напрямках. Так як розвиток локальних тріщин не тягне за собою повну втрату несучої здатності, то зруйновані породи мають залишкову міцність і зберігають залишковий рівень напружень. Тиск газу, навпаки, має тенденцію тільки до зниження і прагне до мінімального значення з причини фільтрації газу в вироблені простори і гірничі виробки (рис. 2). Якщо падіння напруження на інтервалі від початку непружного деформування до залишкової міцності уявити коефіцієнтами зміни максимальних головних напружень  $k_\sigma$  і тиску газу  $k_p$  (змінюються від нуля при відсутності напружень до одиниці в точці межі міцності) залежно від коефіцієнта зміни деформації  $k_\varepsilon$  за час розміщення породи  $t_g$ , то видно, що дані процеси мають істотні відмінності. Міцність порід знижується швидко в залежності від їх крихкості (відбувається розвиток магістральних тріщин), в той же час газовий тиск в масиві зберігається на досить високому рівні в залежності від фільтраційної здатності порід.

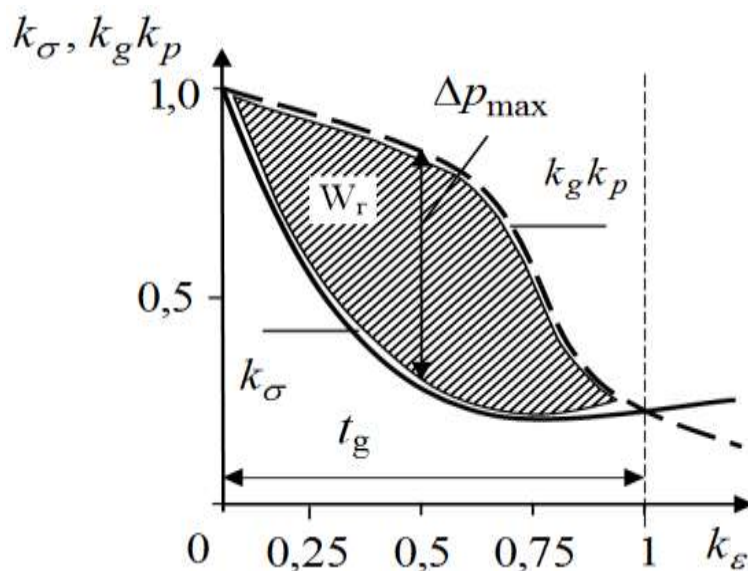


Рисунок 2 – Зміни коефіцієнтів спаду напружень і тиску газу при розміщенні порід (для наочності графіки суміщені і показані в порівнянних координатах)

В результаті рішення геомеханічної задачі без урахування тиску газу для кожного елемента моделі обчислюється робота сил гірського тиску. Додаткова робота  $W_g(\varepsilon)$ , що реалізована силами тиску газу при поточному значенні максимальної головної деформації  $\varepsilon_l$ , розраховується:

- якщо значення деформації елемента потрапляє в зону розміщення:

$$W_g(\varepsilon) = \frac{k_\varepsilon}{k_g} (k^{in} - 1) (\varepsilon_1^{lim} (k_g - 1) - 0,5 \varepsilon_1^{lim^2} (0,24 k_g - 2,74) + 0,33 \varepsilon_1^{lim^3} (0,22 k_g - 3,1) - 0,25 \varepsilon_1^{lim^4} (0,81 k_g - 1,17)), \quad (14)$$

де  $k_g$ , – коефіцієнт від нуля до одиниці, що характеризує зміну максимумальних головних напружень в залежності від коефіцієнта зміни деформації  $k_\varepsilon$  в зоні розміщення;

- якщо значення деформації елемента потрапляє в зону залишкової міцності, то враховується повна робота сил газового тиску (коефіцієнт  $k_g$  у формулі (14) приймається рівним одиниці).

Роботи сил гірського і газового тисків підсумовуються, обчислюється приріст напружень і сил. Приріст сил автоматично розподіляється між вузлами розрахункової схеми шляхом додавання до матриці сил системи, встановлюється ознака продовження ітерацій. Повторення ітерацій проводиться до тих пір, поки кожен елемент досліджуваної схеми при розрахованому значенні напруження не матиме деформацію, відповідну деформаційній моделі насиченого газом середовища.

