

УДК 622.

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНИХ НАПРУЖЕНЬ НА РУЙНУВАННЯ В СТІНКАХ ГЛИБОКИХ СВЕРДЛОВИН

Е.М.Барановський

Комплексна лабораторія технології буріння та кріплення свердловин ПВ УкрДГРІ; 79018, м. Львів, вул. Тургенєва, 33; к. 45; тел. (032) 2373126; e-mail: pvukrdgri@mail.lviv.ua

Статья посвящена исследованию влияния температурных напряжений на разрушения в стенках глубоких скважин. Выведены формулы для определения тангенциальных напряжений в горных выработках с эллиптической формой поперечного сечения ствола и при наличии в нём шаровых каверн. Установлен характер зависимости саморазрушения горной породы от перепада температуры на стенке скважины. Результаты расчётов стойкости породы к саморазрушению показали, что снижение её происходит как с ростом глубины скважины, так и перепада температуры на её стенке. При действии температурных напряжений на горные выработки наиболее стойкие к саморазрушению пород выработки с эллиптической формой поперечного сечения, а наиболее слабые — с цилиндрической формой поперечного сечения ствола.

The article investigates the influence of temperature stresses upon breakages in the walls of long holes. The formulae for defining plane stresses in headings having elliptical shape of stem cross-sections and at presence in it gun-fire cavities have been derived. The character of dependence of rock stresses on temperature falls in formation wall has been established. The results of the calculations of rock rigidity against self-distruction have shown that it reduces with the increase of a well depth and temperature fall in its wall. Under the influence of temperature falls on headings the most rigid against self-destruction are the outputs with elliptical shape of cross-section and the weakest ones are that having cylindrical shape of stem cross-section.

На багатьох розвідувальних свердловинах, особливо при розбурюванні нових площ, виникають проблеми, які пов'язані з міцністю їх стінок, що призводить до ускладнень стовбура, втрат частини або всієї пробуреної свердловини. Все це призводить до значних втрат коштів і часу, особливо в глибокому бурінні.

Без сумніву, руйнування стінок являє собою явище механічного порядку. Однак більшість публікацій на цю тему присвячено засобам боротьби, а не самій причині: даються рецепти для обробки бурового розчину, які б усували ці ускладнення. Існує ряд публікацій, які розглядають механічні проблеми стійкості свердловин [1,2,3,4]. В деяких з них було запропоновано використовувати поняття біфуркації (роздвоєння) порід для того, щоб правильно описати початок руйнування породи в процесі лабораторних випробувань під дією трьохосових навантажень, а в реальних умовах — на стінці свердловини. Проте ці дослідження відносно початку біфуркації в змодельованих стовбурах свердловин чи в товстостінних порожнистих циліндрах ніколи не виходили за межі експериментальних даних і тому не можуть слугувати підтвердженням використання теорії біфуркації до гірської породи [4].

Підхід до даної проблеми за допомогою пружно-пластичної теорії дає її вирішення, яке прийняте, головним чином, завдяки зручності її використання. Проте вона не дає змоги передбачити руйнування стінок і досить часто вводить в оману буровиків. Аналіз експериментальних робіт свідчить, що класичні пружно-пластичні теорії не забезпечують коректного прогнозування руйнування стінок лабораторних моделей (товстостінних труб при двох- і трьохосових випробуваннях) при використанні параметрів, визначених кондиційними випробуваннями. В зібраних даних ряду таких випробувань наведено "число стабільності" N_s , що визначається як відношення між теоретичним дотичним напруженням, розрахованим за пружною ізотропною теорією та міцністю породи, визначеною за допомогою кондиційних випробувань Q

$$N_s = \frac{\sigma_{\theta c}}{Q}$$

Це число повинно бути рівним одиниці або трохи більше. Однак, отримані дані свідчать про те, що воно змінюється від 2 до 8 [4]. Жодна теорія не дає змоги кількісно охарактеризувати це явище, і для практики немає іншого рішення, крім емпірики, яка дозволяє вказати буровику оптимальні умови, котрі гарантують механічну міцність стінок свердловини.

