

Петрівський Я. Б., д.т.н., проф. (Рівненський державний гуманітарний університет)

ОЦІНКА ЗНАЧЕННЯ ПОРОГОВОГО ТИСКУ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПРИ СТВОРЕННІ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ТРИЩИНИ ГІДРОРОЗРИВУ

Запропоновано методику розрахунку порогового тиску нагнітання при створенні вертикальної тріщини гідророзриву. Отримані залежності дозволяють на початковій стадії проведення гідророзриву вибрати оптимальний режим, що забезпечує проведення геотехнологічного впливу на масив гірських порід із досягненням необхідного результату.

Ключові слова: гідророзрив, пороговий тиск, техногенне родовище, гірські породи.

Предложено методику расчета порогового давления нагнетания при создании вертикальной трещины гидроразрыва. Полученные результаты позволяют на начальной стадии проведения гидроразрыва выбрать оптимальный режим, обеспечивающий проведение геотехнологического воздействия на горные породы с достижением необходимого результата. **Ключевые слова:** гидроразрыв, пороговое давление, техногенная среда, горные породы.

A design procedure of threshold pressure of forcing at creation of a vertical crack of hydrorupture is offered. The received results allow to choose the optimum mode providing carrying out of geotechnological influence on a file of rocks with achievement of necessary result at an initial stage of carrying out of hydrorupture.

Keywords: hydrorupture, threshold pressure, technogenic environment, rocks.

Технологія гідравлічного розриву пласта (ГРП) є одним із потужних методів інтенсифікації видобутку корисних копалин (вуглеводнів), що дозволяє отримати найбільший ефект у колекторах, які володіють низькою проникливістю. Разом із тим технологію ГРП пропонується застосувати з метою покращення фільтраційних властивостей підстиляючих порід техногенного родовища для створення стійкого гідродинамічного зв'язку системи: розчин вилуговування – масив техногенного родовища – підстиляючі породи техногенного родовища – захисний екран, при експлуатації техногенного родовища в режимі вилуговування [1, 2].

Важливим аспектом на початковій стадії підготовки створення масованого гідророзриву – на стадії гідродинамічних досліджень свердловини, проведення мінігідророзриву та вибору основних технологічних параметрів ГРП, залишається попереднє оцінювання параметрів гірських порід, а саме визначення розмірів тріщини та характеристик пласта (гірський тиск) за керованими параметрами, що контролюються на усті свердловини – тиск нагнітання, інтенсивність та витрати закачаної рідини розриву. На даний час, одним серед найбільш ефективних методів оцінювання наслідків реалізації ГРП, внаслідок неможливості безпосередніх вимірів результату здійснення ГРП, залишається метод математичного моделювання процесу, що передбачає розв’язок комплексу взаємозв’язаних задач як прямих, так і обернених [3, 4].

З метою ініціювання початку поширення тріщини при застосуванні технологій розриву пластів необхідно створити певний початковий пороговий тиск. Його значення залежить як від фізико-механічних властивостей гірських порід, так і від реологічних властивостей робочої рідини розриву, діаметру свердловини, глибини зони розриву. При проведенні робіт на великих глибинах необхідне значення порогового тиску значно перевищує технічні можливості існуючих засобів впровадження технології, що обмежує застосування цих методів обробки привибійних зон глибоких свердловин. При адекватній оцінці гірського тиску, поширення та розкриття тріщини, як функції часу та зміни тиску нагнітання, витрат та об’єму закачаної рідини є можливим вибір ефективного методу та механізмів керування характером руйнування при гідророзриві порід. Такий режим проведення ГРП забезпечує гарантоване отримання тріщини, що поширюється у вертикальному напрямку та створення сприятливих передумов для керування пороговим тиском розриву шляхом попереднього штучного створення початкових тріщин, параметри яких дозволяють забезпечити тиску розриву технічно прийнятним обладнанням. З аналізу критеріїв крихкого руйнування матеріалів впливає, що до таких сприятливих умов для керування пороговим тиском відноситься зменшення навантаження, необхідного для стійкого розвинення тріщин за рахунок збільшення початкової довжини тріщини. Крім розширення області застосування розриву та зниження його енергоємності, створення початкових тріщин в значному степені визначають кількість та напрям поширення тріщин розриву, що є надзвичайно важливим аспектом для багатьох випадків в даній технології робіт [3-5].

На основі вказаного є можливим створення сприятливих умов з метою керування пороговим тиском розриву за рахунок попереднього штучного створення початкової сукупності тріщин, параметри яких дозволяють знизити тиск розриву до значення яке можливо реалізувати технічно доступними засобами. Таким чином, одним із головних завдань при розробці методів керування пороговим тиском розриву при створенні вертикальної тріщини є встановлення його зв’язку з параметрами початкових тріщин.