Оцінка поведінки газонасиченого масиву при спільній дії сил гірського і газового тиску дозволяє ефективно вирішувати цілий комплекс актуальних проблем, що пов'язані з інтенсифікацією гірничих робіт. Зокрема, це відноситься до проблем: збереження тривалої стійкості виробок; прогнозу умов формування викидів вугілля, порід і газу в крайовій частини гірничих виробок; підвищення ефективності дегазації, планування гірничих робіт, управління гірським тиском та ін. Технологія комп'ютерного аналізу непружних станів породного масиву та визначення орієнтації домінуючих систем тріщин з урахуванням надлишкових газових тисків реалізована в програмному комплексі GEO-RS<sup>©</sup> [13, 14], який використовується, у тому числі як елемент цифрової системи безпеки шахт [15].

### **3.6 Інтегральні параметри оцінки напружено-деформованого стану гірських порід, що отримують з використанням геоінформаційних систем**

За результатами розрахунків (див. п.п. 3.1-3.4) отримуємо базові інформативні параметри НДС породного масиву (вузлові зміщення і сили, значення осьових деформацій, головних і дотичних напружень та ін.). На основі базових параметрів отримують інтегральні характеристики. Рекомендації з використання базових та інтегральних інформативних параметрів наведені в табл. 2.

### **3.7 Моніторинг і контроль дочірніх продуктів розпаду радону як інформативних параметрів оцінки геомеханічного стану гірських порід**

Радон в виробки шахт надходить, в основному, шляхом дифузії продуктів

розпаду природного урану  $U^{238}$  з оточуючих гірських порід і проникнення через мікротріщини в породах разом з конвективними потоками газів. Внесок від різних джерел в сумарну об'ємну активність радону в атмосфері гірничих виробок різний і залежить від багатьох факторів. Максимальний вплив надає геологічна будова шарів порід, наявність тріщин, розломів і геологічних порушень [16, 17]. Тому зони тектонічних порушень, зазвичай, характеризуються аномально високими концентраціями радону, які у багато разів перевищують місцевий фон.

Таблиця 2 – Інтегральні інформативні параметри оцінки геомеханічного стану гірських порід

Найменування параметрів	Познач.	Од. вим.	Використання параметрів
Повні зміщення вузлів моделі	$u^{xy}$	м	Прогноз зсувів і конвергенції контуру виробок
Зміни напружень $\sigma_1$ у часі	$\sigma_1^{t+\Delta t} - \sigma_1^t$	Па	Зміна навантажень на кріплення при технологічних процесах
Зміни орієнтації $\sigma_1$ у часі	$d\alpha_\sigma^{xy}/dt$	град/доб.	Прогноз впливу змін параметрів гірничої технології на поширення зон підвищеної тріщинуватості
Інтенсивність зміни максимальних напружень $\sigma_1$	$d\sigma_1/dt$	Па/доб.	Прогноз потенційно небезпечних областей породного масиву
Девіатор напружень	$\sigma_1 - \sigma_3$	Па	Аналіз нерівнокомпонентності поля напружень
Девіатор деформацій	$\varepsilon_1 - \varepsilon_3$	-	Аналіз зміни форми ділянок породного масиву в процесі руйнування
Орієнтація площадок зсуву	$\beta_1, \beta_2$	град	Прогноз орієнтації магістральних тріщин
Орієнтація вектора напружень $\sigma_1$	$\alpha_\sigma^{xy}$	град	Прогноз орієнтації максимальних сил і магістральних тріщин
Орієнтація вектора $\varepsilon_1$	$\alpha_\varepsilon^{xy}$	град	Прогноз напрямків зрушень масиву
Тип руйнування	$ps_1, ps_2$	ознак.	Можливі об'єми обвалень порід
Площа зон непружних деформацій	$S_{ZID}$	м <sup>2</sup>	Оцінка об'ємів зон непружних деформацій
Зміна площі ЗНД	$S_{ZID}^{t+\Delta t}$	м <sup>2</sup>	Прогноз руйнувань масиву за проміжок часу
Площа зони розриву суцільності	$S_{ten}$	м <sup>2</sup>	Прогноз об'ємів можливих обвалень порід
Зміна площ елементів	$\Delta S$	м <sup>2</sup>	Оцінка зміни тріщино-порового простору і тріщинуватості
Потенційна енергія деформування	$E^{def}$	Дж	Оцінка енергетичного балансу масиву і ступеня його небезпеки до раптових проявів гірського тиску

