

УДК 622.242.44.3

ОСНОВНІ ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ТА МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, ЯКІ ПОВ'ЯЗАНІ З  
ГІДРОРОЗРИВОМ ПЛАСТАПшик В.Я., аспірант  
Рубель В.П., к.т.н., доцент*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»*

Гідравлічний розрив пласта може суттєво покращити продуктивність свердловин. Для того, щоб зрозуміти механізм гідравлічного розриву пласта та вдосконалити проектування технологічних операцій, надзвичайно важливо проводити моделювання для прогнозування параметрів утворення тріщин. З метою отримання позитивного результату спочатку необхідно досконало зрозуміти фізичні процеси, пов'язані між собою, під час гідророзриву.

З точки зору фізичних принципів, гідравлічний розрив пласта включає три основні процеси: деформацію гірських порід навколо тріщини, потік рідини в тріщині та зародження та поширення тріщини. Окрім цих основних фізичних процесів, гідравлічний розрив пласта також включає низку інших фізичних явищ, які часто розглядаються як вторинні процеси в різних аналітичних та числових моделях. Для уявлення про гідравлічний розрив пласта як багатомасштабний та мультифізичний процес розглянемо спочатку основні фізичні процеси.

**Основні фізичні процеси.**

**Деформація гірських порід** визначається їх властивостями та пов'язаними з ними граничними умовами, такими як тиск рідини та напруження в місці їх виникнення. Оскільки гірська порода має неоднорідну природу, важко точно відобразити реалістичні властивості гірських порід у числовій моделі. Крім того, деформація гірських порід часто демонструє еластопластичну поведінку, яка ще більше ускладнюється її пористістю. Через цю внутрішню складність необхідно ввести деякі припущення, щоб зробити пов'язану задачу більш керованою. Одним з найбільш широко застосовуваних спрощень є лінійна пружність, що виражається як:

$$\sigma = C : \varepsilon \quad (1)$$

де  $\sigma$  — позначає тензор напружень Коші, лінійний тензор деформацій, а  $C$  — тензор пружності, що визначається коефіцієнтом Пуассона та модулем Юнга  $\varepsilon$ . Умова рівноваги гірських порід виражається як:

$$\nabla \sigma + \rho g = \rho u \quad (2)$$

де  $\rho$  — позначає локальну щільність гірської породи,  $g$  — прискорення вільного падіння, а  $u$  — зміщення.

У деяких випадках, таких як пряма тріщина у двовимірному просторі або площинна тріщина у тривимірному просторі, ширину тріщини можна обчислити безпосередньо відповідно до деяких аналітичних рішень, отриманих з теорії пружності. Ці рівняння зазвичай використовуються в таких класичних моделях гідравлічного розриву пласта, як PKN (Perkins-Kern-Nordgren), KGD (Khristianovic-Geertsma-de Klerk), радіальна модель, P3D (Pseudo 3D) та PL3D (Planar 3D).

Деформацію гірської породи обчислюють та представляють різними способами, залежно від конкретного прийнятого підходу до числової дискретизації. У методах на основі континууму, таких як метод граничних елементів (BEM) і метод скінченних елементів (FEM), деформація породи обчислюється на основі сітки дискретизації та представлена вузловими значеннями. У методах на основі дисконтинууму деформація породи обчислюється та представлена рухом частинок або блоків. Стратегія обчислення деформації породи також впливає на інші числові елементи в моделі гідравлічного розриву пласта та є критично важливою особливістю симуляторів гідравлічного розриву пласта.

**Потік рідини в тріщині.** Гідравлічний розрив пласта відрізняється від традиційних задач фрагментації через внутрішній зв'язок між поширенням тріщини та потоком рідини, і

в результаті його моделювання, можливо, є складнішим. Один з найпростіших способів врахування впливу потоку рідини в числових рамках гідравлічного розриву пласта – це застосування рівномірного тиску рідини на поверхню тріщини. Однак, цей надмірно спрощений підхід може призвести до значної похибки моделювання, за винятком деяких особливих випадків з рідиною з низькою в'язкістю та високою міцністю пласта. Більш раціональний підхід до моделювання потоку рідини в тріщинах базується на теорії змащення, яка визнає той факт, що отвір гідравлічної тріщини завжди значно менший за її висоту та довжину. Застосування теорії змащення в моделюванні гідравлічного розриву пласта надзвичайно популярне, а закон Пуазейля (або кубічний закон) широко використовується для зв'язку швидкості потоку з градієнтом тиску вздовж гідравлічного розриву пласта. Для потоку рідини в двовимірному гідравлічному розриві пласта закон Пуазейля виражається як:

$$q = (w^3)/(12\mu) \times (dp)/(ds) \quad (3)$$

де  $q$  – швидкість потоку (витрата),  $w$  – ширина тріщини,  $\mu$  – в'язкість рідини для гідророзриву,  $p$  – тиск рідини, а  $s$  – локальна координата, спрямована по дотичній до траєкторії тріщини.

З урахуванням ефекту витоку рівняння нерозривності виражається як:

$$(dw)/(dt) + (dq)/(ds) + q_L = 0 \quad (4)$$

де  $q_L$  – швидкість витоку (втрата рідини).

Закон Пуазейля та рівняння неперервності, наведені вище, широко використовуються в 2D аналізі дискретних тріщин і можуть бути легко розширені до 3D аналізу дискретних тріщин шляхом врахування швидкості потоку та градієнта тиску в різних напрямках. У моделях розмитих тріщин закон Пуазейля часто реалізується з використанням проникності тріщини.

$$k_f = w^2/12 \quad (5)$$

де **ширина тріщини  $w$**  – це віртуальне значення, обчислене відповідно до деформації елемента в моделях розмитих тріщин.

