

Д-р техн. наук І.О.Садовенко
(ДВНЗ «НГУ»)
канд. фіз.-мат. наук В.А. Мащенко
(Рівненський державний гуманітарний
університет)

МЕТОД ОЦІНКИ ВЕЛИЧИНИ ПОВЕРХНЕВОЇ ЕНЕРГІЇ ГІРСЬКИХ ПОРІД

В рамках моделі поверхневих дефектів пропонується метод оцінки поверхневої енергії горних порід. Локалізація поверхневих дефектів в горних породах визначається розповсюдженням поверхневих акустических хвиль Рэлея. На основі рівняння Рэлея для продольних, поперечних і поверхневих хвиль проведена оцінка коефіцієнта поверхневого натяження горної породи і проведено розрахунок енергії руйнування при динамічному техногенному процесі.

METHOD FOR EVALUATING RATE OF SURFACE ENERGY IN THE ROCKS

Within the model of surface defects, a method for evaluating rate of surface energy in the rocks is proposed. Localization of the surface defects in rocks is determined by propagation of surface acoustic Rayleigh's waves. Basing on the Rayleigh equation for the longitudinal, transverse and surface waves, coefficient of the rock surface tension is evaluated, and breaking energy in dynamic technological processes is calculated.

Вступ.

Аналіз природи динамічних техногенних процесів є актуальним і важливим питанням з точки зору безпечної експлуатації геотехнічних систем (ГТС). Техногенні явища, що обумовлені безпосередньою і опосередкованою дією геомеханічних рухів на об'єкти ГТС визначаються процесом реакції гірського масиву внаслідок накопичення запасів потенціальної енергії пружних деформацій гірської породи в геотехнічній системі і обмеженої її дисипації. В процесі динамічного техногенного явища енергія різних частин гірських масивів змінюється і перерозподіляється у відповідності із законом збереження енергії, а її баланс при такому процесі в ГТС можна представити наступним чином [1]

$$\sum_i W_i = W_p + \Delta K + W_B + W_C + W_B, \quad (1)$$

де W_i – складові енергії, що надходить і акумулюється в ГТС за рахунок динамічних процесів та пружних деформацій в гірських породах; W_p – енергія, що витрачається на руйнування оточуючих порід; ΔK – кінетична енергія уламків матеріалу, що руйнується; W_B – енергія, що поглинається боковими породами поблизу місця динамічного техногенного явища; W_C – енергія сейсмічних коливань; W_B – енергія ударної повітряної хвилі.

Головним чинником при аналізі енергетичного балансу є розрахунок величини W_p , важливий не тільки для оцінки перерозподілу енергії при динамічному техногенному процесі, а і для визначення фізичних умов нестійкості (в тому

числі і енергетичних) при математичному розв'язку задач гірничої геомеханіки. Оцінку величини W_p проводять за наступними співвідношеннями [1]

$$W_p = gS_p ; \quad (2)$$

$$W_p = 2g_0\Delta S_1, \quad (3)$$

де g – ефективна поверхнева енергія, S_p – сумарна поверхня частинок породи, що руйнується, g_0 – енергія, що поглинається на одиниці площі перерізу матеріалу, що руйнується; ΔS_1 – збільшення породної поверхні виробки (величина в двічі більша від величини ΔS сумарного приросту площі породи і покрівлі виробки).

Зважаючи на те, що співвідношення (2) і (3) визначають одну і ту ж величину, експериментальне значення одного із параметрів (g , g_0) правих частин рівностей дає можливість провести оцінку величини W_p , та провести кореляцію між ними та величинами S_p і ΔS_1 , які відповідно характеризують певним чином, структуру породи, що руйнується та геомеханічний процес руйнування об'єкту ГТС.

Метою роботи є оцінка величини поверхневої енергії, при руйнуванні гірських порід, на основі моделі поверхневих дефектів.

Обґрунтування моделі поверхневих дефектів.

