

УДК 539.3:622.411.333:533.17

©2008. М.М. Андреев, В.В. Камишан, М.М. Андреев, Р.І. Мануйленко

## ГІРНИЧИЙ ТИСК – ОСНОВНИЙ ФАКТОР РОЗВИТКУ ДИНАМІЧНИХ ЯВИЩ ВУГЛЕНОСНОГО МАСИВУ

При вийманні вугільного пласта відбувається перерозподіл напружень і деформацій. У вугіллі можна виділити зону зростання напружень, зону спадання напружень і зону розвантаження. Під впливом напруженого стану в гірничому масиві виникають термодинамічні явища, утворюються вода і метан.

**Вступ.** Аналізуючи різні погляди на комплекс питань теорії гірничого тиску, варто визнати, що через суперечливість уявлень, обумовлених різними підходами до суті розглянутих тих чи інших окремих або сукупних вихідних положень, необхідно вдосконалити інженерні методи прогнозу та керування станом вугленосного масиву для всього різноманіття геологічних і технологічних параметрів відпрацювання вугільних пластів [1]. Натурні спостереження дозволили встановити, що в околі виробленого простору вугленосного масиву формуються звід розвантаження та зона техногенних тріщин, обумовлені конвергенцією бічних порід. Поперед у вугільного вибою формується зона опорного тиску і, пов'язані з ним, зона випереджальних тріщин у породному масиві та хвилі Вебера [1]. Породний масив із розроблювальним вугільним пластом моделюється анізотропним пружно-пластичним середовищем.

**1. Визначення напружень у пласті.** Розглядається початкова стадія розробки вугільного пласта до змикання порід покрівлі та підшви. Передбачається, що вугільний пласт залягає горизонтально. Глибина розробки позначена  $Z$ , координати крайових положень вугільного пласта  $-x_1$  і  $x_1$ . Корисна копалина являє собою пласт, затиснутий навколишніми породами. Цей пласт під дією сил при розкритті переходить у пластичний стан. Вважаємо вугільний пласт анізотропним, товщина його дорівнює  $2h$ . Виберемо декартову систему координат, у якій вісь  $x$  спрямована уздовж пласта, вісь  $z$  – перпендикулярно пласту до денної поверхні. Вважаємо, що вугілля залягає достатньо протяжно по осі  $y$ , має місце задача плоскої деформації. Тому як критерій пластичності використаємо умову Мізеса-Хіла

$$\frac{(\sigma_x - \sigma_z)^2}{4g^2} + \tau_{zx}^2 = k^2. \quad (1)$$

Система рівнянь, що визначають поле напружень і переміщень, крім умови пластичності, містить у собі також рівняння рівноваги

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

рівняння нестисливості

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

і рівняння зв'язку між напруженнями та деформаціями

$$g^2 \frac{\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial z}}{\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}} = 0. \quad (4)$$

Тут  $\sigma_x, \sigma_z$  – напруження вздовж відповідних осей,  $\tau_{zx}$  – зсувні напруження,  $k = \frac{\sigma_{zs}}{\sigma_{st}}$  – межа міцності при зсуві,  $\sigma_{st}$  – межа міцності при стисканні,  $g = \frac{\sigma_{st}}{\sigma_{zc}}$  – коефіцієнт пластичної анізотропії,  $u, w$  – зміщення вздовж осей  $x, z$ . У роботах [2, 3] виведена формула розподілу зсувних напружень на контакті пласта і порід

$$\tau_{zx} = \pm r(x); \quad r(x) = -k \frac{c(x - x_0)}{\sqrt{c^2(x - x_0)^2 + g^2}} \quad (5)$$

$2h$  – товщина пласта. Величини  $c$  і  $x_0$  визначаються експериментально. Значення  $c$  залежить від темпу посування вибою. Можливі також граничні випадки [2, 3]. Для знаходження поля напружень усередині пласта застосовується чисельний метод характеристик. Компоненти тензора, записані у вигляді

$$\sigma_x = g(\sigma - k \sin 2\theta); \quad \sigma_z = g(\sigma + k \sin 2\theta); \quad \tau_{zx} = k \cos 2\theta, \quad (6)$$

