

Я. С. Коцкулич, д-р техн. наук¹; **Д. Ю. Мочернюк**, д-р техн. наук²;
О. Б. Марцинків, канд. техн. наук¹

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна

²Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВИХ ЯВИЩ НА СТІЙКІСТЬ СТІНОК СВЕРДЛОВИНИ

Проведено аналіз впливу поверхневих явищ на стійкість стінок свердловини. Показано, що гірський масив, який є пружним півпростором, навантажений внутрішніми силами поля гравітації і в ньому не можуть виникати умови пластичності або текучості гірських порід. Досліджено концентрацію напружень на стінках ствола свердловини.

Ключові слова: *стійкість, поверхневі явища, гірський тиск, напруження, гідростатичний тиск*

Сучасна технологія буріння глибоких нафтогазових свердловин, переважно ґрунтується на наукових підходах до регулювання фізико-хімічних властивостей бурових промивальних рідин шляхом добирання відповідних хімреагентів [1, 2]. Однак такий підхід, на нашу думку, треба вважати дещо паліативним через те, що зміна властивостей бурової промивальної рідини спричинюється поверхневими явищами дисперсних частинок тієї гірської породи, яка безпосередньо руйнується бурильним інструментом. Очевидно, що той комплекс пластів, який розташований вище за вибій свердловини, мусить тривалий час залишатися поза увагою, що призводить до різного виду ускладнень, зумовлених нестабільністю стінок свердловини. Тепер такі ускладнення усуваються спусканням проміжної колони обсадних труб, що спричиняє великі витрати коштів і часу.

Спочатку з'ясуємо властивості поверхневих явищ. Руйнування твердого тіла будь-яким способом полягає у подоланні його міцності, що супроводиться утворенням нових поверхонь відокремлення, які вступають у взаємодію з оточуючим середовищем. Робота утворення нових поверхонь витрачається на подолання сил зчеплення між тими елементарними частинками, які примусово опинилися у поверхневому шарі, а не в об'ємі. Якщо рівнодійна сил взаємодії між елементарними частинками всередині тіла дорівнює нулю, то у поверхневому шарі ця рівнодійна вже не дорівнює нулю і спрямована всередину тієї фази, у якої сили зчеплення більші. Таким чином, на новоутвореній поверхні твердого тіла, що межує з рідким чи газовим оточуючим середовищем, виникає надлишок вільної енергії, який має назву поверхневої енергії або поверхневого натягу. Тобто, поверхневий натяг є мірою некомпенсованості сил між елементарними частинками у поверхневому шарі.

Наприклад, на контакті поверхні води з повітрям рівнодійна сил поверхневого натягу спрямована всередину об'єму води. Під впливом цієї рівнодійної сили поверхня води обтискується і поводить себе так, буцімто у неї є плівка типу «шкіри». Цим пояснюється явище, коли металева голка плаває на поверхні води [3, 4].

Паліативне перенесення результатів дослідження механіки матеріалів, одержаних в наземних умовах, і застосування цих результатів до геомеханіки посприяло хибним припущенням про те, що гірські породи в умовах гірського масиву характеризуються такими самими властивостями, як і на поверхні Землі під час лабораторних випробувань за стандартними методиками. На підставі такої аналогії вважається, що гірські породи у яких

коефіцієнт Пуассона $\nu \cong 0,5$ в умовах гірського тиску мусять перебувати у пластичному стані.

Якщо взяти до уваги, що масив гірських порід являє собою пружний півпростір, навантажений внутрішніми силами, зумовленими полем гравітації, то цей випадок можна експериментально змодельовати лише за допомогою центрифуги, а не взаємодією поверхонь двох тіл чи систем в наземних лабораторних умовах.

Беручи до уваги, що поле сил гравітації має строго орієнтований напрямок дії до центра земної кулі, то очевидно, що у кожній точці напруженого масиву гірських порід існує така система координатних осей X , Y і Z , які одночасно є головними напрямками трьохосового напруженого стану. Таким чином, напружений стан масиву гірських порід визначається лише трьома, а не шістьма числами, а це свідчить, що застосування тензорної характеристики напруженого стану непотрібне.