Найбільш перспективними для оперативного контролю геомеханічних процесів в гірничих виробках служать значущі для практичного застосування параметри: об'ємна активність радіоактивних ізотопів полонію  $Po^{218}$  ( $C_{RaA}$  –

період напіврозпаду 3,05 хв.), свинцю  $Pb^{214}$  ( $C_{RaB}$  – період напіврозпаду 26,8 хв.), вісмуту  $Bi^{214}$  ( $C_{RaC}$  – період напіврозпаду 19,7 хв.), еквівалентна рівноважна об'ємна активність ДПР радону  $222 C_{дпр}$  (ЕРОА Ra, енергетичний внесок  $\sim 98\%$ ) і, в меншій мірі, торону  $C_{дпт}$  (ЕРОА To, енергетичний внесок  $\sim 2\%$ ).

Однією з важливих характеристик ДПР радону для досліджень спільного протікання геомеханічних і газодинамічних процесів є зміни їх активності з плином часу. Якщо кількість радіоактивного матеріалу не поповнюється (немає припливу в досліджувану зону породного масиву), то відносини між кількістю радіоактивності і часом є експонентними [18]. Частка активності радіоактивного матеріалу  $N$ , який залишається після певного часу:

$$N = (0,5)^{t/T} = (0,5)^n, \quad (15)$$

де  $t$  – минулий час (години, хвилини і т.д.);  $T$ ,  $n$  – період та число напіврозпаду.

Графік оцінки залишкової активності ДПР радону показаний на рис. 3.

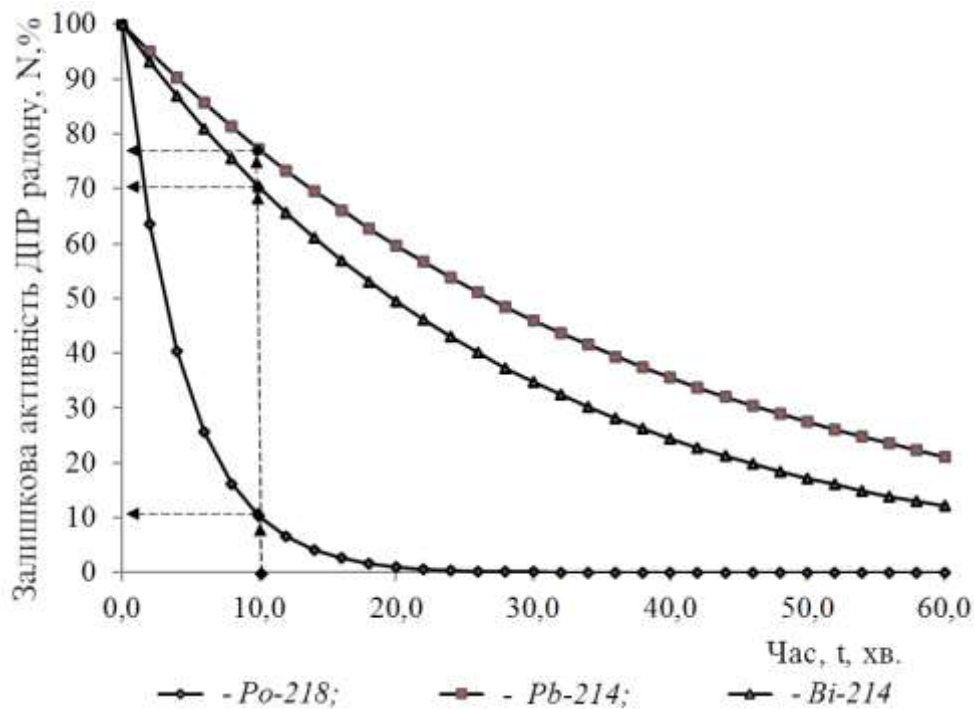


Рисунок 3 – Оцінка залишкової активності ДПР радону

Інтегральна енергетична характеристика  $\alpha$ -випромінювання визначається по еквівалентним рівноважним об'ємним активностям (ЕРОА) дочірніх продуктів розпаду радону і торону [16, 18, 19]:

$$C_{Rn\ eq} = \sum_1^n n C_{Rn} FR_n = 0,1046 C_{RaA} + 0,5161 C_{RaB} + 0,3793 C_{RaC}, \quad \text{Бк/м}^3, \quad (16)$$