задовольняють умові пластичності (1). Розв'язання зводиться до знаходження значень функцій  $\sigma, \theta$ . Система диференціальних рівнянь, отримана з рівнянь пластичності (2) за допомогою підстановки (6), має гіперболічний тип. Усередині області є 2 сімейства характеристичних ліній, у точках перетинання визначаються значення функцій  $\sigma, \theta$ . Рівняння характеристик мають вигляд

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx} = -g \operatorname{ctg} 2\theta + \sqrt{1 + g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta}; & \frac{g\sigma}{2k} - \psi(\theta) = \operatorname{const} = \alpha \\ \frac{dy}{dx} = -g \operatorname{ctg} 2\theta - \sqrt{1 + g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta}; & \frac{g\sigma}{2k} + \psi(\theta) = \operatorname{const} = \beta, \end{cases} \quad (7)$$

де  $\psi(\theta) = \int \sin 2\theta \sqrt{1 + g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta} = E\left(2\theta, \sqrt{\frac{g^2-1}{g}}\right)$  – еліптичний інтеграл.

Розіб'ємо пласт на зони характеристичними лініями. Позначимо координату вибою через  $x_1$ . У зоні 1 поле напружень рівномірне. Зона 2 обмежена двома харак-

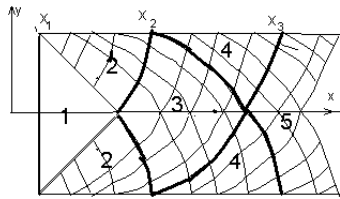


Рис. 1. Характеристичні лінії

теристиками та лінією контакту. З межі зон 1 і 2 проведемо характеристичні лінії. Зі співвідношень (7) знайдемо координати вузлів сітки і значення параметрів  $\sigma, \theta$

у вузлових точках. На контактні значення  $\theta$  визначаються формулами (5) і (6). Так напруження визначаються в усій зоні. Лініями межі зон 2 і 3 будуть криві, що виходять із середини пласта до контактних поверхонь, абсциси точки перетинання ліній з контактною поверхнею позначимо  $x_2$ . У зоні 3 маємо початкову характеристичну задачу. Ця зона обмежена 4 характеристичними лініями, на двох із них напруження відомі. У зоні 4 напруження визначають, як і в зоні 2. Позначимо абсцису точки перетинання межі зони з лінією контакту через  $x_3$ . У такий спосіб знайдемо розподіл напружень у всьому пласті.

**2. Обчислення напружень у породах.** Далі знайдемо напружений стан навколишніх порід. Як і раніше, напрямком напластування становить вісь  $x$  прямокутної декартової системи координат, вісь  $z$  спрямована до денної поверхні. Вихідний стан порід викликаний їх власною вагою і в декартовій системі координат має вигляд

$$\sigma_z^{(0)} = -\gamma(Z - z); \quad \sigma_x^{(0)} = -\lambda\gamma(Z - z); \quad \tau_{zx}^{(0)} = 0, \quad (8)$$

$\gamma$  – питома вага гірничих порід,  $\lambda$  – коефіцієнт бічного розпору.

При розробці вугільного пласта до вихідних напружень додається поле, пов'язане з виробкою. Тому напруження шукаємо у вигляді суми

$$\sigma_z = \sigma_z^{(0)} + \sigma_z^{(1)}; \quad \sigma_x = \sigma_x^{(0)} + \sigma_x^{(1)}; \quad \tau_{zx} = \tau_{zx}^{(0)} + \tau_{zx}^{(1)}. \quad (9)$$

Щоби знайти додаткові напруження, необхідно розв'язати крайову задачу для півплощини як верхньої, так і нижньої. Верхній індекс '+' для напружень, переміщень і функцій стосується покрівлі, верхній індекс '-' – підшви. Якщо індекс відсутній, то рівність справедлива і для покрівлі, і для підшви. Сформулюємо крайові умови. У пласті напруження знайдені. Для спрощення вважаємо, що в кожній зоні вони розподілені лінійно по  $x$ .

