

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗЕНІТНОГО КУТА НА СТІЙКІСТЬ СТІНОК СТОВБУРІВ, ЩО ЗНАХОДЯТЬСЯ В ПРУЖНО-ДЕФОРМОВАНОМУ СТАНІ В ПРОЦЕСІ БУРІННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ СВЕРДЛОВИН

М.Є. Чернова, Я.В. Куцяк

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

Розглядається проблема стійкості стінок стовбура свердловини в процесі буріння, що супроводжується осипанням та обвалюванням породи в нестійких продуктивних горизонтах та прихопленням породоруйнівного інструменту, з точки зору пружно-деформованого стану твердого тіла та механіки руйнування гірських порід. З врахуванням теорії механіки матеріалів та фізико-механічних властивостей гірських порід дається оцінка впливу азимутального кута на тимчасовий опір руйнуванню породи, яка складає стінки свердловини, зокрема на Південно-Панасівському, Бугруватівському та Качанівському родовищах.

Ключові слова: опір руйнуванню, гірська порода, стінки свердловини, напруження, пружно-деформований стан, механіка руйнування.

Рассматривается проблема устойчивости стенок ствола скважины в процессе бурения, сопровождающегося осипанием и обвалом породы в неустойчивых продуктивных горизонтах, прихвотом породоразрушающего инструмента, с точки зрения упругодеформированного состояния твердого тела и механики разрушения горных пород. С учетом теории механики материалов и физико-механических свойств горных пород оценивается влияние азимутального угла на временное сопротивление разрушению породы стенок скважин Южно-Панасивского, Бугруватовского и Качанивского месторождений.

Ключевые слова: сопротивление разрушению, горная порода, стенки скважины, напряжение, упруго-деформированное состояние, механика разрушения.

The problem of stability of well bore walls during the drilling process is examined from the point of view of elastic deformation condition and mechanics of rock destruction in the conditions of rock crumbling and falling in unstable productive horizons and sticking of rock destruction instrument. Taking into account the theory of mechanics of materials and physical-mechanical properties of rocks, the work evaluates the influence of zenithal angle on the temporary resistance to the destruction of rock which constitutes the well bore wall, in particular, in Pivdenno-Panasivske, Bugruvativske and Kachanivske fields.

Keywords: resistance of destruction, rock, well bore walls, pressure, elastic deformation condition, mechanics of destruction.

Видобування корисних копалин нерозривно пов'язане зі збільшенням об'ємів розвідувальних бурових робіт, та будівництвом експлуатаційних свердловин. Для зниження собівартості проходки свердловини існує безліч чинників, і не останню роль у цьому відіграє удосконалення параметрів режиму буріння та встановлення раціональних меж застосування породоруйнівних інструментів різних типів в конкретних геологічних умовах, правильне нормування бурових робіт з врахуванням теорії руйнування гірських порід на основі аналізу діючих зусиль, а, отже, і напружень, що виникають в породі.

Руйнування – це процес, що розвивається в локальних об'ємах та з досягненням гранично допустимих значень напружень в породі призводить до глобального руйнування. У відкритих системах, якими є пластові породи в процесі руйнування, відбувається обмін енергією і речовиною з навколишнім середовищем, тому однорідний стан рівноваги може втрачати стійкість і незворотно переходить в неоднорідний стаціонарний стан, що залишається стійким тільки за відносно малих збурень. Такі стаціонарні неоднорідні стани отримали загальну назву дисипативних структур. Відкриті системи під час нестаціонарних процесів завжди пря-

мують до мінімуму ентропії. Деформований стан гірських порід, як дисипативна система, що є далекою від рівноважного та квазірівноважного стану, переходить до нерівноважного стану, в процесі якого формуються дисипативні структури.

Показники тимчасового опору руйнуванню (межа міцності) за основних видів деформації (стиск-розтяг, зсув, згинання) вважаються основними міцнісними характеристиками твердих тіл і широко використовуються для практичних розрахунків як у галузях техніки, так і в гірничій справі [2].

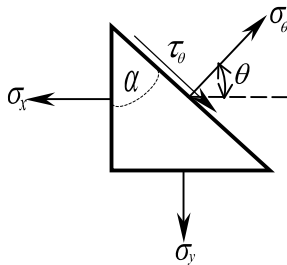
Основним видом деформації в процесі механічного руйнування гірських порід є зсув чи сколювання в процесі переміщення руйнівного елемента долота чи бурильної головки (в процесі ковзання чи обертання). Показники опору до елементарних видів напружень можуть слугувати лише для загальної оцінки поведінки гірських порід під час механічного впливу інструменту на них.

