

## УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ БУРІННЯ ПОХИЛО-СКЕРОВАНИХ І ГОРИЗОНТАЛЬНИХ СВЕРДЛОВИН У НЕСТІЙКИХ ПОРОДАХ

М.Є. Чернова, Я.В. Куцяк, Р.Я. Куцяк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48090,  
e-mail: physics@nung.edu.ua

Розглядається новий спосіб вирішення проблеми побудови похило-скерованих та горизонтальних свердловин у нестійких продуктивних горизонтах, що супроводжується осипанням стінок свердловини та прихопленням бурового інструменту. На основі теорії пружно-деформованого стану твердих дисипативних систем виведено аналітичну залежність для встановлення гранично-допустимих значень кута нахилу між віссю свердловини та вертикаллю.

Ключові слова: порода, породоруйнівний інструмент, бурильна колона, свердловина, напруження.

Рассматривается новое решение проблемы бурения наклонных и горизонтальных скважин в неустойчивых продуктивных горизонтах, связанное с обвалами стенок скважины и прихватом бурового инструмента. На основании теории напряженно-деформированного состояния твердых диссипативных систем выведена аналитическая зависимость для определения предельно-допустимых значений угла наклона оси скважины от вертикали.

Ключевые слова: порода, породоразрушающий инструмент, бурильная колонна, скважина, напряжение.

New approach to the drilling of directional and horizontal holes in unstable producing horizons connected with the caving-in of well and drill tool seizure is considered. Analytical dependence for the determination of maximum permissible value of the tilt angle between hole axis and vertical line based on the theory of solid dissipative systems mode of deformation is deduced.

Keywords: rock, destructive instrument, drill column, well, tension.

Останнім часом для будівництва свердловин все частіше застосовують горизонтальне буріння, однак при переході від похило-скерованої до горизонтальної частини стовбура виникають суттєві проблеми, пов'язані з осипаннями та обвалуваннями гірської породи. Існують два аспекти цієї проблеми. По-перше, у процесі буріння свердловини використовують промивальні рідини, які є, здебільшого, емульсійними розчинами, що характеризуються малим поверхневим натягом, призначеною для кращого огортання зруйнованої породи та винесення її на денну поверхню. Однак, проникаючи в пори і поглинаючись, промивальна рідина призводить до адсорбційного зниження міцності гірської породи, тобто виникає ефект Ребіндера. Він полягає у тому, що акт адсорбції зумовлює зменшення поверхневої енергії твердого тіла з одночасним розриванням зв'язків між елементами його структури. Адсорбція поверхнево активних речовин призводить до проникнення їх молекул у мікротріщини гірської породи, появи додаткового «розклинюючого» тиску, розвитку нових мікротріщин та, відповідно, руйнування її під дією незначних навантажень. Фізична адсорбція спричиняється дією молекулярних сил: неспецифічних (дисперсійні сили) і специфічних (орієнтаційні, індукційні та водневі зв'язки). Для явища адсорбції характерним є зменшення вільної поверхневої енергії системи. З термодинамічної точки зору адсорбція – це мимовільний зворотній процес. При переході речовини з газової або рідкої фази до адсорбованого стану молекули втрачають, щонайменше, один ступінь вільності, що призво-

дить до зменшення ентропії всієї системи. Таким чином, одним з напрямків попередження осипання гірської породи в даній ситуації є використання промивальних рідин з підвищеним коефіцієнтом поверхневого натягу.

По-друге, у процесі будівництва свердловини, порода, що буриться, перебуває в пружно-деформованому стані, оскільки бурильним інструментом породи передаються сколюючі зусилля (рис. 1):

$$\tau = \frac{F_{\tau}}{S},$$

де:  $F_{\tau}$  – зовнішня сила, що призводить до зсуву;  $S$  – площа грані, що зсувається.

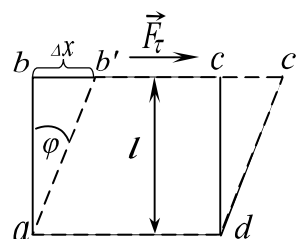


Рисунок 1 – Схема пружно-деформованого стану твердого тіла при деформації зсуву

В лінійній механіці руйнування [1] поля деформації і напружень описуються коефіцієнтом інтенсивності напружень  $k$ . Зв'язок між  $k$  і  $\tau$  є загальним і не залежить від статичних, циклічних чи динамічних навантажень. Основну роль тут відіграє густина енергії напружено-деформованого стану поверхні свердловини,

яку вона отримала в процесі руйнування гірської породи.

За теорією Л. Жильмо [2] ця енергія є питомою, тому залежить не від умов навантаження, а від теоретичної міцності породи, що уможливує перехід до безрозмірних констант подібності локального руйнування, пов'язаних з міцністю міжатомних зв'язків.