Теорія змащування описує падіння тиску вздовж гідравлічної тріщини, її легко реалізувати і вона є обчислювально ефективною. У результаті вона стала найбільш широко використовуваною моделлю рідини в моделюванні гідророзриву. Закон Пуазейля справедливий лише для ламінарного потоку, який є основним режимом течії під час операцій гідророзриву. Однак турбулентна течія також може виникати, оскільки швидкість закачування та властивості рідини гідророзриву змінюються в широкому діапазоні при гідророзриві.

**Поширення тріщини.** Як невід'ємна частина моделей гідравлічного розриву, критерій руйнування використовується для визначення поширення тріщини. У симуляціях гідророзриву вибір критерію руйнування значною мірою залежить від конкретної чисельної схеми, прийнятої для дискретизації гірського масиву. У контексті підходів дискретних тріщин часто застосовуються лінійна пружна механіка руйнування (LEFM) та модель когезійної зони. Критерії LEFM включають: критерій максимального напруження розтягу, критерій мінімальної густини енергії деформації, критерій максимальної головної деформації та критерій максимального вивільнення енергії деформації, серед яких критерій максимального напруження розтягу є коінтересом, який найбільш широко використовується і може бути виражений як:

$$\cos(\theta/2)(K_I \times \cos^2(\theta/2) - 3/2 \times K_{II} \sin \theta) \geq K_{Ic} \quad (6)$$

де  $K_I$ ,  $K_{II}$  – коефіцієнти інтенсивності напружень для руйнування за типу  $I$  та типу  $II$  відповідно,  $K_{Ic}$  – в'язкість руйнування (тріщиностійкість), а напрямком (кут) поширення тріщини  $\theta$  визначається з умови:

$$\tan(\theta/2) = 1/4 \times (K_I/K_{II} - \operatorname{sgn}(K_{II})\sqrt{((K_I/K_{II})^2 + 8)}) \quad -\pi < \theta < \pi \quad (7)$$

де  $\text{sgn}()$  – позначає функцію знака. Критерій максимальних напружень розтягу було розширено з метою врахування впливу  $K_{III}$  – коефіцієнта інтенсивності напружень для руйнування III типу.

Критерії, засновані на коефіцієнтах інтенсивності напружень, зазвичай використовуються, коли гірську породу розглядають як лінійно-пружний матеріал.

*Література:*

1. Rubel, Victoriia, and Vadym Pshyk. "PREDICTION OF HYDRAULIC FRACTURING PARAMETERS IN TERRIGENOUS RESERVOIRS AT RAKYTNYANSKE GAS FIELD WITH REGARD TO GEOMECHANICAL PROPERTIES OF ROCKS." *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 133.1 (2025).
2. Montgomery, C. (2015). *Hydraulic Fracturing*.
3. Smith, M. B., & Montgomery, C. (2015). *Hydraulic fracturing*. CRC press.
4. Adachi J, Siebrits E, Peirce A, Desroches J (2007) *Computer simulation of hydraulic fractures*. *Int J Rock Mech Min Sci* 44(5):739–757.
5. Chen B, Barron AR, Owen D, Li C (2018) *Propagation of a plane strain hydraulic fracture with a fluid lag in permeable rock*. *J Appl Mech* 85(9):091003–091010.
6. Gupta P, Duarte CA (2014) *Simulation of non-planar threedimensional hydraulic fracture propagation*. *Int J Numer Anal Methods Geomech* 38(13):1397–1430.
7. Sarris E, Papanastasiou P (2011) *The influence of the cohesive process zone in hydraulic fracturing modelling*. *Int J Fracture* 167(1):33–45.

### УДК 622.24.6

#### ПРОВЕДЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИПРОБУВАНЬ РОЗРОБЛЕНОГО ВІБРАЦІЙНОГО СИТА БЛОКУ ОЧИСТКИ ПРОМИВАЛЬНОЇ РІДИНИ

**Савик В.М.**, к.т.н., доцент,  
**Суржко Т.О.**, аспірантка

*Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка"*  
[savycvasyl@ukr.net](mailto:savycvasyl@ukr.net)

Промислові випробування є завершальним етапом у процесі створення та впровадження нового технологічного обладнання, забезпечуючи підтвердження його працездатності у реальних умовах експлуатації. Сучасні вимоги до нафтогазової галузі передбачають не лише інноваційність конструкцій, але й їхню високу експлуатаційну надійність, безпечність та ремонтпридатність, що зумовлює необхідність застосування комплексної програми випробувань для нового вібраційного сита. Розроблену програму та методику випробувань, погоджують з відповідними фаховими підрозділами підприємства, визначає порядок, умови та критерії оцінки ефективності обладнання на всіх етапах його тестування (1).

На початковому етапі будуть проведені дослідницькі випробування, що забезпечать аналіз можливих режимів роботи вібраційного сита з метою удосконалення його конструкції ще до виходу на промислові об'єкти. На цьому етапі використовуються методи моделювання динамічних процесів, що дозволять визначити оптимальні частоти та амплітуди коливань, конфігурацію сита, а також параметри, які найбільше впливають на стабільність відокремлення частинок бурового шламу та рідин (2). Завдяки проведеним дослідженням будуть усунуті конструктивні недоліки, оптимізовано розподіл маси рухомих елементів, удосконалено система кріплення та демпфування.

Наступним етапом стають натурні та промислові випробування, що проводяться безпосередньо на свердловині у реальних умовах виробничого процесу буріння. Це дозволить оцінити вплив змінних факторів, таких як коливання дебіту бурового розчину, неоднорідність твердих частинок, зміни температури та тиску на роботу вібраційного сита. Під час