$$\begin{aligned} \sigma_z &= -\gamma Z \left( -a_k \frac{x}{h} + c_k \right), \quad x \in (-x_{k+1}; -x_k), \quad y = 0, \\ \sigma_z &= -\gamma Z \left( a_k \frac{x}{h} + c_k \right), \quad x \in (x_k; x_{k+1}), \quad y = 0, \quad k = 1, 2, \dots, n-1. \end{aligned} \quad (10)$$

За межами зони опорного тиску пласт вважається нестисливим.

$$v^+ = h, \quad v^- = -h, \quad |x| > x_n, \quad y = 0. \quad (11)$$

У зоні вільного стану порід відсутні нормальні і дотичні зусилля

$$\sigma_z = \tau_{zx} = 0, \quad -x_1 < x < x_1. \quad (12)$$

З рівнянь (10)–(12), враховуючи співвідношення (8), (9), одержимо крайові умови для додаткових напружень. Компоненти напружень і зміщень виражаються через функції узагальнених комплексних змінних [4]

$$\begin{aligned} \xi_j &= x + \mu_j z; \quad \sigma_x = 2Re(\mu_1^2 \Phi_1'(\xi_1) + \mu_2^2 \Phi_2'(\xi_2)); \\ \tau_{zx} &= -2Re(\mu_1 \Phi_1'(\xi_1) + \mu_2 \Phi_2'(\xi_2)); \quad \sigma_z = 2Re(\Phi_1'(\xi_1) + \Phi_2'(\xi_2)); \\ u &= 2Re(p_1 \Phi_1(\xi_1) + p_2 \Phi_2(\xi_2)) + u_0; \quad w = 2Re(q_1 \Phi_1(\xi_1) + q_2 \Phi_2(\xi_2)) + w_0; \\ p_j &= A_{11} \mu_j^2 - A_{14} \mu_j + A_{13}; \quad q_j = A_{13} \mu_j + \frac{A_{33}}{\mu_j} - A_{34}; \quad j = 1, 2, \end{aligned} \quad (13)$$

$A$  – симетрична ( $6 \times 6$ ) матриця, що виражає співвідношення між напруженнями і деформаціями – закон Гука,  $\mu_j$  – корені характеристичного рівняння [4]. Вплив виробки має локальний характер, звідси крайова умова

$$\Phi'_1(\infty) = \Phi'_2(\infty) = 0. \quad (14)$$

Розв'язок крайової задачі дається формулою Келдиша-Сєдова [5]

$$\begin{aligned} F(\xi) = & \frac{1}{2} + \sum \frac{a_k \xi / h + c_k}{2\pi i} \ln \frac{i\sqrt{\xi^2 - x_{k+1}^2} \sqrt{x_{k+1}^2 - x_k^2} - \xi x_k + x_{k+1}^2}{x_{k+1}(x_k - \xi)} - \\ & - \sum \frac{a_k \xi / h - c_k}{2\pi i} \ln \frac{i\sqrt{\xi^2 - x_{k+1}^2} \sqrt{x_{k+1}^2 - x_k^2} - \xi x_k - x_{k+1}^2}{x_{k+1}(-x_k - \xi)} \\ \xi = x + iz; & \Phi'_1(\xi_1) = \frac{\mu_2}{\mu_2 - \mu_1} F(\xi_1); \Phi'_2(\xi_2) = \frac{\mu_1}{\mu_1 - \mu_2} F(\xi_2). \end{aligned} \quad (15)$$

Умова обмеженості розв'язку (14) дозволяє знайти межу зони опорного тиску, згідно (15) вона переписеться у вигляді

$$\frac{1}{2} + \sum \left( \frac{a_k x_{k+1}^2 i + a_k x_k \sqrt{x_{k+1}^2 - x_k^2} + a_k x_k^2 i}{\pi(\sqrt{x_{k+1}^2 - x_k^2} i - x_k) h} - \frac{c_k}{\pi} \ln \left( \frac{x_k - \sqrt{x_{k+1}^2 - x_k^2}}{x_{k+1}} \right) \right) = 0. \quad (16)$$