де  $C_{Rn}$  – ЕРОА ДПР радону, Бк/м<sup>3</sup>;  $n$  – число короткоживучих ДПР;  $FR_n$  – коефіцієнт, що визначає ставлення ЕРОА ДПР радону в повітрі до його реальної об'ємної активності;  $C_{RaA}$ ,  $C_{RaB}$ ,  $C_{RaC}$  – концентрації активності в

повітрі атомів ДПР радону  $Po^{218}$ ,  $Pb^{214}$  и  $Bi^{214}$ , відповідно:

$$C_{RaA} = \lambda_{RaA} N_{RaA}; C_{RaB} = \lambda_{RaB} N_{RaB}; C_{RaC} = \lambda_{RaC} N_{RaC} \quad (17)$$

де  $\lambda_{RaA}$ ,  $\lambda_{RaB}$ ,  $\lambda_{RaC}$  – постійні радіоактивного розпаду нуклідів RaA, RaB і RaC, відповідно,  $c^{-1}$ ;  $N_{RaA}$ ,  $N_{RaB}$ ,  $N_{RaC}$  – концентрації в повітрі атомів  $Po^{218}$ ,  $Pb^{214}$  і  $Bi^{214}$ , відповідно, атомів/м<sup>3</sup>.

Накопичення активності короткоживучих ДПР радону  $Po^{218}$ ,  $Pb^{214}$  і  $Bi^{214}$ , осаджені на фільтрі радіометричного приладу через час  $t$  після початку прокачування визначаються за формулами (2.17). При цьому  $\alpha$ -активність фільтра в будь-який момент часу після початку прокачування становить  $C_\alpha = C_{RaA} + C_{RaC}$ ,  $\beta$ -активність фільтра  $C_\beta = C_{RaB} + C_{RaC}$ . Вимірюючи активність ДПР радону, які осіли на фільтрі, визначаються об'ємні активності для  $Po^{218}$ ,  $Pb^{214}$  і  $Bi^{214}$ , а також рівень прихованої енергії. Зокрема, прилад РГА-09МШ (розробка ІГТМ НАН України і ЗАТ «Тетра», [21]) фіксує 12 показників, основними з яких є продукти розпаду радону.

Дислокації новоутворених в процесі деформування систем мікротріщин виявляються на базі радіометричного моніторингу шляхом аналізу інтенсивностей зростання  $\alpha$ -випромінювання  $Po^{218}$ , яке в два-чотири рази перевищує інтенсивність росту ізотопів  $Pb^{214}$  и  $Bi^{214}$ . Стрибкоподібні сплески наведеної концентрації ДПР радону пояснюються різними швидкостями їх переміщення через пори і тріщини в тектонічно порушених зонах масиву, а також змінами напружено-деформованого стану порід в приконтурній зоні виробок [17]. Параметри змін активності  $\alpha$ -випромінювань окремих ізотопів радону, концентрацій метану і їх співвідношень в гірничих виробках можуть бути використані для прогнозування геомеханічних і газодинамічних процесів в породному масиві шляхом диференціації в часі змін напружено-деформованого стану порід, порово-трещинного простору, орієнтації домінуючих систем тріщин і визначення параметрів газопереноса навколо виробок в процесі ведення гірничих робіт.