Процес руйнування гірничої породи з точки зору енергоємності можна отожднювати із послідовним поглинанням енергії площинними дефектами, в реальних умовах за наявності поверхневих сил. Оскільки площинні дефекти переважно знаходяться і фіксуються на поверхні, а структура поверхні відрізняється від структури породи в об'ємі, вони є джерелом збудження поверхневих енергетичних і ентропійних станів, що пов'язані з локальною рухливістю структурних елементів гірничої породи. При цьому під структурою будемо розуміти сукупність стійких зв'язків породи (як системи в цілому), які забезпечують її цілісність і тотожність.

Поверхневі площинні дефекти, з точки зору структурної організації гірської породи, можуть сприяти виникненню коливань великої амплітуди в локальній області, що еквівалентне поширенню пружних збурень у вигляді поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) Релея, які є суперпозицією поздовжніх (l) та поперечних коливань (t). В такому випадку поглинання енергії на поверхні дефектної області, яка в першу чергу є межею поділу матеріалу, що руйнується, буде визначатися коефіцієнтом поверхневого натягу (γ_s) гірничої породи, що в запропонованій моделі еквівалентний значенню величини g .

Дисперсійне рівняння для ПАХ Релея з врахуванням поверхневого натягу має наступний вигляд [2]

$$\left(2k_R^2 - k_t^2\right)^2 - 4\left(k_R^2 - k_t^2\right)^{\frac{1}{2}}\left(k_R^2 - k_t^2\right)^{\frac{1}{2}}k_R^2 - \frac{\gamma_s}{\mu}\left(k_R^2 - k_t^2\right)^{\frac{1}{2}}k_t^2k_R^2 = 0 \quad (3)$$

де $k_R = \frac{\omega}{v_R}$, $k_l = \frac{\omega}{v_l}$, $k_t = \frac{\omega}{v_t}$ – хвильові числа релєївської, поздовжньої та поперечної хвиль; v_R , v_l , v_t – відповідно швидкості поширення релєївської, поздовжньої та поперечної хвиль; ω – циклічна частота коливань; μ – модуль зсуву гірської породи.

Проводячи вимірювання на фіксованій частоті швидкостей поширення поздовжньої, поперечної та релєївської хвиль з достатньою точністю можна визначати величину поверхневого натягу γ_s із рівняння (3) із врахуванням впливу різних факторів: температури, тиску адсорбції і т.д.. Вимірювання на декількох частотах можуть бути джерелом інформації для оцінки абсолютного значення величини поверхневого натягу [3].

Для моніторингу поведінки об'єктів ГТС у межах показників моделі, що пропонується, потрібне врахування сейсмоакустичних властивостей гірських порід, що мають виражену площинну структуру із наявністю контрастних за проявами дефектів у пружному середовищі – матриці. Із усієї різноманітності гірських порід можна виділити декілька класів, що представляють інтерес з практичної точки зору. По-перше, це породи для яких дефекти, що пов'язані із площинною структурою, проявляються при експериментальних дослідженнях у реальних умовах при поширенні акустичних хвиль. Пісковики є типовим прикладом таких порід, пружні і дисипативні властивості яких суттєво визначаються їх мікроструктурою, а наявність флюїдонасичення надає додатковий сильний вплив на дисперсію і дисипацію сейсмічних та акустичних хвиль. У такому випадку важливим фактором виступає частота релєївської хвилі, що визначає її дисперсію, а відповідно і абсолютне значення величини γ_s . Теоретичні розрахунки проведені в роботі [3] показують, що дисперсія обумовлена характерною структурою поверхні пропорційна величині ω^4 і при зміні частот від 100 до 200 МГц буде на порядок меншою за дисперсії поверхневого натягу.

В експериментальних дослідженнях по розсіюванню ультразвукових хвиль в зернисто-пористих середовищах інтенсивність хвилі, що пройшла через зразок, зменшується за законом $\exp(-\alpha(\omega)x)$, x – відстань вздовж напрямку поширення; $\alpha(\omega)$ – коефіцієнт поглинання, що залежить від частоти хвилі і з врахуванням фрактальної геометрії поверхні зернисто-пористого простору визначається наступним співвідношенням [4]

$$\alpha(\omega) \sim \omega^\gamma, \quad (4)$$

де $\gamma = s + d_f$; в області стохастичного розсіювання довжина релєївської хвилі $\lambda_R \sim \delta$; δ – характерний розмір зерна (пори) в матеріалі ($s = 2$); d_f – фрактальна розмірність поверхні зернисто-пористого простору.