Як свідчать результати експериментальних та промислових досліджень, використовувати основні характеристики процесів деформації (модулі пружності, коефіцієнт Пуассона) в практичних розрахунках для процесу буріння не вдається, оскільки реальні умови вибою

свердловини є складнішими, однак показники тимчасового опору до елементарних деформацій дають узагальнену картину міцнісних характеристик гірської породи. На даний час існує значний обсяг фактичного матеріалу щодо визначення цих показників і властивостей гірських порід з точки зору теорії механіки руйнування твердих тіл, тому оцінка міцності гірських порід і шляхів їх використання на практиці викликає значний науковий і практичний інтерес.

Напружений стан стінки свердловини, що буриться, характеризується як головними, так і максимальними дотичними напруженнями. Оскільки гірську породу для умовно горизонтально розміщених горизонтів можна вважати квазіізотропною, то дану задачу можна розглядати з точки зору плоского напруженого стану.

Розглянемо елемент перерізу похило-скерованої стінки свердловини, нормаль до якої нахилена до осі x на кут θ (рис.1).



- σ_x – нормальне напруження в напрямку осі x ;
- σ_y – нормальне напруження в напрямку осі y ;
- θ – кут між нормаллю і віссю x до похилої площини;
- σ_θ – нормальне напруження;
- τ_θ – дотичне напруження;
- α – зенітний кут (кут нахилу стовбура свердловини до вертикальної осі)

Рисунок 1 – Елемент плоско-напруженого стану твердого тіла

Нормальне σ_θ і дотичне τ_θ напруження, що виникає в цьому перерізі, визначається з умови рівноваги [1].

Умова рівноваги зусиль в напрямку σ_θ описується рівнянням:

$$\sigma_\theta = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta. \quad (1)$$

Така ж умова в напрямку τ_θ має вигляд:

$$\tau_\theta = (\sigma_x - \sigma_y) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} (\sin^2 \theta - \cos^2 \theta). \quad (2)$$

Враховуючи проведені відповідні тригонометричні перетворення, ці рівняння можна переписати у вигляді:

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

$$\tau_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\theta - \tau_{xy} \cos 2\theta, \quad (4)$$

де τ_{xy} – дотичні напруження в напрямку осі y .

Рівняння (3) і (4) описують нормальне і дотичне напруження, що виникають на довільній похилій площині, через напруження σ_x , σ_y та τ_{xy} . Зауважимо, що для $\theta = 0$ ці співвідношення дають $\sigma_\theta = \sigma_x$ і $\tau_\theta = -\tau_{xy}$, а для $\theta = \frac{\pi}{2}$ маємо $\sigma_\theta = \sigma_y$ і $\tau_\theta = \tau_{xy}$.

Під час застосування наведених вище співвідношень для σ_θ і τ_θ слід чітко дотримуватись правила знаків для напружень:

- а) всі нормальні напруження є додатними;
- б) дотичне напруження τ_{xy} додатне, якщо воно спрямоване вздовж осі y ;
- в) дотичне напруження τ_θ додатне, якщо воно спрямоване за годинниковою стрілкою. Так вважається з тієї причини, що кут 2θ в крузі Мора є додатним в напрямку проти стрілки годинника і відповідає такому ж додатному напрямку для кута θ .

Під час зміни кута θ від 0 до 360° напруження σ_θ і τ_θ також змінюються. Максимальне і мінімальне значення σ_θ є головними напруженнями, а положення головних площин, на яких вони виникають, можна визначити, взявши похідну $\frac{d\sigma_\theta}{d\theta}$, прирівнявши її до нуля і розв'язавши отримане рівняння відносно θ . Таким чином, зі співвідношення (4) отримаємо:

$$\frac{d\sigma_\theta}{d\theta} = -(\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\theta + 2\tau_{xy} \cos 2\theta = 0, \quad (5)$$

або

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

Тут для зазначення кута, що визначає головні площини, замість θ застосовуємо позначення θ_{zl} . З рівняння (6) отримуємо два значення кута $2\theta_{zl}$, що відрізняються на 180°: перше значення лежить в межах 0÷180°, а друге – між 180÷360°. Отже, для кута θ можна знайти два значення: одне в межах 0÷90°, друге – в межах 90÷180°. Одному з цих значень кута θ_{zl} буде відповідати максимальне нормальне напруження σ_θ , другому – мінімальне. Ці головні напруження виникають у взаємно перпендикулярних площинах.