Співвідношення (16) є трансцендентним рівнянням, розв'язок якого – дійсне число. При  $n=3$  задачу розв'язав С.М.Федотов [6]. При розв'язанні нашої задачі вихідні дані були такими: глибина розробки  $Z=1000$ м, питома вага порід  $\gamma = 2.5 \cdot 10^4 H/\mu^3$ , як породу покрівлі взято піщанистий сланець, для якого  $E_x = 1.07 \cdot 10^{10}$ Па,  $E_z = 5.21 \cdot 10^{10}$ Па,  $\nu_{xz} = 0.41$ ,  $\nu_{zx} = 0.19$ ,  $G_{xy} = 4.21 \cdot 10^{10}$ Па,  $G_{yz} = 4.21 \cdot 10^{10}$ Па,  $G_{zx} = 1.22 \cdot 10^{10}$ Па. Характеристичне рівняння має корені  $\mu_1 = 0.496$ ;  $\mu_2 = 3.142$ ; Координати вибою  $x_1 = 30$ м,  $-x_1 = -30$ м. Напруження у вугільному пласті знайдемо методом характеристик, границю зони опорного тиску обчислимо з рівняння (16), а напруження в породах визначаються формулами (13), (15). У результаті одержимо

$$\begin{aligned} x_1 = 30; \sigma_z = 0; a_1 = 0.003; c_1 = -0.094; x_2 = 31.85; \sigma_z = -0.01; a_2 = 0.011; \\ c_2 = -0.344; x_3 = 33.74; \sigma_z = -0.04; a_3 = 0.019; c_3 = -0.617; x_4 = 35.71; \\ \sigma_z = -0.10; a_4 = 0.027; c_4 = -0.910; x_5 = 37.75; \sigma_z = -0.21; a_5 = 0.037; \\ c_5 = -1.224; x_6 = 39.87; \sigma_z = -0.39; a_6 = 0.043; c_6 = -1.549; x_7 = 42.10; \\ \sigma_z = -0.59; a_7 = 0.051; c_7 = -1.886; x_8 = 44.43; \sigma_z = -0.87; a_8 = 0.058; \\ c_8 = -2.225; x_9 = 46.87; \sigma_z = -1.23; a_9 = 0.065; c_9 = -2.561; x_{10} = 49.42; \\ \sigma_z = -1.69; a_{10} = 0.072; c_{10} = -2.986; x_{11} = 52.09; \sigma_z = -2.23; a_{11} = 0.079; \\ c_{11} = -3.195; x_{12} = 54.86; \sigma_z = -2.88; a_{12} = 0.083; c_{12} = -3.450; \\ x_{13} = 57.74; \sigma_z = -2.94; n = 13. \end{aligned} \quad (17)$$

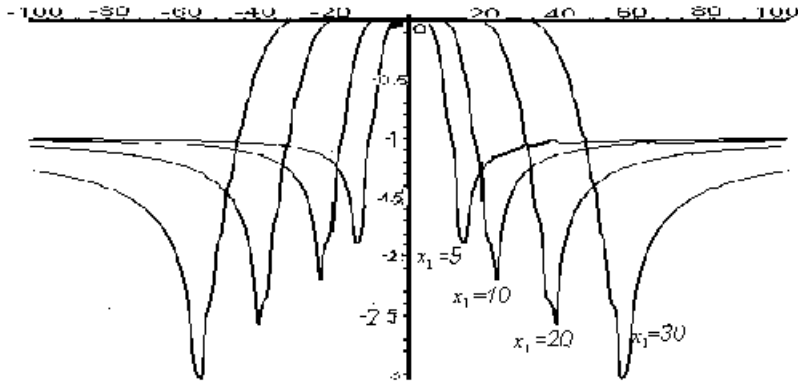


Рис. 2. Вертикальні напруження поблизу пласта

Дослідження показують, що при  $x_1 = 30\text{м}$  вертикальні напруження в пласті досягають величини вихідного гірничого тиску на ділянці  $S$  довжиною від 15 до 20м від вибою. Далі напруження зростають, на відстані 30м від вибою перевищують за модулем вихідний гірничий тиск удвічі. Горизонтальні напруження поблизу вибою практично рівні вихідним. При віддаленні від вибою вони зростають по абсолютній величині, але різниця між горизонтальними і вертикальними напруженнями всередині пласта зменшується. На рис.3 і 4 показано розподіл напружень у покрівлі, білим кольором позначено зони розтягуючих напружень, більш темний колір відповідає сильнішому стиску.