#### 4 Висновки

В результаті досліджень визначено комплекс методів для оцінки параметрів геотехнічної системи «породний масив-гірничка виробка», які включають принципи математичного моделювання напружено-деформованого стану породного масиву методом скінченних елементів, методи прогнозування стійкості масиву порід і охоронних систем гірничих виробок, нові способи виявлення зон малоамплітудної тектоніки методами радіометричного контролю. Сукупність наукових результатів покладено в основу розробки науково-методичних рекомендацій з комплексної оцінки геомеханічних і газодинамічних параметрів стану масиву порід для забезпечення безпеки систем підтримання гірничих виробок. Рекомендації регламентують основні принципи параметричної ідентифікації геоінформаційними системами спільного протікання геомеханічних і фільтраційних процесів в породному

масиві, що відрізняються урахуванням параметрів головних напружень і деформацій, розташування і поширеності зон непружних деформацій, змін об'ємів порово-тріщинного простору, а також залученням нових алгоритмів ідентифікації тріщинуватих зон методами радіометричного контролю дочірніх продуктів розпаду радону в атмосфері гірничих виробок. Отримані наукові результати дають основу для подальшого удосконалення існуючих та розробки нових гібридних аналітико-експериментальних методів контролю безпеки геотехнічних систем, а також створення цифрових інформаційних систем попередження небезпечних ситуацій на промислових підприємствах.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bulat A. F., Mineev S.P., Prusova A.A. (2016) Generating methane adsorption under relaxation of molecular structure of coal // *Journal of Mining Science*, № 52 (1), 70-77.
2. Шевченко В.Г., Слащев А.И. Информационные системы безопасности и производительности подземных горных работ. Київ: Наукова думка. 2018. 285 с.
3. Булат А.Ф., Слащев И.Н., Слащева Е.А. Комплексирование методов оценки геомеханических и газодинамических процессов в породном массиве для систем контроля производственной среды шахт // *Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. Днепр. 2017. № 134. С. 3-21.*
4. Турчанинов И.А. и др. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. Л.: Наука, 1978. 256 с.
5. Gallager R. Finite Element Analysis. Fundamentals. Moscow: Nauka, 1984.
6. Hwang C.T., Morgenstern N.R., Murray D.W., On solution of plain strain consolidation problems by finite element methods, *Can. Geotech.* 1971. № 109. С. 109-118.
7. Слащев И.Н. Разработка математической модели и технологии компьютерного анализа тектонически нарушенного структурно-неоднородного породного массива // *Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАНУ. Днепр, 2012. № 104. С. 94-109.*
8. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. М.: МГУ, 1990. 190 с.
9. Слащев И.Н. Применение информационных технологий для повышения эффективности и безопасности горных работ // *Уголь Украины. 2013. № 2. С. 40-43.*
10. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987. 221 с.
11. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, Butterworth-Heinemann, 2005.
12. Слащев, И.Н., Иконников М.Ю. Моделирование трещиноватости как основа прогноза газового режима добычных участков глубоких шахт // *Сб. науч. трудов НГУ. Днепропетровск: РВК НГУ, 2008. № 31. С. 236-245.*
13. Слащев, И.Н. Оценка техногенной трещиноватости методами математического моделирования // *Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. Днепропетровск, 2010. № 85. С. 239-250.*
14. Слащев И.Н. Метод учета избыточных газовых давлений при решении геомеханических задач современными компьютерными технологиями // *Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. Днепропетровск, 2010. № 88. С. 112-118.*
15. Слащев И.Н., Шевченко В.Г., Слащев А.И. Оптимизация информационной системы оперативного прогноза геомеханических процессов для поддержки принятия решений по безопасности шахт // *Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. Днепропетровск, 2013. № 112. С. 129-144.*
16. Булат А.Ф. и др. Взаимосвязи между геомеханическими процессами и эмиссией газа метана и продуктов распада радона в горные выработки угольных шахт // *Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. Днепропетровск, 2014. № 114. С. 272-286.*
17. Булат А.Ф., Слащев И.Н. Использование продуктов распада радона как информативных параметров для оценки геомеханического состояния горных пород // *Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. Днепр, 2017. № 132. С. 3-16.*
18. Жуковский М.В., Ярмошенко И.В. Радон: Измерение, дозы, оценка риска. Екатеринбург: УрО РАН ИПЭ, 1997. 231с.
19. Togo L., Gheorghe R. Mathematical simulation of radon migration in porous materials, Proc. IRPA Regional Congr. on Rad. Prot. in Central Europe, 1999, Budapest, Hungary, 606-615.
20. Перепелиця В.Г., Яланський А.О., Паламарчук Т.А. Апаратурні та методичні розробки застосування методів радіаційного випромінювання для контролю зміни стану масиву при вуглевидобуванні // *Геотехнічна механіка: міжвід. зб. наук. праць / ИГТМ НАН України. Дніпропетровськ, 2007. № 73. С. 55-61.*

#### REFERENCES

1. Bulat A. F., Mineev S.P. and Prusova A.A. (2016), "Generating methane adsorption under relaxation of molecular structure of coal", *Journal of Mining Science*, no. 52 (1), pp. 70-77
2. Shevchenko V.G. and Slashchov A.I. (2018), *Informatsionnye sistemy bezopasnosti i proizvoditelnosti truda podzemnykh gornykh robot* [Information systems for underground mining safety and productivity], Naukova Dumka, Kiev, UA.