Два значення кута θ_{zl} , знайдені з рівняння (6), можна підставити у співвідношення (3) і обчислити два головні напруження для довільного випадку.

Загальне рівняння для головних напружень можна отримати за допомогою алгебраїчних перетворень. Так, з врахуванням рівняння (6), одержимо:

$$\begin{aligned} \cos 2\theta_{2l} &= \pm \frac{\sigma_x - \sigma_y}{s}; \\ \sin 2\theta_{2l} &= \pm \frac{2\tau_{xy}}{s}, \end{aligned} \quad (7)$$

де $s = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$.

Підставивши в рівняння (3), отримаємо:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}, \quad (8)$$

де σ_1 і σ_2 – відповідно максимальне і мінімальне головні напруження. З рівняння (8) видно, що $\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_x + \sigma_y$.

Зі співвідношення (4) отримано важливий висновок, що стосується головних площин: якщо у співвідношення підставити $\tau_\theta = 0$ і розв'язати отримане рівняння відносно 2θ , то знову одержимо рівняння (6). Це доводить, що на головних площинах відсутні дотичні напруження.

Визначимо максимальні дотичні напруження і положення площин, на яких вони виникають. Візьмемо похідну $\frac{d\tau_\theta}{d\theta}$ з рівняння (4) і, прирівнявши до нуля, одержимо

$$\operatorname{ctg} 2\theta_\theta = -\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}, \quad (9)$$

де θ_θ – кут, що визначає положення площини з максимальним дотичним напруженням. Зіставляючи отримане рівняння з рівнянням (6), бачимо, що $\operatorname{ctg} 2\theta_\theta = -\operatorname{tg} 2\theta_{2l}$, тому робимо висновок, що кути $2\theta_\theta$ і $2\theta_{2l}$ повинні відрізнятися на 90° . Звідси випливає, що площини з максимальними дотичними напруженнями складають кут 45° з головними площинами.

З рисунка 1 видно що кути θ і α є подібними, отже рівняння (9) є справедливим для зенітного кута свердловини.

Оскільки обвалювання стінок свердловини може відбуватися в площинах, де значення дотичних напружень є максимальними, можемо оцінити величину кута нахилу стовбура свердловини відносно стійкості її стінок, для чого скористаємося ще однією теорією для підтвердження отриманих результатів.

При будівництві свердловини, порода, що буриться, перебуває в напружено-деформованому стані, оскільки бурильним інструментом породі передаються сколюючі зусилля (рис. 2), що призводить до виникнення дотичних напружень [2]:

$$\tau = \frac{F_\tau}{S}, \quad (10)$$

де: F_τ – зовнішня сила, що призводить до зсуву, H ;

S – площа грані, що зсувається, m^2 ;

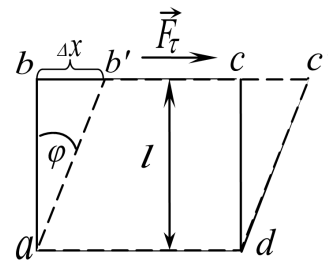


Рисунок 2 – Схема напружено-деформованого стану твердого тіла при деформації зсуву

φ – кут зсуву, град.;

Δx – абсолютний зсув, m ;

l – віддаль між гранями, що характеризують відносний зсув, m .

В лінійній механіці руйнування [3] поля деформації і напружень описуються коефіцієнтом інтенсивності напружень k . Зв'язок між k і τ не залежить від статичних, циклічних чи динамічних навантажень. Основну роль тут відіграє густина енергії напружено-деформованого стану стінок свердловини, яку вона набула в процесі руйнування гірської породи.

За теорією Л. Жильмо [4] ця енергія є питомою, тому залежить не від умов навантаження, а від теоретичної міцності гірської породи, що уможливорює 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.

Враховуючи це, є можливим розглядати цю проблему також 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, що призводить до осипання і обвалювання породи загалом. Цей процес описується критичним співвідношенням напруження зсуву та напруженням відривання породи. Реалізація цієї дисипативної структури в точці біфуркації, що відповідає глобальній нестабільності руйнування, залежить від структури гірської породи.