Зміну інтенсивності релєївської хвилі на поверхні, як суперпозицію поздовжніх та поперечних хвиль, будемо характеризувати глибиною проникнення

$z(v)$ у гірську породу, що є функцією коефіцієнта Пуассона (v), і визначимо наступним чином [5]

$$z(v) = A(v)\lambda_R, \quad (5)$$

де λ_R – довжина хвилі Релея, ($\lambda_R = \frac{2\pi v_R}{\omega}$); $A(v)$ – число, при якому відношення амплітуди зміщення в напрямку нормалі u_z до амплітуди зміщення в напрямку нормалі на поверхні u_{z0} рівне e^{-1} (e – основа натурального логарифму).

Зміщення в напрямку нормалі, без врахування фазового множника визначимо виразом [2]

$$u_z = Aq \left(\exp(-qz) - \frac{2k_R^2}{2k_R^2 - k_t^2} \exp(-sz) \right), \quad (6)$$

де $s^2 = k_R^2 - k_t^2$; $q^2 = k_R^2 - k_l^2$.

Коефіцієнт Пуассона при відомих значеннях швидкостей поширення поздовжньої та поперечної хвилі визначається наступним чином [6]:

$$v = \frac{2 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2}{2 \left(1 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2\right)} \quad (7)$$

Величина γ у співвідношенні (4) для пісковика, фрактальна розмірність поверхні якого d_f рівна 2,07 – 2,40 [7], задовільно корелює із показником ступеня при частоті ПАХ Релея, що характеризує величину дисперсії хвилі. Отримані теоретичні результати вказують на те, що процеси дисперсії і дисипації сейсмічних та акустичних хвиль мають однаковий механізм в якому приймають участь одні і ті ж структурні елементи (зерна, пори), сумірні із довжиною релеївської хвилі.

Результати та їх обговорення.

Експериментальні дослідження швидкостей поширення поздовжніх і поперечних хвиль за методикою роботи [8] для різного класу пісковиків показали, що значення v_l і v_t відповідно лежать у діапазонах 3180 ÷ 3430 м/с та 2100 ÷ 1780 м/с, при цьому коефіцієнт Пуассона змінюється в межах 0,11 ÷ 0,32.

За швидкістю поширення поперечних хвиль v_t і коефіцієнтом їх поглинання α_t визначався модуль зсуву за співвідношенням [8]

$$\mu = (\mu'^2 + \mu''^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

де μ' і μ'' – дійсна і уявна частина модуля зсуву;

$$\mu' = \rho v_t^2 \frac{1 - \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}}{\left(1 + \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}\right)^2}; \mu'' = \rho v_t^2 \frac{\frac{2\alpha_t v_t}{\omega}}{\left(1 + \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}\right)^2}; \rho - \text{щільність пісковиків.}$$

Швидкість поширення хвиль Релея оцінювалась за співвідношенням [9]:

$$\frac{v_R}{v_t} = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \quad (9)$$

При відповідних значеннях величини ν швидкість поверхневої хвилі Релея знаходиться в діапазоні 1870 ÷ 1590 м/с. При частотах 100 – 200 МГц довжина хвилі Релея λ_R буде лежати відповідно в межах 18 ÷ 9 мкм і 16 ÷ 8 мкм для інтервалу зміни величини ν . Оцінка величини проникнення ПАХ за співвідношенням (5) показує, що в інтервалі зміни величини коефіцієнта Пуассона значення $z(\nu)$ лежить в межах $(0,62 \div 0,64)\lambda_R$ (рис.1).