Задача про розроблення методів керування пороговим тиском розриву – встановлення його зв'язку з параметрами початкових тріщин, зводиться [6] до рівнянь, одне з яких зображує, згідно теорії в'язкої течії Пуазейля, залежність тиску в рідині розриву від її розкриття при постійній інтенсивності ін'єкції:

$$p_c - p = \frac{12\mu QL}{h} \int_{f_c}^f \frac{df}{w^3}, \quad (1)$$

де p – поточне значення тиску рідини в перерізі x , h – висота вертикальної тріщини, L – максимальне поширення тріщини, $f = \frac{x}{L}$, μ – в'язкість флюїду, Q – інтенсивність закачування, w – розкриття тріщини.

Другим рівнянням системи є закон розкриття тріщини w для випадку довільного розподілу нормального тиску

$$w = w(x, t, p). \quad (2)$$

Рівняння (1), (2) доповнюються відповідними граничними умовами, зокрема умовою плавного змикання берегів тріщини (умова Христиановича).

Результати, отримані при розв'язуванні задачі про поширення в підстилаючих породах техногенного родовища у вертикальному напрямку тріщини гідророзриву під дією ньютонівської рідини розриву [2, 7, 8], дозволяють сформулювати задачу про керування пороговим тиском розриву.

Враховуючи, що знайдене розкриття тріщини гідророзриву (2) в підстилаючих породах техногенного родовища, яке було отримано з урахуванням трьох основних типів загальноприйнятих в даному випадку фундаментальних відношень: положення механіки лінійно-пружної тріщини, закони руху рідини розриву в вузькій щіліні, рівняння нерозривності, зображується згідно формули

$$w(z, t) = \frac{k \cdot \pi}{4} \left(\frac{48\lambda\mu}{k^2q} \cdot z + \frac{48\lambda^2\mu}{k^2q} \cdot t + B \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона, E – модуль пружності, μ – в'язкість флюїду,

$$k = \frac{2(1-\nu^2)}{\pi \cdot E} \cdot L \cdot q, \quad L - \text{половина ширини зони розриву}, \quad B = \left(\frac{4 \cdot w_0}{k \cdot \pi} \right)^3,$$

w_0 – розкриття початкової тріщини, λ – параметр, що визначається для кожного поточного моменту часу t і залежить від характеристик початкової

тріщини, q – постійне зовнішнє навантаження, чисельно рівне гірському тиску або його складовій, напрямленій по нормалі до площини тріщини, z – значення поширення тріщини у вертикальному напрямку, а граничні умови для даного випадку набувають вигляду

$$\frac{48 \cdot \lambda \cdot \mu}{k^2 \cdot q} \cdot h + \frac{48 \cdot \lambda^2 \cdot \mu}{k^2 \cdot q} \cdot t + B = 0, \quad (4)$$

остаточно, для знаходження залежності значення порогового тиску від розмірів початкової тріщини отримаємо наступну систему рівнянь

$$w(z, t) = \frac{k \cdot \pi}{4} \left(\frac{48 \lambda \mu}{k^2 q} z + \frac{48 \lambda^2 \mu}{k^2 q} t + B \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\frac{48 \cdot \lambda \cdot \mu}{k^2 q} \cdot h + \frac{48 \cdot \lambda^2 \cdot \mu}{k^2 q} \cdot t + B = 0 \quad (5)$$

$$p = p_c - \frac{12 \mu Q L}{h} \int_{f_c}^f \frac{df}{w^3}$$

Оцінка значень невідомих параметрів техногенного родовища h – максимальне поширення тріщини в вертикальному напрямку, w_{\max} – максимальне розкриття тріщини, q – гірський тиск, на початку розв’язку сформульованої задачі, реалізується на основі знайденого розв’язку (3) прямої задачі про гідророзрив підстилаючих порід техногенного родовища та розв’язування відповідної їй оберненої задачі про відтворення параметрів підстилаючих порід за керованими на усті свердловини характеристиками ГРП – тиск нагнітання, об’єм закачаної рідини розриву, інтенсивність нагнітання.

Знайдений аналітичний розв’язок задачі про поширення у вертикальному напрямі тріщини ГРП в якості визначальних умов базується на вказаних співвідношеннях. При виключенні з системи (5) невідомого параметру λ отримано формули, що дозволяють для кожного моменту часу t оцінити розміри вертикальної тріщини розриву за параметрами, які контролюються на усті свердловини (тиск розриву, інтенсивність закачування) [8]:

$$w(z, t) = b \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt[3]{(h - z)}, \quad (6)$$

де

$$b = \frac{\pi \cdot k^{\frac{2}{3}}}{4} \cdot \sqrt[6]{\frac{48 \cdot \mu}{q_{\infty} \cdot t}}, \quad \sigma_0 = \sqrt[6]{\left(\frac{p(0,t)}{q_{\infty}} - 1\right)^3} - B.$$