Розглядаючи гірський масив, як систему з великим запасом накопиченої потенціальної енергії, відкрились нові можливості в запобіганні динамічних явищ на основі керування станом гірського масиву. Однак пряме перенесення в практику глибокого буріння методів

дослідження, які мають місце в інших підземних виробках, неможливе. Різниця полягає в тому, що на напружено-деформований стан гірських порід довкола свердловини можна діяти не тільки зміною конструкції і часу її провідки, але й протитиском бурового розчину та регулюванням фізико-хімічних процесів його взаємодії з гірськими породами. Тому на перших порах доцільно охарактеризувати головні параметри задачі: навантаження, які накладаються на породу чи знімаються з неї. Накладанню на породу або зняттю з неї навантаження в стінці виробки сприяє багато чинників: деякі з них відомі і використовуються, інші вивчені недостатньо. На даний час основні напрямки тензора напружень оцінюють шляхом аналізу овалізації стінки свердловини або орієнтації гідралічних тріщин, заміром деформованості ядра, шляхом аналізу утворення дисків.

Проведеними дослідженнями встановлено, що суттєвий вплив на стійкість гірничих виробок чинять форма перерізу і нерівності його контура. Найменша величина напружень і найбільш рівномірний їх розподіл досягається при криволінійній формі перерізу виробки, яка є найбільш сприятливою з точки зору її стійкості [5]. Натурні спостереження і виміри засвідчили, що порожнина, утворена при руйнуванні породи, може охоплювати цілий контур гірничої виробки, наближаючись за формою до кульової поверхні або частини її. На основі викладеного можна припустити, що руйнування породи довкола виробки буде проходити до тих пір, доки вона не набуде форми еліпса або до утворення порожнини за формою, близькою до кульової.

В проведених нами дослідженнях зроблена спроба використати накопичену енергію в масиві гірських порід для визначення початкового або кінцевого їх саморуйнування [6]. Вони підтверджені промисловим матеріалом при бурінні Кольської надглибокої свердловини (СГ-3), Шевченкове-1, Синєвидне-1, який дає можливість стверджувати, що біфуркація порід є не що інше як їх саморуйнування в результаті дії накопиченої гірським масивом енергії.

Для гірничої виробки з циліндричною формою перерізу руйнування стінки свердловини розпочинається з глибини 5000 м (результати отримані на основі промислових матеріалів по св. СГ-3). У гірничій виробці еліптичного поперечного перерізу, в якій використано типові форми перерізу стовбура свердловини СГ-3, проведеними розрахунками встановлено, що на глибині 4000-7000 м процес саморуйнування породи в стінці свердловини відсутній. Аналогічні результати отримані за наявності в стінці свердловини каверни, близької за формою до кульової. Наведені результати підтверджують зроблені вище припущення.

В заключенні, до якого прийшла Міжнародна комісія з механіки гірських порід в області механізмів руйнування їх довкола підземних виробок, рекомендується дотримуватись особливої уваги в оцінці навантажень, які розвиваються з плином часу (термічні ефекти, вплив течій) і відповідальні за обвалювання порід. Ці

навантаження можуть бути більш вагомими, ніж повзучість чи інша несподівана поведінка породи [4].

Незважаючи на те, що термічні ефекти досі розглядалися рідко, особливо відносно їх геомеханічних наслідків, сьогодні на них звертають увагу, а розвиток досліджень по температурних ефектах в підземних виробках став уже необхідністю. Свердловини глибиною 1500-2000 м можуть підпасти під ризикові для їх міцності дії. Проблема стає ще більш гострою для глибоких свердловин 3000, 5000 і навіть 6000 м, які опиняються в складній ситуації через високі тиски і температури. Циркуляція бурового розчину, видалення породи з вибою свердловини та втрати тиску бурового розчину в насадках шарошкового долота сприяють зміні температури породи. На стінці свердловини може встановитися перепад температури 20-40⁰С і вище порівняно з початковим їх рівнем в гірській породі. Розуміння розподілу теплових напружень і механізмів руйнування, які можуть діяти на цю виробку, необхідне для вибору засобів підтримки таких напружень, які б забезпечували стійкість її стовбура.