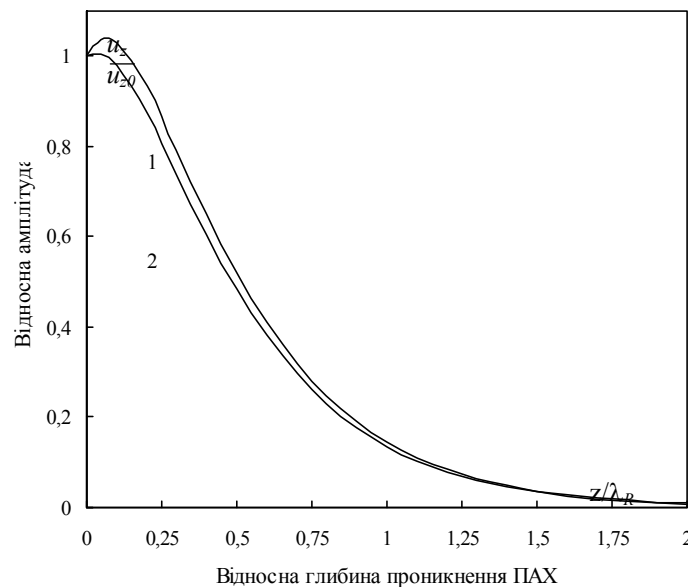


Рис. 1 - Залежності відносних амплітуд у релеївській хвилі від відносної глибини поширення ПАХ для середовищ з коефіцієнтом Пуассона 1) $\nu = 0,32$; 2) $\nu = 0,11$.

Пустотілість пісковиків досліджена методом ртутної порометрії із пластів шахт Донбасу показала, що вони мають чотири рівня структурної організації відносно пор – мікропустоти, перехідні пори, субмакропори і макропори з відповідними характерними розмірами: 0,003 – 0,01 мкм; 0,01 – 0,1 мкм; 0,1 – 1,0 мкм; 1 – 3 мкм [7]. Отримані теоретичні оцінки глибини проникнення

ПАХ показують, що поверхнева релеївська хвиля як збурення сумірна із розмірами макропор пісковиків.

Теоретична оцінка величини γ_s для пісковиків при модулі зсуву, що знаходиться в межах $(0,8 \div 1,1) \cdot 10^4$ МПа, залежить лінійно від частоти релеївської хвилі і відповідно дорівнює $(4,7 \div 6,6) \cdot 10^4$ Дж/м² при 100 МГц і $(2,4 \div 3,3) \cdot 10^4$ Дж/м² при частоті 200 МГц.

Поверхня руйнування пісковиків за даними роботи [10] має порядок 10^4 м²/м³, відповідно величина енергії W_p може знаходитися в межах $(2,4 \div 6,6) \cdot 10^8$ Дж/м³. Величина $2g_0$ для міцних пісковиків може складати $(0,5 \div 1) \cdot 10^6$ Дж/м² [11], що в свою чергу дає оцінку величини ΔS_1 порядку не більше 10^3 м².

Висновки.

Отримані теоретичні результати вказують на адекватність моделі поверхневих дефектів, у вигляді поширення поверхневих хвиль Релея, для оцінки коефіцієнта поверхневого натягу, а відповідно і поверхневої енергії, гірської породи.

Оцінка енергії, що витрачається на руйнування оточуючих порід, при динамічному техногенному процесі виражена через поверхневу енергію гірської породи дає можливість провести комплексний аналіз складових енергетичного балансу, як факторів зовнішнього збурення на структурні складові ГТС із відповідною зміною їх енергетичного стану.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Петухов И.М. Механика горных ударов и выбросов / И.М. Петухов, А.М. Линьков А.М. – М., Недра, 1983. – 280 с.
2. Красильников В.А Введение в физическую акустику / В.А. Красильников, В.В. Крылов. – М.: Наука, 1984. – 400 с.
3. Красильников В.А. Дисперсия волн Рэлея, обусловленная поверхностным натяжением / В.А. Красильников, В.В. Крылов. // Акустический журнал. – 1979. – Т. 25. – Вып. 3. – С. 408 – 412.
4. Мосолов А.Б. Фракталы, скейлинг и геометрия пористых материалов / А.Б. Мосолов, О.Ю. Динариев // Журнал технической физики. – 1988. – Т. 58. – № 2. – С. 233 – 238.
5. V.V. Klerko. Contrition of Surface Rayleigh Waves to the Heat Capacity of Poly(vinyl chloride) / V.V. Klerko, В.В. Kolupaev, E.V. Lebedev, V.A. Mashchenko // Polymer Science. – Ser. A. – 2009. – V. 51. – N 9. – P. 986 – 990.
6. Ландау Л.Д. Теория упругости / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1985. – 245 с.
7. Булат А.М. Фракталы в геомеханике / А.М. Булат, В.И. Дырда. - К.: Наукова думка, 1995. – 358 с.
8. Мащенко В.А. Экспериментальна установка для вимірювання пружних параметрів гірських порід / В.А. Мащенко, О.О. Панчук, І.О.Садовенко, М.А. Бордюк // Вісник інженерної академії. – 2012. – Вип. 3. – С. –21 –26 .
9. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И.А. Викторов – М.: Наука, 1981. – 288 с.
10. Абрамов Ф.А. Свойства выбросоопасных песчаников как породы-коллектора / Ф.А. Абрамов, Г.А. Шевелев. – К.: Наукова думка, 1972. – 98 с.
11. Теория защитных пластов / [И.М. Петухов, А. М. Линьков, В.С. Сидоров, И.А. Фельдман]. – М.: Недра, 1976. – 224 с.

**ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ И КРЕПЛЕНИЯ МОНТАЖНОГО
ХОДКА 18 ЗАПАДНОЙ ЛАВЫ ПЛ. m_3 ПАО «ШАХТА ИМ. А.Ф.
ЗАСЯДЬКО»**

Розроблено спосіб прогнозу й попередження раптових викидів вугілля, породи й газу: буріння випереджальних свердловин з контролем ефективності по параметрах акустичного сигналу, з контролем викидонебезпечності та небезпеки раптових видавлювань по параметрах акустичного сигналу при роботі комбайна. Викладено особливості проведення й кріплення монтажного ходка 18-ї західної лави пл. m_3 ПАТ «Шахта ім. О.Ф. Засядька» із застосуванням розробленого способу.

**SPECIFICS OF DRIVING AND SUPPORTING PASSAGE FOR EQUIPMENT
INSTALLATION IN THE 18th WESTERN LONGWALL, LAYER m_3 , AT
THE A.F. ZASYADKO MINE**

A new method is developed to forecast and prevent sudden coal, rock and gas outbursts, which includes drilling of pilot holes with efficiency control by parameters of acoustic signal and control of risk of sudden outburst and heaving by parameters of acoustic signal when a combine operates. The author describes specifics of driving and supporting passage for equipment installation in the 18th western longwall, layer m_3 , at the A.F. Zasyadko Mine, with the help of the method.

Проведение и крепление монтажного ходка 18 западной лавы пл. m_3 ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько» осуществлялось в соответствии с требованиями "Правил безопасности в угольных шахтах" [1], "Инструкции по составлению паспортов выемочного участка, проведения и крепления подземных выработок" [2], "Правил ведения горных на пластах склонных к газодинамическим явлениям" [3], "Инструкции. Эндогенные пожары в угольных шахтах Донбасса. Предупреждение и тушение" [4], "Технологических схем разработки пологих пластов на шахтах Украины", "Комплекса мер по борьбе с внезапными выбросами угля, породы и газа" и другой нормативной и справочной документации при отработке пл. m_3 .

Основные технические параметры проведения выработки следующие. Выработка проводится по пласту m_3 с подрывкой боковых пород; угол наклона выработки $+9^0$; угол падения пласта 9^0 ; глубина залегания выработки 1370-1320 м; длина выработки полная – 310 м, проводимая - 310 м; способ проведения выработки - комбайновый; тип оборудования - комбайн КСП-32, для бурения шпуров СЭР-1м; средства транспортирования горной массы конвейеры 1Л80, 2ЛТП 1000; тип рельсов - Р-24; материал шпал - металлические (через 0,7 м); диаметр трубопровода противопожарно-оросительного – 150 мм, сжатого воздуха - 150 мм [2].

При проведении и крепления монтажного ходка 18 западной лавы был применен способ прогноза и предупреждения внезапных выбросов угля, породы и газа, который включал бурение опережающих скважин с контролем эффективности по параметрам акустического сигнала, с контролем выбросоопасности и опасности внезапных выдавливаниях по параметрам акустического сигнала при