Для випадку витрат рідини розриву

$$w(z,t) = \frac{V_0 + Q \cdot t}{6 \cdot h \cdot L} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{h-z}{h}\right)}. \quad (7)$$

Повздожне розвинення тріщини розриву визначається формулою

$$h(t) = \frac{2 \cdot (V_0 + Q \cdot t) \cdot q_{\infty}}{3 \cdot k \cdot \pi \cdot L \cdot (p(o,t) - q_{\infty})}. \quad (8)$$

Формула (8) дозволяє розв'язати задачу керування пороговим тиском розриву на початковій стадії проведення ГРП. На підготовчій стадії проведення ГРП при $t = 0$, згідно вказаної формули, при $t = 0$ маємо значення поширення початкової тріщини розриву $h(0)$ об'ємом V_0 .

Тоді $p(0,0) = p_c$ – початкове або порогове значення тиску у свердловинному флюїді:

$$p_c = q_{\infty} + \frac{2 \cdot V_0 \cdot q_{\infty}}{3 \cdot k \cdot \pi \cdot L \cdot h(0)}. \quad (9)$$

З формули (9) залежність початкової довжини та об'єму тріщини від порогового тиску набуває вигляду

$$h(0) = \frac{2 \cdot V_0 \cdot q_{\infty}}{3 \cdot k \cdot \pi \cdot L \cdot (p_c - q_{\infty})}. \quad (10)$$

Чисельні розрахунки (рис. 1) згідно співвідношення (10) було проведено при наступних модельних параметрах:

$$E = 10^{10} \frac{H}{M^2}, \nu = 0,2, \quad w_0 = 10^{-5} \text{ м}, \quad q_{\infty 1} = 10^6 \text{ Па}, \quad q_{\infty 2} = 5 \cdot 10^6 \text{ Па}, \\ q_{\infty 3} = 10^7 \text{ Па}.$$

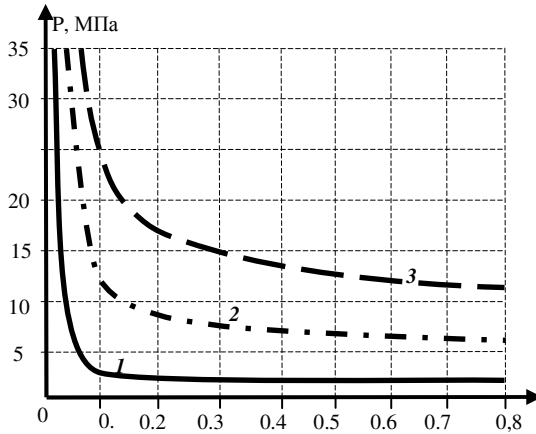


Рис. 1. Залежність порогового тиску нагнітання від розмірів штучної початкової тріщини при значеннях гірського тиску $q_{\infty 1} = 10^6 \text{ Па}$ – крива 1; $q_{\infty 2} = 5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ – крива 2; $q_{\infty 3} = 10^7 \text{ Па}$ – крива 3

Керування режимом нагнітання на початковій стадії ГРП при створенні вертикальної тріщини розриву реалізується через регульовані на усті свердловини параметри гідророзриву із врахуванням фізико-механічних властивостей підстилаючих порід техногенного родовища та розміру штучно створеної початкової тріщини, що зображується гіперболічною залежністю між пороговим тиском нагнітання та розміром початкової тріщини.

1. Закономерность снижения радиоактивности техногенных формаций при бактериальном выщелачивании урана / Э. И. Черней, А. Ф. Булат, И. А. Садовенко [и др.]. – Рівне : Волин. береги, 2004. – 571 с. 2. Петровский Я. Б. Научные основы геотехнологического извлечения урана из техногенных месторождений / Я. Б. Петровский. – Рівне: РДГУ, 2008. – 400 с. 3. Economides M. J. Reservoir stimulation / M. J. Economides, K. G. Nolte // Wiley & Sons Ltd. West Sussex, England. – 2000. – 858 p. 4. Михалюк А. В. Торпедирование и импульсный гидроразрыв пластов / А. В. Михалюк. – К.: Наукова думка, 1986. – 208 с. 5. Екобори Т. Научные основы прочности и разрушения материалов / Т. Екобори. – К.: Наукова думка, 1978. – 358 с. 6. Желтов Ю. П. Деформации горных пород / Ю. П. Желтов. – М.: Недра, 1966. – 198 с. 7. Петрівський Я. Б. Поширення тріщини гідророзриву у підстилаючих породах техногенного родовища / Я. Б. Петрівський // Вісник інженерної академії України. – 2007. – № 2. – С. 11-17. 8. Петрівський Я. Б. Закономірність геотехнологічного формування області ослаблених зв'язків в масиві гірських порід / Я. Б. Петрівський // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – 2010. – Вип. 4(52). – С. 365-371.

Рецензент: д.т.н., професор Власюк А. П. (НУВГП)