3. Bulat, A.F., Slashchov, I.N. and Slashchova O.A. (2017), "Evaluation methods of interconnected geomechanical and gas dynamic processes in the rock massif for the systems of working medium control in the mines", *Geo-Technical Mechanics*, no. 134, pp. 3-21.
4. Turchaninov I.A. and etc. (1978), *Tektonicheskiye napryazheniya v zemnoy kore i ustoychivost gornyykh vyrabotok* [Tectonic tensions in the earth's crust and stability of the mine workings] Nauka, Leningrad, SU.
5. Gallager R. (1984), *Finite Element Analysis. Fundamentals*, Nauka, Moscow, SU.
6. Hwang C.T., Morgenstern N.R. and Murray D.W. (1971) "On solution of plain strain consolidation problems by finite element methods", *Can. Geotech.*, no. 109, pp. 109-118
8. Slashchov I.M. (2012), "The development of mathematical model and technology of computer analysis of tectonically disturbed structurally-heterogeneous rock massif", *Geo-Technical Mechanics*, no. 104, pp. 94-109.
9. Slashchov I.M. (2013), "The use of information technology to increase the efficiency and safety of mining operations", *Coal of Ukraine*, no. 2, pp. 40-43.
10. Fadeyev A.B. (1987), *Metod konechnykh elementov v geomekhanike* [The finite element method in geomechanics], Nedra, Moscow, SU.
11. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. and Zhu J.Z. (2005), *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, Butterworth-Heinemann
12. Slashchov I.N. (2008), "Fracturing modeling as a basis for forecast the gas regime of mining sections of deep mines", *Sbornik nauchnykh trudov NGU*, no. 31, pp. 236-245.
13. Slashev I.N. (2010), "Assessment technogenic fracturing methods of mathematical simulation", *Geo-Technical Mechanics*, no. 85, pp. 239-250.
14. Slashchov I.M. (2010), "Method for accounting for excess gas pressures when solving geomechanical problems with modern computer technologies", *Geo-Technical Mechanics*, no. 88, pp. 112-118.
15. Slashchov 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.
16. Bulat A.F., Slashchov I.M. and Slashchova O.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.
17. Bulat A.F. and Slashchov I.N. (2017), "The use of radon decay products as informative parameters for evaluation of the rocks geomechanical condition", *Geo-Technical Mechanics*, no. 132, pp. 3-16.
18. Zhukovskiy M.V. and Yarmoshenko I.V. (1997), *Radon: izmereniye, dozy, otsenka riska* [Measurement, dose, risk assessment], UrO RAN IPE, Yekaterinburg, RU.
19. 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.
20. Perepelytsya V.H., Yalansky A.O. and Palamarchuk T.A. (2007), "Aparaturni ta metodychni rozrobky zastosuvannya metodiv radiatsiyonoho vyprominyuvannya dlya kontrolyu zminy stanu masyvu pry vuhlevydobuvanni", *Geo-Technical Mechanics*, no. 73, 55-61

---

#### Про авторів

**Слащов Ігор Миколайович**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу Проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, [IMSlashchov@nas.gov.ua](mailto:IMSlashchov@nas.gov.ua)

**Макеєв Сергій Юрійович**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу Проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, [smakeev@ukr.net](mailto:smakeev@ukr.net)

**Слащова Олена Анатоліївна**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу Проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, [OASlashchova@nas.gov.ua](mailto:OASlashchova@nas.gov.ua)

#### About the authors

**Slashchov Ihor Mykolaiovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in the Department of Mineral Mining at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine (IGTM, NAS of Ukraine), Dnipro, [IMSlashchov@nas.gov.ua](mailto:IMSlashchov@nas.gov.ua)