Отже, у масиві гірських порід виникає трьохосовий напружений стан, який характеризується трьома компонентами, дві з яких бокові і рівні між собою, тому еліпсоїд головних напружень набуває форми тіла обертання [5]

$$\sigma_z = -\sum_{i=0}^n \rho_i \cdot g \cdot z_i ; \quad (1)$$

$$q_x = q_y = k \cdot \sigma_z, \quad (2)$$

де ρ_i – густина гірських порід кожного i -го шару (пласта) висотою z_i ;

g – прискорення вільного падіння;

k – коефіцієнт бокового стискання, яким позначено співвідношення

$$k = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (3)$$

Характеристика напруженого стану масиву гірських порід [5, 6] спричинила назву гірського тиску, але це поняття іноді дещо спотворюється. Причиною цього треба вважати беззастережне перенесення результатів досліджень матеріалів при взаємодії двох механічних систем, що контактують між собою, на системи у яких виникають внутрішні сили взаємодії між елементарними частинками під впливом сили гравітації. Зважаючи на те, що ці два поняття дуже різні за фізичним змістом, виникає потреба дещо пояснити.

Зовнішні сили виникають лише при взаємодії між собою двох окремих механічних систем, коли джерелом вектора сили є контакт поверхонь між двома матеріальними точками (двома тілами).

Внутрішні сили, що викликані полем гравітації, інерції, магнітного притягання, не являються результатом дії контакту двох тіл, бо вони характеризуються фізичними полями, що спричиняють взаємодію між елементарними частинками всередині окремо взятого тіла (механічної системи), яке розглядається.

Отже, гірський тиск характеризує напружений стан всередині масиву гірських порід, викликаний полем сил гравітації (власною вагою) і наділений трьома нерівними нульовими головними напруженнями [5, 6], з яких два рівні між собою. Неоднорідність фізико-механічних характеристик гірських порід у стратиграфічному розрізі геологічної будови земної кори свідчить, що гірський тиск залежить не тільки від глибини, але й від типу гірських порід.

Оскільки масив гірських порід під дією сил тяжіння може деформуватися лише вертикально, то закон Гука має вигляд [6, 7]

$$\varepsilon_z = -\frac{\sigma_z}{E^*}, \quad (4)$$

де $E^* = \frac{E \cdot (1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)}$ - модуль гравітаційного стискання масиву (з боковим обмеженням

від дії безмежного півпростору);

E – модуль лінійної деформації матеріалу без бокового обмеження [6, 7].

Із закону Гука [6] бачимо, що при однакових величинах σ_z величина деформації ε_z залежить тільки від модуля E^* , тобто від коефіцієнта Пуассона ν .

З викладеного вище бачимо, що ототожнювання гірського тиску з гідростатичним є некоректним підходом до фізичного змісту цих величин, бо гірський тиск у даній точці характеризується трьома векторними величинами стискання [5, 6], з яких лише дві рівні між собою. причому, величина гірського тиску залежить від кута нахилу площини на яку він діє, так як у цьому разі виникають дотичні напруження за рахунок відповідного зменшення головних напружень (поворот векторів головних напрямків). Зате гідростатичний тиск у даній точці, який є скалярною величиною, від кута нахилу площини, на яку він діє, не залежить.

З цього бачимо, що між гідростатичним і гірським тисками є істотна різниця, бо ці величини однакові лише за розмірністю, але різні за фізичними характеристиками. Гірський тиск є тривекторним напруженим станом (геостатичним напруженням), а гідростатичний тиск є скалярною величиною.

Таким чином, у подальшому під гірським тиском будемо розуміти геостатичне напруження, яке лише в одному частинному випадку може переходити у скалярну величину, коли коефіцієнт Пуассона $\nu \cong 0,5$, а коефіцієнт бокового стискання $k \cong 1$.