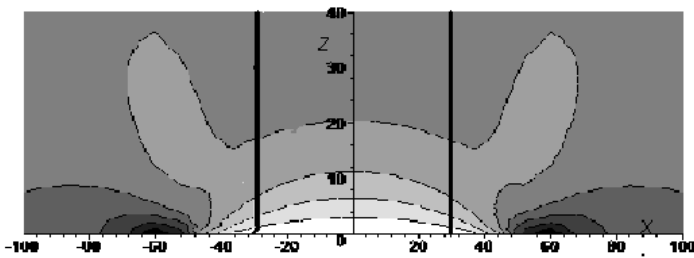


Рис. 3. Горизонтальні напруження в покрівлі

У зоні опорного тиску горизонтальні напруження можуть за модулем перевершити вертикальні. Довжина зони опорного тиску досягає 10-15м. Далі напруження убувають за модулем, і на відстані 70м від вибою їх величина мало відрізняється від значення напружень у недоторканому масиві. З даних малюнка видно, що в області виробленого простору й поблизу вибою породи перебувають у розвантаженому стані. Далі напруження зростають по абсолютній величині, за межами зони опорного тиску убувають. Вплив виробки для горизонтальних напружень є більш локальним, ніж для вертикальних, уже при  $z=40\text{м}$  вони дорівнюють вихідному гірничому тиску. На вертикальні напруження вплив виробки зберігається на відстані

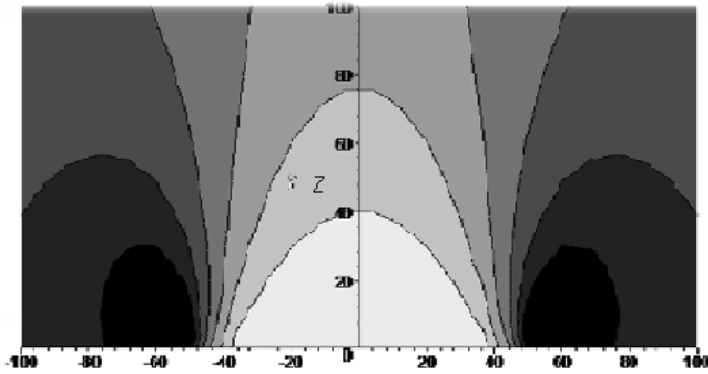


Рис. 4. Вертикальні напруження в покрівлі

до 100м від пласта.

Методи теорії пружності та пластичності дозволяють визначити стан вуглепородного масиву на початковій стадії розробки корисної копалини. Надалі слід ураховувати багато чинників, які впливають на стан масиву, зокрема, процеси руйнування в пласті та породах, динамічні явища, утворення в масиві води та метану тощо.

**3. Фізико-хімічні процеси в масиві.** Властивості вугленосного масиву настільки різноманітні й мінливі в кожному місці ведення гірничих робіт, що важко прикласти методи математичної статистики не тільки для якої-небудь шахти, але навіть для окремої виробки. І це пов'язано не тільки з мінливістю в широкому діапазоні товщини тих пластів, що розвантажують гірничими роботами від геостатичного тиску, а також із мінливістю їхніх фізико-хімічних і, насамперед, тривкісних властивостей. За даними Л. Вокера геостатичний тиск  $\gamma Z$  перевищує межу міцності порід на стиск на відносно невеликих глибинах  $Z$ : глинистих сланців і піщаників – 0,75-1,8км, (межа міцності змінюється в діапазоні 175-420кг/м<sup>3</sup>), кварциту й мarmуру – близько 2,5 (700), кристалічних сланців і гранітів – 4,2 (1050), базальту – близько 5,0 (1400). Р.Квапил вважає, що в цих умовах породи втрачають свої кристалічні і здобувають пластичні властивості. Перебудова кристалічної структури призводить до закриття всіх пор і тріщин у масиві, якщо до цього вони були в мінералах. Подальше збільшення навантаження супроводжується нагромадженням потенційної енергії, що може бути реалізована збільшенням щільності впакування молекул і атомів (підвищенням їхнього енергетичного зв'язку) і/або формуванням перехідної структури з найбільшим рівнем вільної енергії – активного комплексу. Відомо, що стратиграфічна глибина занурення вугільного пласта марки Д становить більше 3,5км, а суперантрацитів – сягає за 18км. Опорний тиск на призабіній ділянці масиву в 1,5-5 разів перевищує геостатичний. І говорити про генетично пористо-тріщинувату структуру вугленосного масиву осадових порід не має сенсу [1, 7, 8]. Відсутність методів прогнозу зміни вуглепородної товщі при її розвантаженні від геостатичного тиску, ігнорування її газоводонесних властивостей призводить до прорахунків очікуваних навантажень на кріплення гірничих виробок, невизначене