Енергія, що поглинулася одиницею об'єму породи, зменшується в напрямку, перпендикулярному до поверхні стінок свердловини, за експоненціальним законом, тому максимум енергії припадає на привибійну поверхню (рис. 2), де  $dW/dV$  – густина енергії деформації;  $r$  – віддаль від поверхні стінок свердловини в напрямку, перпендикулярному до них.

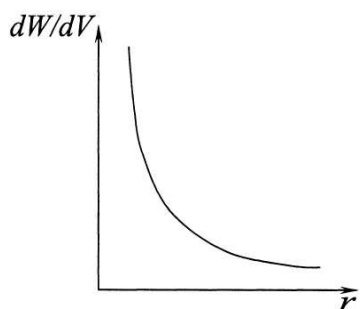


Рисунок 2 – Характеристична залежність об'ємної густини поглинутої породою енергії

Враховуючи це, є достатнім розглядати цю проблему з точки зору плоского напруженого стану.

Критичне значення густини поглинутої енергії визначає міцність міжатомних зв'язків породи, а, отже, і процес руйнування (осипання, обвалювання) стінок свердловини у процесі її будівництва. Рівень процесу руйнування (локального чи глобального) залишається однаковим, оскільки в кінцевому варіанті результатом залишається самоорганізація дисипативних структур, яка є з точки зору ентропії оптимальною для поглинутої енергії. Дисипація енергії в гірській породі відбувається лише шляхом мікроруйнувань сколюванням. Цей процес описується критичним співвідношенням напруження зсуву та напруження відривання породи. Реалізація цієї дисипативної структури в точці біфуркації, що відповідає глобальній нестабільності руйнування, залежить від структури гірської породи.

Оскільки сила, що діє на поверхню породи, має напрям дотичної, пружно-деформований стан породи, в основному, залежить від відносного зсуву і є пропорційним до коефіцієнта зсуву  $\gamma$  і сколюючого зусилля [4]. Відносний зсув  $\gamma$  є прямопропорційним куту зсуву, оскільки кут зсуву в шарах породи (рис. 1) визначається рівнянням (1):

$$\gamma = \frac{\Delta x}{l} = \operatorname{tg} \varphi \approx \varphi . \quad (1)$$

Як бачимо, при малих величинах кута  $\varphi$  тангенс кута приблизно рівний куту зсуву (в

радіанах), тож стає зрозумілим, що цей кут і кут нахилу стовбура взаємопов'язані між собою, оскільки їх більші катети будуть завжди взаємоперпендикулярними. Згідно теорії пружних деформацій відносний зсув  $\gamma$  пропорційний сколюючому зусиллю  $\tau$ :

$$\gamma = \beta \tau ,$$

де  $\beta$  – коефіцієнт пропорційності – константа, що залежить від матеріалу сколюючого пристрою. Оскільки робота, виконана зовнішньою силою (породоруйнівним інструментом), накопичується у вигляді потенціальної енергії на поверхні стовбура, то пружне тангенціальне напруження, що виникає в породі, буде рівним за модулем, але протилежним за напрямком сколюючому зусиллю (закон Гука для деформації зсуву):

$$\sigma_{\tau} = -N\varphi = -N\gamma , \quad (2)$$

де  $N$  – модуль зсуву.

Водночас величина сколюючого зусилля прямопропорційно залежить від обертового моменту породоруйнівного інструменту:

$$\varphi \sim M .$$

Отже, послаблення тиску на стінки стовбура можливе за рахунок вибору оптимального кута нахилу свердловини та підбору оптимального обертового моменту породоруйнівного інструменту. Якщо вибір оптимального обертового моменту залежить від характеристик породоруйнівного інструменту, то вибір оптимального кута залежить від величини тангенса цього кута, а тут важливою є плавна зміна числових значень, оскільки накопичена енергія виконує роботу, пов'язану з руйнуванням (осипанням) стінок свердловини. Величину роботи можна оцінити з залежності кута зсуву від навантаження. Згідно теорії напруженого стану твердого тіла співвідношення, яке виражає дотичне напруження, що виникає на довільній похилій площині, має вигляд:

$$\tau_{\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\theta - \tau_{xy} \cos 2\theta , \quad (3)$$

де:  $\sigma_x, \sigma_y$  – відповідно розтягуюче і стискаюче напруження;

$\tau_{\theta}$  – тангенціальне напруження;

$\theta$  – кут між нормаллю і напрямком дії зовнішнього зусилля.