Оскільки енергія, поглинута поверхнею стінок свердловини, спричинена впливом зусилля, що мало напрям дотичної до цієї поверхні, напружено-деформований стан породи, в основному, залежить від відносного зсуву і є пропорційним до коефіцієнта зсуву і сколюючого зусилля [5]. Відносний зсув γ є прямопропорційним до кута зсуву, а оскільки кут

зсуву φ в шарах породи визначається рівнянням:

$$\gamma = \frac{\Delta x}{l} = \operatorname{tg} \varphi, \quad (11)$$

то, згідно теорії пружних деформацій, відносний зсув γ пропорційний сколюючому зусиллю τ , що характеризує дотичне напруження (зусилля і напруження це величини рівні за модулем і протилежні за напрямком, зусилля характеризує зовнішній вплив на тіло, а напруження характеризує протидію тіла на цей вплив з точки зору молекулярної взаємодії):

$$\gamma = \beta \tau, \quad (12)$$

де β – коефіцієнт пропорційності – константа, що залежить від матеріалу сколюючого пристрою.

Оскільки робота, виконана зовнішньою силою (породоруйнівним інструментом), накопичується у вигляді поглинутої стінками стовбура енергії, то тангенціальне напруження, що виникає в породі, буде рівним за модулем, але протилежним за напрямком сколюючому зусиллю:

$$\sigma_{\tau} = -N \cdot \operatorname{tg} \varphi = -N\gamma, \quad (13)$$

де N – модуль зсуву.

Водночас, величина сколюючого зусилля прямопропорційно залежить від обертового моменту породоруйнівного інструменту.

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 нахилу свердловини залежить від величини тангенса цього кута, а тут важливою є поступова зміна числових значень $\operatorname{tg} \theta$, оскільки накопичена енергія виконує роботу, пов'язану з руйнуванням (осипанням та обвалюванням) стінок свердловини. Величину роботи можна оцінити із залежності кута зсуву від навантаження.

Слід зауважити, що кут зсуву φ пов'язаний із zenітним кутом θ , який змінює своє значення від 0° до 90° . З наведеної попередньої теорії, що стосується висновків до рівняння (9), максимальні дотичні напруження складають кут 45° із zenітним кутом свердловини. Оскільки навантаження є пропорційним тангенсу кута, а в межах кута нахилу свердловини $0 \div 60^\circ$ $\operatorname{tg} \theta$ характеризується поступовою зміною числових значень (рис. 3), а відповідно і поступовою зміною градієнта енергії вздовж дотичної до поверхні стовбура свердловини, тому в цьому інтервалі, що і підтверджують експериментальні дані, спостерігається стійкість стінок свердловини до осипання та обвалювання. Після цього інтервалу значень кута нахилу свердловини, спостерігається різке зростання його числових значень $\operatorname{tg} \theta$, а це, в свою чергу, призводить до різкого збільшення питомої енергії, що поглинається стінками свердловини.

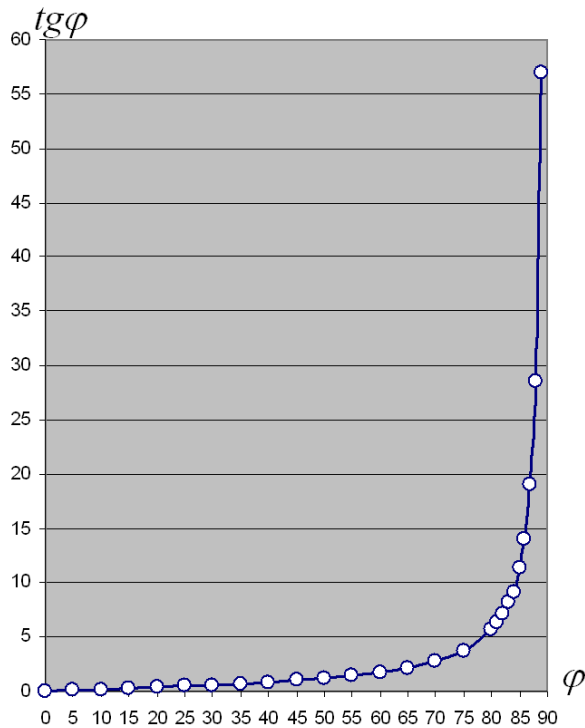


Рисунок 3 – Графічна залежність $\operatorname{tg} \varphi$ від φ

Питома енергія деформації є функцією від дотичного напруження і в загальному вигляді описується рівнянням:

$$du = \frac{\tau_{\max}^2}{2G}, \quad (14)$$

де: τ_{\max} – дотичне напруження на поверхні площини елемента породи, яке виникає за рахунок дії породоруйнівного інструменту, Pa ;