ності місць виникнення аномально підвищених напружень у вугленосному масиві. Переважаючим травматичним фактором у вугільній промисловості незмінно залишається обвалення гірничих порід і падіння шматків. А завали гірничих виробок нерідко кваліфікуються як "раптові". Науково-дослідні роботи та розробка інженерних методів прогнозу і керування газодинамічними проявами вугленосного масиву здійснюються на основі моделей і гіпотез, яким властиві деякі невідповідності реальній картині описуваних явищ.

Горюча маса є найслабшою ланкою масиву з погляду його тривкісних властивостей. На думку деяких фахівців, у породах розпорошена органічна маса (детрити) становить від 60 до 90% від загальної горючої маси вугленосного масиву. У піщаниках її вміст коливається від 1,5 до 5,0%. Тому при дослідженні характеру формування напружень у масиві довкола виробок слід враховувати фізико-хімічні властивості вугільної речовини не тільки в пласті, а й у детритах. Найбільше визнання серед вуглехіміків одержала макромолекулярна модель горючої маси вугілля, запропонована голландським ученим Ван-Кревеленом [1]. Вона представлена 2 структурами: графітоподібним ядром вуглецю (ЯВ) і бічними ланцюгами (БЛ) – вуглеводами різного ступеня полімеризації. Для різних типів вугілля будується структурна модель, де частка ЯВ збільшується з ростом ступеня метаморфізму вугілля. Недоліки моделі полягають у тому, що не розкривається механізм трансформації однієї стадії метаморфізму в іншу та не залишається місця для газів і води, що виділяються з вугілля при видобуванні. Глобулярна модель дає картину пористо-сорбційній гіпотезі газоємності пластів, але не пояснює генетику "материнської" вологості і не зв'язує розміри глобули зі ступенем метаморфізму вугілля. Відсутність загальноновизнаної надійної моделі структури горючої маси утрудняє враховувати її властивості при вивченні стану гірничого масиву. Складність рішення проблеми полягає в тому, що при побудові теоретичних моделей вугленосного масиву найбільш надійним є тільки один параметр – геостатичний тиск у даній точці. Перерозподіл напружень у породному масиві довкола пройденої виробки є функцією фізико-хімічних його властивостей.

До моделі Ван-Кревелена у якості основного структурного елемента додається активний комплекс (АК). БЛ представлений вуглеводним полімером з різним енергетичним рівнем структурних зв'язків водню Н, кисню О, вуглецю С; ЯВ – вуглецем графітоподібної структури з найменшим рівнем вільної енергії; АК – іонізованими складовими і елементами структур БЛ із розірваними зв'язками і максимальним рівнем вільної енергії. БЛ забезпечують структурний зв'язок між макромолекулами. На етапі доінверсійного метаморфізму при зростанні тиску на вугільний пласт відбувається деструкція частини БЛ із найменшим рівнем зв'язків і нагромадження об'єму АК. Зростання АК характеризується збільшенням рухливості та ступеня проникності елементів. При відповідному зовнішньому тиску на вугілля і концентрації АК найактивніша його частина залишає пласт і спрямовується вбік менших тисків, формуючи в міцних і пористих структурах порід розпорошену органічну масу – детрити D. Частина найбільш активних елементів вуглецю доповнює структуру ЯВ. Згідно з принципом Ле-Шател'є утворення рідиногазової фази речовини при

цьому виключено [7–9].