Розглянемо процес переміщення бурового розчину при бурінні свердловини, який супроводжується помітним переносом тепла (рис.1). Коли свердловина досягає певної глибини, низхідний буровий розчин стає більш холодним, ніж стінки біля вибою і охолоджує їх. Він розігрівається, проходячи через насадки породоруйнівного інструменту і на контакт з більш гарячою породою. Піднімаючись в затрубному просторі, в певній точці ("нейтральна точка") він опиняється в температурній рівновазі з породою. Вище цієї точки буровий розчин, нагрітий сильніше ніж порода, буде розігрівати її, викликаючи в ній температурні напруження. Останні можуть стати причиною уповільнених руйнувань на цей раз у верхній, необсадженої частині стовбура, які не завжди зрозумілі для буровиків. Якщо товща порід складається із глини, ці зруйнування приписують явищу "повзучості", в той час як вони мають чисто термічне походження.

Для визначення початку руйнування породи можна скористатися теорією пружної енергії формозміни (теорією Губер-Мізеса-Генкі) [7]. Руйнування не відбувається, якщо

$$u_{\phi} - \frac{\sigma_s^2}{6G} \leq 0, \quad (1)$$

де: u_{ϕ} – питома енергія пружної деформації формозміни; σ_s – постійна матеріалу, яка характеризує напруження, що викликають руйнування матеріалу чи перехід за межу текучості при одноосьовому розтягу (стисненні); G – модуль зсуву, який визначається за формулою

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$$

Підставляючи значення G у формулу (1), можна представити її у вигляді

$$u_\phi - \frac{1+\mu}{3E} \sigma_s^2 \leq 0.$$

Оскільки

$$\frac{1+\mu}{3E} \sigma_s^2 = [u_\phi],$$

формула набуде кінцевого вигляду:

$$u_\phi \leq [u_\phi], \quad (2)$$

де: $[u_\phi]$ – питома потенціальна енергія при лінійному напруженому стані породи.

Питома потенціальну енергію формозміни можна визначити за формулою [8]

$$u_\phi = \frac{1+\mu}{3E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1) \quad (3)$$

де: E – модуль Юнга; μ – коефіцієнт Пуасона; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження.

Для визначення головних напружень з врахуванням температурних напружень скористаємось рівняннями [4]

$$\sigma_z = \rho_n g H - \frac{\alpha E}{1-\mu} \Delta T, \quad (4)$$

$$\sigma_r = \rho_p g H, \quad (5)$$

$$\sigma_\theta = (2\lambda\rho_n - \rho_p)gH - \frac{\alpha E}{1-\mu} \Delta T, \quad (6)$$

де: $\sigma_z, \sigma_r, \sigma_\theta$ – відповідно осьова, радіальна і тангенціальна компоненти напружень; λ – коефіцієнт бокового стисання; ρ_n, ρ_p – густина породи і рідини відповідно; g – прискорення вільного падіння; H – глибина виробки; α – коефіцієнт теплового розширення породи; ΔT – перепад температури на стінці свердловини.

На підставі наведених формул зроблено розрахунки для циліндричної форми перерізу стовбура свердловини СГ-3, результати яких подано у вигляді графіка (рис.2), на якому представлено залежність саморуйнування гірської породи від питомої потенціальної енергії формозміни з врахуванням термічного ефекту. Як видно із графіка, зростання питомої енергії формозміни призводить до саморуйнування породи при $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ на глибині 4500 м, а при $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ – 4100 м.