**Makeiev Serhiy Yuriiovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in the Department of Mineral Mining at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine (IGTM, NAS of Ukraine), Dnipro, [smakeev@ukr.net](mailto:smakeev@ukr.net)

**Slashchova Olena Anatoliivna**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in the Department of Mineral Mining at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine (IGTM, NAS of Ukraine), Dnipro, [OASlashchova@nas.gov.ua](mailto:OASlashchova@nas.gov.ua)

---

**Аннотация.** Представлены исследования по определению комплекса методов оценки параметров геотехнической системы «породный массив - горная выработка» для обеспечения устойчивости и безопасности

горных выработок. Методология совмещает принципы математического моделирования напряженно-деформированного состояния породного массива методом конечных элементов, методы прогнозирования устойчивости массива пород и систем крепления горных выработок, новые способы выявления зон малоамплитудной тектоники методом радиометрического контроля. Совокупность научных результатов положена в основу научно-методических рекомендаций по комплексной оценке геомеханических и газодинамических параметров состояния массива пород для обеспечения безопасности ведения горных работ. Рекомендации регламентируют основные принципы параметрической идентификации геоинформационными системами совместного протекания геомеханических и фильтрационных процессов в породном массиве, отличающиеся учетом параметров главных напряжений и деформаций, расположения и распространения зон неупругих деформаций, изменений объемов порово-трещинного пространства, а также привлечением новых алгоритмов идентификации трещиноватых зон методами радиометрического контроля продуктов распада радона в атмосфере горных выработок. Показано, что различные изотопы радона могут быть надежно зафиксированы аспирационным методами радиометрии, а их количественные характеристики характеризуют геомеханические и газодинамические процессы в породном массиве. Определение параметров неупругого деформирования массива горных пород, как объекта параметрической идентификации в условиях информационной неопределенности, производится на базе современного программного обеспечения GEO-RS<sup>®</sup>, разработанного под руководством авторов в ИГТМ НАНУ. Полученные научные результаты дают основу для дальнейшего совершенствования существующих и разработки новых гибридных аналитико-экспериментальных методов контроля безопасности геотехнических систем, а также создания цифровых информационных систем предупреждения опасных ситуаций на промышленных предприятиях.

**Ключевые слова:** геотехническая система, методы контроля массива пород, напряженно-деформированное состояние пород, мониторинг радона, безопасность систем крепления горных выработок.

**Annotation.** The authors present their studies on determining a set of methods for assessing parameters of the geotechnical system "rock massif-mine workings" and for ensuring compliance of the roadway support systems with safety requirements. The methodology combined principles of mathematical modeling of the rock massif stress-strain state by the finite element method; methods for forecasting the rock massif and roadway support system stability; and new ways for identifying areas with low-amplitude tectonics by the radiometric control method. The set of the scientific findings create a basis for scientific and methodological recommendations on comprehensive assessing parameters of the rock massif geomechanical and gas-dynamic state and on ensuring the mining operations safety. The recommendations include basic principles for parametrical identification of co-occurrence of geomechanical and gas-drainage processes in the rock massif with the help of geoinformation systems, and differ by taking into account parameters of the main stresses and strains, location and distribution of zones with inelastic deformation, changes in the volume of the pore-fracture space, and by using new algorithms for identifying fracture zones by methods of radon decay product radiometric control in the air of mine workings. It is shown that various radon isotopes can be clearly detected by aspiration radiometry techniques, and their quantitative characteristics can characterize geomechanical and gas dynamic processes in the rock massif. Parameters of inelastic deformation of the rock massif as an object of parametric identification in conditions of information uncertainty are evaluated by the advanced software GEO-RS<sup>®</sup> designed in the IGTM, NASU, by the group headed by the authors. The obtained scientific results provide the basis for further improvement of the existing and development of new hybrid analytical and experimental methods for monitoring safety of geotechnical systems and creation of digital information systems for preventing dangerous situations in industrial enterprises.

**Keywords:** geotechnical system, rock massif control methods, stress-strain state of rocks, radon monitoring, safety of roadway support systems.

*Стаття надійшла до редакції 26.11.2018*

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук С.А. Курносом*