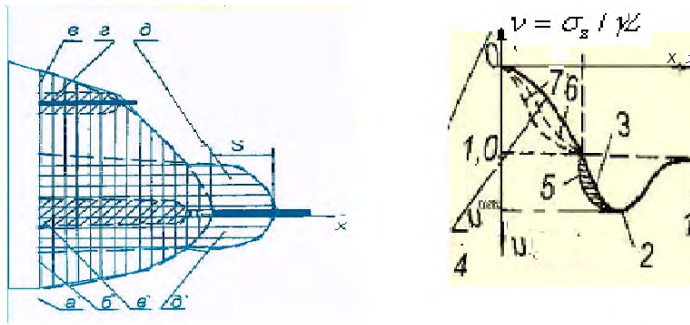


Рис. 5. Формування техногенних тріщин довкола виробки і петлі гістерезису поблизу пласта

На рис. 5 показано формування петлі гістерезису поблизу вибою. Узагальнена епюра тиску на пласт: 1 – геостатичний тиск ( $\gamma Z$ ); 2 – зростаючий опорний гірничий тиск (ОГТ); 3 – спадаючий ОГТ; 4 – спадаючий (менше  $\gamma Z$ ) гірничий тиск; 5 – надлишковий внутрішній тиск у макромолекулі горючої маси; 6, 7 – надлишковий відносно спадаючого менше  $\gamma Z$  тиск; Зони техногенних тріщин: а-а' – зона розвитку тріщин (ЗРТ); б-б' – зона проміжного колектора (ЗПК); в-в' – зона крупних сколів (ЗКС); г-г' – зона контактних тріщин (ЗКТ); д-д' – зона випереджуючих тріщин шириною  $S$  (ЗВТ). На етапі постінверсійного метаморфізму зменшення тиску на вугільний пласт реалізується витратою АК, направленою на відновлення структури БЛ макромолекули. Формування молекули води при цьому можливо тільки за умови перевищення швидкості "підняття" пласта швидкості утворення молекули води. Промисловий метаморфізм призабойної частини вугільного пласта характеризується трьома етапами (рис.5): (а) зростанням опорного тиску від геостатичного  $\gamma Z$  до максимального опорного  $\nu_{max} \gamma Z$ , де  $\nu_{max}$  – коефіцієнт концентрації тиску на пласт, максимальний (ділянка кривої 2 на рис. 5); (б) зниженням опорного тиску до  $\nu = 1$  на ділянці  $L - S$ , де  $L$  – відстань від вибою до площини максимуму опорного тиску; (ділянка кривої 3 на рис. 5); (в) зниженням тиску на ділянці  $S$ , де  $\nu < 1$ , (ділянка кривої 4 на рис.5). На етапі (а) структурні перетворення макромолекули вугілля аналогічні доінверсійному періоду. Через короткочасність процесу збільшення об'єму АК не супроводжується витоком із пласта вбік менших тисків частини його структури. Доповнення структури ЯВ можливо тільки якщо  $\nu \cdot \gamma Z > \gamma H$ , де  $H$  – максимальна глибина стратиграфічного занурення вугілля в точці інверсії. На етапі (б) структурно-фазові перетворення макромолекули вугілля аналогічні постінверсійному метаморфізму. Але тут формування молекули води обумовлено протидією зниженню опорного тиску. Якщо на етапі (а) наростаючий опорний тиск стискає вугільний пласт, то на етапі (б) внутрішній тиск перевищує знищуючий опорний і пласт збільшує свою товщину. Гістерезис внутрішнього тиску пласта ніби наближає до вугільного вибою опорний, і різко зростає градієнт його зниження (ділянка кривої 5 на рис. 1). На етапі (в) утворення молекули води недостатньо, щоб компенсувати зниження тиску, виникає спонтанний процес формування газової фази



речовини (принцип Ле-Шател'є). На рис.6 показано формування метанових потоків у вугільному пласті при зниженні гірничого тиску на пласт менше за геостатичний унаслідок промислової метаморфізації горючої маси в координатах: інтенсивність потоку, умовні одиниці – відстань від даної точки пласта до вибою в метрах.