Розглянемо гірничу виробку еліптичного поперечного перерізу. Для визначення тангенціального напруження σ_θ скористаємось формулою, представленою в роботі [5]

$$\sigma_\theta = P + Q - \frac{[(a-b)(P+Q) + (a+b)(P-Q)] \cdot (a \cdot \sin^2 \theta - b \cdot \cos^2 \theta)}{a^2 \sin^2 \theta - b^2 \cos^2 \theta}, \quad (7)$$

де: P – вертикальне напруження; Q – бічний опір; a і b – відповідно велика і мала півосі еліпса; θ – полярний кут.

Для умов глибокої свердловини можна прийняти, що $P = Q$. Тоді вираз (7) набуде вигляду

$$\sigma_\theta = 2P - \frac{2P \cdot (a-b) \cdot (a \cdot \sin^2 \theta - b \cdot \cos^2 \theta)}{a^2 \sin^2 \theta - b^2 \cos^2 \theta}. \quad (8)$$

Для визначення напружень в порушеному циліндричній виробкою масиві А.М.Динник вивів основні математичні залежності [9]. При цьому нормальний вертикальний тиск має той же вигляд залежності, що і при непорушеному масиві. Таким чином,

$$P = \sigma_z = \rho_n g H - \rho_p g H.$$

Приймаючи

$$\chi = \frac{(a-b) \cdot (a \cdot \sin^2 \theta - b \cdot \cos^2 \theta)}{a^2 \sin^2 \theta - b^2 \cos^2 \theta},$$

отримаємо

$$\sigma_\theta = 2 \rho_n g H (1 - \chi) - \rho_p g H. \quad (9)$$

Для перевірки факту відсутності саморуйнування породи в гірничій виробці еліптичного поперечного перерізу в умовах глибокого буріння проведено розрахунки, в яких використано типові форми перерізу стовбура свердловини СГ-3. Результати їх представлено у вигляді графіка (рис.3), на якому показано залежність саморуйнування породи від питомої потенціальної енергії формозміни з врахуванням термічного ефекту. Як видно із графіка, на глибині 4000-7000 м процес саморуйнування породи відсутній. Однак ці результати отримано для різних значень параметра χ . У зв'язку з цим проведено розрахунки, в яких для всіх ділянок стовбура прийнято параметр $\chi = 0,12$, що відповідає глибині свердловини 4000 м. На основі їх побудовано графік (рис.4), завдяки якому встановлено, що з глибини 5000 м відмічено початок саморуйнування гірської породи $\Delta T = 40^\circ\text{C}$.

При проведенні вертикальних гірничих виробок в їх стінках можуть утворюватись порожнини за формою, близькою до кульової. У цьому випадку величина напружень буде нижчою від величини на контурі циліндричної виробки [10]. Для визначення σ_{θ_k} можна скористатись відомою формулою для тангенціального напруження кулі

$$\sigma_{\theta_k} = -\lambda\rho_n g H \left(1 + \frac{a^2}{2r^2} \right). \quad (10)$$

Тангенціальне напруження на внутрішній стінці свердловини при $a = r$ становить

$$\sigma_{\theta_k} = (-1,5 \lambda\rho_n + \rho_p) g H. \quad (11)$$

З метою перевірки відсутності саморуйнування породи за наявності в стовбурі кульових каверн для умов свердловини СГ-3 проведені розрахунки, результати яких подано у вигляді графіка (рис.5). З отриманої графічної залежності видно, що за наявності в стінці свердловини кульових каверн в інтервалі 4000-7000 м відмічено саморуйнування породи. Так, зростання питомої енергії формозміни призводить до саморуйнування породи при $\Delta T = 20^{\circ}C$ на глибині 6200 м, а при $\Delta T = 40^{\circ}C$ – 5600 м.