G – модуль зсуву, Pa ,

з якого випливає, що питома енергія, отримана породою, що буриться, пропорційна тангенсу кута зсуву - φ і величині модуля зсуву, який за різних кутів для одного і того ж пласта є різним через зміну анізотропних характеристик, а, отже, може теж змінювати свою величину (13). Зміна анізотропних характеристик може відбуватися у 2÷9 разів, що у стільки ж разів змінить модуль зсуву [6]. Поступова зміна значень $\operatorname{tg} \varphi$ і котангенса кута нахилу свердловини $\operatorname{ctg} \alpha = \operatorname{ctg} \theta$ (рис.1 та (9) і (14)) призводить до поступової зміни градієнта енергії, що, в свою чергу, зменшує ймовірність руйнування (осипання, обвалювання) стінок свердловини з точки зору зміни ентропії системи, тобто згідно з теорією термодинамічної стійкості флуктуацій [7] в цій зоні ймовірність критичного значення густини енергії деформації, а отже і ймовірність процесу руйнування, прямує до нуля.

Проведені експериментальні дослідження керну [8] на міцність підтвердили теоретичну оцінку залежності анізотропних властивостей гірської породи від zenітного кута свердловини, давши якісну картину цієї залежності.

На міцність досліджувались натурні зразки породи з кернавого матеріалу, вирізані під різними кутами нашарування від 0° до 90° з кроком 15° . Аналізуючи результати досліджень руйнування гірських порід, встановлено, що міцність анізотропних гірських порід залежить від кута залягання породи, і кут 0° – межа міцності на стискування – становить 16 МПа. Зі збільшенням кута залягання від 0° до 66° вона зменшується до 8,6 МПа, а далі знову зростає, набуваючи за кута 90° максимального значення, що вказує на наявність гранично допустимих значень зенітних кутів з умов збереження стійкості стінок свердловини.

Результати, які одержані на основі аналітичних і експериментальних досліджень, підтвердилися в процесі промислових випробувань на Бугруватівському, Південно-Панасівському, Лесяківському, Качанівському, Штормовому родовищах. За результатами аналітичних, експериментальних і промислових досліджень встановлено критично допустимі значення зенітного кута ($\alpha=65^\circ$), за яких існує найбільша ймовірність руйнування стінок похилої свердловини в процесі буріння горизонтів з нестійкими гірськими породами на ДДз та шельфі Чорного моря. Рекомендуємо розбурювати нестійкі горизонти за зенітних кутів нижчих або вищих від критичного.

Література

- 1 James M. Gere Mechanics of materials. // Van No strand Reinhold company. Civil Engineering Stanford University. – Melbourne, 1992. – p.670.
- 2 Воздвиженский Б.И. Физико-механические свойства горных пород и влияние их на эффективность бурения / [Б.И.Воздвиженский и др.] – М: Недра, 1973. – 270 с.
- 3 Панин В.Є. Структурные уровни деформации твёрдых тел / [В.Є. Панин и др.] – Новосибирск: Наука, 1985. – 517 с.
- 4 Gillemot L. - Int. J. of Engineering Fracture Mechanics. – 1987. – v. 10, №2. – p. 77-94.
- 5 Нотт Д.Ф. Основы механики разрушения: пер. с англ. / Д.Ф. Нотт. – М.: Металлургия, 1989. – 256 с.
- 6 Ohji K., Harada S. – Bull. JSME. – 1983. – v. 16. – p. 787.
- 7 Гленсдорф П. Термодинамическая теория структуры устойчивости флуктуаций: пер. с англ. / Гленсдорф П. – М.: Мир, 1997. – 597 с.
- 8 Карев В. Исследование и прогнозирование устойчивости стволов горизонтальных скважин баженовских отложений, бурящихся на депрессии / В. Карев, Ю. Коваленко, Ю. Кулинич // НИЦ Геомеханика и технология. Труды Института проблем механики РАН. – 2005. – Вып. 5. – С. 12-38.
- 9 Кунцяк Я.В. Экспериментальні та промислові дослідження і прогнозування стійкості стовбурів горизонтальних свердловин в нестійких породах / Я.В. Кунцяк, Р.Я. Кунцяк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2011. – № 1(38). – С. 62-69

Стаття надійшла до редакційної колегії

09.06.11

Рекомендована до друку професором

Мойсишиним В.М.