Акустичні характеристики гірських порід свідчать, що гірський масив наділений ідеально пружними властивостями та ізотропністю, що підтверджується об'ємним законом Гука, який характеризує об'ємну деформацію

$$\theta = -\frac{\sigma_{окт}}{K^*}, \quad (5)$$

де $\sigma_{окт} = -\frac{(\sigma_z + 2 \cdot q)}{3}$ - октаедричне напруження;

K^* – модуль об'ємної деформації, яким записано співвідношення:

$$K^* = \frac{E^*}{3 \cdot (1-2 \cdot \nu)} = \frac{E \cdot (1-\nu)}{3 \cdot (1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)^2}. \quad (6)$$

Аналізуючи (5), разом із (6) бачимо, що при $\nu \cong 0,5$, $K^* \rightarrow \infty$ і тоді об'ємна деформація відсутня, $\theta = 0$. З цього переконаємося, що гірські породи, яким властивий коефіцієнт $\nu \cong 0,5$, відносяться до ідеально пружних нестисливих матеріалів.

І, навпаки, якщо $\nu \cong 0$, тоді $E^* \cong E$, $K^* \cong k \cong \frac{E}{3}$ і це є найменший із можливих модулів, коли об'ємна деформація набуває екстремального значення $\theta \cong -\frac{3 \cdot \sigma_{окт}}{E}$.

Тепер розглянемо напружений стан матеріалу в умовах гірського тиску. Якщо візьмемо до уваги класифікацію головних напружень для умов гірського тиску за алгебричними ознаками $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ у вигляді

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_x = q = -k \cdot \sigma_z; \\ \sigma_2 &= \sigma_y = q = -k \cdot \sigma_z; \\ \sigma_3 &= \sigma_z = -\rho \cdot g \cdot z, \end{aligned} \quad (7)$$

тоді різниця між головними напруженнями (7) дає змогу виразити числові значення дотичних напружень, що виникають на площинах паралельних до головних напрямків

$$\begin{aligned}\tau_{1,3} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_z \cdot (1-k)}{2}; \\ \tau_{2,3} &= \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_z \cdot (1-k)}{2}; \\ \tau_{1,2} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = 0.\end{aligned}\quad (8)$$

Якщо взяти до уваги, що для крихких гірських порід коефіцієнт Пуассона коливається в межах $0,1 \leq \nu \leq 0,325$, то на підставі (8) констатуємо, що максимальні величини дотичних напружень перебувають в межах $0,445 \cdot \sigma_2 \leq \tau_{1,3} = \tau_{2,3} \leq 0,259 \cdot \sigma_2$. Оскільки допустима міцність гірських порід (кристалічних і осадових) не перевищує $\tau_{max} \leq 200$ МПа, то очевидно, що під дією цих величин дотичних напружень гірські породи зазнали руйнування і перебувають у крихкому стані. Тріщини у крихких гірських породах утворилися на площинах паралельних до головних напружень σ_1 і σ_2 , що нахилені під кутом $\alpha \cong 45^\circ$ до зенітної прямої Z. Можна зробити припущення, що утворення тектонічних тріщин відбувалося за рахунок інтенсифікації гірського тиску під час землетрусів, коли сейсмічні хвилі гармонійно змінюють величину осьового напруження - σ_2 . Таким чином, можна стверджувати, що пласти, які утворені з однорідних гірських порід перебувають у крихкому стані і є природними резервуарами зберігання флюїдів (води, нафти та газу).

Утворення вертикальних тектонічних тріщин у масиві гірських порід мало ймовірно, бо дотичні напруження (8) на площинах паралельних до головного напруження σ_z відсутні. Що стосується гіпотези про існування горизонтально розташованих тектонічних тріщин, то ця гіпотеза позбавлена будь-яких підтверджень.