Для визначення максимального дотичного напруження похідну  $\frac{d\tau_{\theta}}{d\theta}$  рівняння (3) прирівнюємо її до нуля і отримаємо:

$$\operatorname{ctg} 2\theta = -\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} , \quad (4)$$

де  $\theta$  – кут, що визначає положення площини з максимальним дотичним напруженням.

Але згідно з теорією співвідношення

$$\operatorname{ctg} 2\theta = -\operatorname{tg} 2\theta , \quad (5)$$

що виражає зв'язок між тангенціальним і нормальним напруженням, тобто для нормального напруження рівняння (4) з врахуванням (5) матиме вигляд

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (6)$$

Слід зауважити, що кут зсуву  $\varphi$  пов'язаний з кутом нахилу свердловини:  $\theta = 90 - \varphi$ . Оскільки навантаження є пропорційним тангенсу кута, а в межах кута зсуву  $0 \div 30^\circ (\pm 1 \div 3^\circ)$  значення тангенса кута характеризується плавною зміною числових значень (рис. 3), а відповідно і плавною зміною градієнта енергії вздовж дотичної до поверхні стовбура свердловини. Питома енергія деформації є функцією від дотичного напруження і в загальному вигляді описується рівнянням:

$$du = \frac{\tau_{\max}^2 r^3 dr}{2G} \quad (7)$$

де:  $\tau_{\max}$  – дотичне напруження на поверхні площини, яке виникає за рахунок дії породоруйнівного інструменту;

$r$  – відстань від поверхні вглиб породи (рис. 2);

$G$  – модуль зсуву.

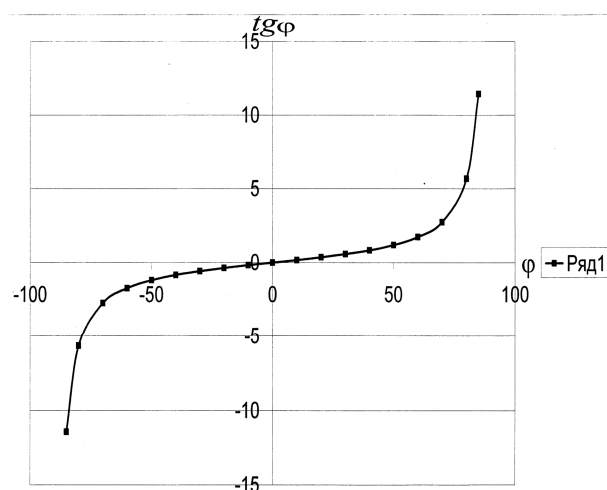


Рисунок 3 – Графічна залежність  $\operatorname{tg}$  кута  $\varphi$  від його числових значень

Плавна зміна градієнта енергії зменшує ймовірність руйнування (осипання, обвалювання) стінок свердловини з точки зору зміни ентропії системи, тобто, згідно з теорією В.В. Федорова, в цій зоні ймовірність критичного значення густини енергії деформації, отже і процесу руйнування, прямує до нуля, що і підтвердив досвід буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин 155-Качанівська та 545-Бугруватівська, де спостерігалось найактивніше обвалювання гірських порід за кута нахилу свердловини в межах  $65^\circ$ , що після розкриття на глибинах 3317 м, 3360 м, 3380 м закінчувалося прихопленням бурильного інструменту. 172-Південно-Панасівська свердловина, пробурена з кутом нахилу у вузькому інтервалі  $71^\circ$ , дала успішний безаварійний результат проходки похило-скерованої ділянки стовбура і завершення її горизонтальним виходом.

Таким чином, отримані експериментальні промислові дослідження повністю узгоджуються з теорією критичної густини енергії деформації Л. Жильмо та з теорією сінергетики руйнування дисипативних структур за концепцією В.В. Федорова.

### Література

- 1 Irwin G.R. Fracture Dynamics In Fracturing of Metals / Irwin G.R. – Cleveland, O.: American Society for Metals, 1988. – 256 p.
- 2 Gillemot L. Engineering Fracture Mechanics, / Gillemot L. – Issue 1. – 1976. – v.8. – pp. 239–253
- 3 Федоров В.В. Кінетика руйнування твердих дисипативних структур / В.В. Федоров – Ташкент: ФАН Узбекистан, 1985. – 166 с.
- 4 Чернова М.Є. Курс фізики для студентів спеціальності «Нафтогазова справа» ч.1 / Чернова Мирослава Євгенівна. – Івано-Франківськ: Факел, 2010. – 221 с.
- 5 James M. Gere. Mechanics of materials / James M. Gere // Melbourne: Civil Engineering Stanford Universiti, 1992. – 670 p.

Стаття постуила в редакційну колегію  
15.07.10

Рекомендована до друку професором  
Я. С. Коцкуlichem