З метою оцінки отриманих результатів досліджень проведено розрахунки стійкості породи до саморуйнування з врахуванням енергії гірського масиву і температурних напружень. Кількісну оцінку стійкості (K_{cm}) можна визначити із формули (2)

$$K_{cm} = \frac{[u_{\phi}]}{u_{\phi}} \quad (12)$$

В табл.1 наведено дані зміни коефіцієнта стійкості з ростом глибини свердловини для циліндричної і еліптичної форми перерізу стовбура свердловини СГ-3 та за наявності в ньому кульових каверн. Вони свідчать про те, що гірничі виробки з еліптичною формою поперечного перерізу є найбільш стійкими до саморуйнування порід при дії температурних напружень. В гірничих виробках з циліндричною формою перерізу гірські породи є найменш стійкими до саморуйнування. З глибини 5000 м коефіцієнт стійкості стає меншим за одиницю. Для гірничих виробок з кулеподібною формою каверн коефіцієнт стійкості стає меншим від одиниці на глибині 7000 м при всіх значеннях перепаду температури на стінці свердловини. Зниження коефіцієнта стійкості породи відбувається як із зростанням глибини свердловини, так і перепаду температури на її стінці.

Таблиця 1

Глибина вибою, м	Коефіцієнт стійкості при ΔT		
	$0^{\circ}C$	$20^{\circ}C$	$40^{\circ}C$
Циліндрична форма перерізу стовбура			
4000	1,75	1,32	1,03
5000	0,98	0,85	0,74
6000	0,66	0,59	0,53
7000	0,43	0,39	0,36
Еліпсоподібна форма перерізу стовбура			
4000	2,59	1,82	1,35
5000	2,50	1,89	1,55
6000	2,56	2,07	1,71
7000	1,83	1,50	1,26
Кулеподібна форма каверн			
4000	4,10	2,12	1,38
5000	2,31	1,59	1,19
6000	1,47	1,12	0,89
7000	0,97	0,77	0,63

Використання методики визначення температурних напружень засвідчило, що при певних умовах вона може стати визначальною. Отримані результати досліджень свідчать, що при виникненні ймовірності розвитку нестійкості порід в пробуреному стовбурі свердловини необхідно враховувати температурні напруження. Крім цього, вони дають можливість розробити методи визначення параметрів підземних виробок, які б забезпечували коректне прогнозування дислокацій стінок свердловини.

Література

1. Щербань А.Н., Черняк В.П. Прогноз и регулирование теплового режима при бурении глубоких скважин. – М.: Недра, 1974. – 248 с.
2. Есьман Б.И. Термогидравлика при бурении скважин. – М.: Недра, 1982. – 247 с.
3. Сеид-Рза М.К., Фараджев Т.Г., Гасаев Р.А. Предупреждение осложнений в кинетике буровых процессов. – М.: Недра, 1991. – 272 с.
4. Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти: Пер. с англ. и франц. / Под ред. В.Мори и Д.Фурментро – М.: Мир, 1994. – 416 с.
5. Айзаксон Э. Давление горных пород в шахтах. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 137 с.
6. Барановський Е.М., Возний В.Р. Методи і критерії оцінки явища дискування ядра // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Буріння нафтових і газових свердловин. Випуск 38(2). — Івано-Франківськ, 2001. — С.18-24.
7. Ершов Л.В., Либман Л.К., Нейман И.Б. Механика горных пород. – М.: Недра, 1987. – 192 с.
8. Писаренко Г.С., Агарев В.А., Квитка А.Л. и др. Сопротивление материалов. — К.: Вища школа. Головное изд-во, 1986. — 775с.
9. Андрианов И.Н., Бакланов Ю.В., Буркин Л.Г. и др. Бурение глубоких геолого-поисковых скважин на суше и на море. – Л.: Недра, Лен. отд., 1965. – 413 с.
10. Зорин А.Н. Управление динамическими проявлениями горного давления. - М.: Недра, 1978. – 175 с.