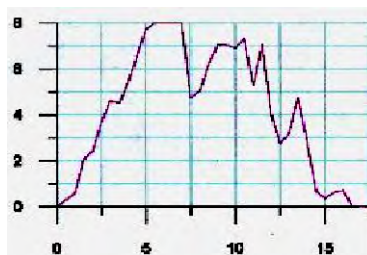


Рис. 6. Виділення метану з призабійної зони

У шахтних умовах експериментальні дослідження ефективності видобування метану з розроблювального пласта свердловинами, що екранують, показали, що спочатку зі свердловини виділяється вода, а потім починається інтенсивне виділення метану. Величина  $S$  на різних шахтах змінювалася від 12,5 до 29,3м. Визначення місць формування молекули метану шляхом зондування розроблювального пласта у 9-й східній лаві пласта  $c_{11}$  шахти "Південно-Донбаська" №3 виконано методом магнітно-резонансної локації. За результатами трьох зондувань установлено, що метан утворився на ділянці  $S$ , а її розмір змінювався від 11,8 до 15,6м [10].

#### Висновки.

1. Макромолекулярна структура горючої маси вугілля складається із трьох основних частин: бічних ланцюгів, графітоподібного ядра і активного комплексу.
2. При вийманні вугільного пласта відбувається перерозподіл напружень у масиві: виникають зони розвантаження і зони концентрації напружень, у зоні виробленого простору горизонтальні напруження можуть бути розтягувальними.
3. Методами теорії пружності і пластичності розраховано розміри зони розвантаження  $S$  і віддалення від вибою до місця максимуму опорного тиску  $L$ . Співвідношення  $S/L$  співпало з результатами натурних спостережень.
4. Гетерогенна структура горючої маси на призабійній частині вугільного пласта і наявність активного комплексу забезпечують нерозривність напружень у всій області її існування. При дослідженні геомеханічного стану масиву після первинної посадки покрівлі слід урахувувати формування потоків води і метану та їхній вплив на напружено-деформований стан.

1. *Агроскин А.А.* Физика угля. – М.: "Недра", 1965. – 315с.
2. *Космодамианский А.С., Левшин А.А., Кодаж Н.И., Ревва В.Н.* Пластическое состояние анизотропного слоя при его сжатии между жесткими плитами // Физика и техника высоких давлений, 1995. – №1. – С.49-56.
3. *Мануйленко Р.И.* Метод характеристик в задаче о сжатии пластического слоя // Математические модели физических процессов и их свойства. Международный научно-методический семинар. – Тезисы докладов. – Таганрог, 1997. – С.67.

4. *Лехницкий С.Г.* Метод характеристик в задаче о сжатии пластического слоя // Математические модели физических процессов и их свойства. Международный научно-методический семинар. – Тезисы докладов. – Таганрог, 1997. – С.67.
5. *Мусхелишвили Н.И.* Сингулярные интегральные уравнения. – М.: Наука, 1968. – 512с.
6. *Левшин А.А., Витушко О.В., Федотов С.Н.* Напряженно-деформированное состояние массива горных пород при разработке пласта полезного ископаемого с изменяющимися упруго-пластическими свойствами // Геотехническая механика. – Днепропетровск, 2000. – Вып.13 – С.3-12.
7. Вопросы теории горного давления / Под общей ред. *А.А.Борисова*. – М.: "Госгортехиздат", 1961. – 300с.
8. Курс физической химии / Под общей ред. *Я.И.Герасимова*. – М.: "Химия", 1973. – 622с.
9. *Хенней Н.* Химия твердого тела. – М.: "Мир", 1971. – 224с.
10. *Андреев М.М., Камишан В.В., Андреев М.М., Ульянов В.В.* Термодинамика угленосного массива в аспекте пассивной магнитно-резонансной локации недр // Уголь Украины. – 2006. – №10. – С.36-40.

ТЗОВ "Екометан", м. Донецьк, Україна,  
Інститут прикладної математики і механіки НАН України  
khapilova@iamm.ac.donetsk.ua

Получено 19.05.08