Крім головних напружень в теорії напруженого стану особливе місце посідають так звані октаедричні напруження, що виникають на площинах рівнонахилених до всіх трьох головних напрямків напружень $q_x = q_y \geq \sigma_z$. Такі площини можна розглядати, як грані правильного восьмигранника (октаедра), осі якого збігаються з напрямками головних напружень.

Нормальні $\sigma_{окт}$ і дотичні $\tau_{окт}$ октаедричні напруження для умов гірського тиску запишуться у вигляді

$$\sigma_{окт} = -\frac{1}{3} \cdot (2 \cdot q + \sigma_z) = -\frac{\sigma_z}{3} \cdot (1 + 2 \cdot k); \quad (9)$$

$$\tau_{окт} = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\tau_{1,3}^2 + \tau_{2,3}^2 + \tau_{1,2}^2} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sigma_z \cdot (1-k). \quad (10)$$

З цих виразів бачимо, що закономірність розподілу нормальних (9) і дотичних (10) октаедричних напружень залежить від коефіцієнта бокового обмеження ν . При $\nu = 0$,

$$\sigma_{окт} = -\frac{\sigma_z}{3}, \quad \tau_{окт} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sigma_z, \quad \text{а при } \nu = 0,5, \quad \sigma_{окт} = -\sigma_z, \quad \tau_{окт} = 0.$$

З цього видно, що апріорне припущення деяких дослідників про те, що геологічні пласти, представлені кам'яною сіллю або глинами, для яких $\nu \cong 0,5$, перебувають у пластичному стані і схильні до текучості позбавлене всяких підстав.

Буріння глибоких нафтогазових свердловин супроводиться локальним збільшенням напружень навколо отвору ствола свердловини внаслідок різкої зміни суцільності будови гірського масиву і ця задача давно привертає увагу дослідників гірничої справи. Концентрація напружень, що викликана наявністю свердловини присутня біля самого ствола, але із збільшенням відстані від її осі додаткові напруження інтенсивно зменшуються і на невеликій відстані від отвору свердловини набувають такого самого значення, як і за відсутності свердловини.

Беручи до уваги, що концентрація дотичних напружень на стінках свердловини радіусом a швидко вщухає, тому нема ніяких підстав припускати, що ці дотичні напруження можуть спричинювати розриви пластів сформованих із крихких матеріалів, для яких $0,1 \leq \nu \leq 0,325$, бо на відстані $r = 4 \cdot a$ від осі свердловини величина дотичних напружень становить біля 6 % від початкової.

Якщо взяти до уваги, що на площинах паралельних радіусу свердловини у крихких гірських породах вже існують тектонічні тріщини, то можна очікувати, що ці природні тріщини під дією величини гідростатичного тиску можуть зазнавати розширення (розкриття) і поглинати промивальну рідину. Це явище спостерігається повсюдно і одержало назву «гідравлічний розрив пласта», але така назва встановилася чисто прагматично і теоретичними дослідженнями не підтверджується.

Аналізуючи компоненти дотичних напружень (8) бачимо, що вони залежать від коефіцієнта бокового стискання k , числове значення якого визначається виразом (3), а також від коефіцієнта C , який характеризує співвідношення між гідростатичним тиском промивальної рідини та геостатичним напруженням

$$C = \frac{P}{\sigma_z} \quad (11)$$

Дослідження задачі методами теорії пружності про концентрацію напружень гірських порід на контурі стінок свердловини, заповненої промивальною рідиною, коли $r = a$ дало такий результат оцінки величин нормальних і дотичних октаедричних напружень:

- а) величини нормальних октаедричних напружень визначаються виразом (9);
- б) величини октаедричних дотичних напружень визначаються виразом

$$\tau_{окт} = \frac{\sigma_z}{6} \cdot \sqrt{2 + 6 \cdot C^2 + 8 \cdot k^2 - 4 \cdot k - 12 \cdot k \cdot C}. \quad (12)$$

Якщо тепер підставимо числові значення величин C і k для двох екстремальних випадків, коли густина промивальної рідини ρ_p коливається в межах $1200 \leq \rho_p \leq 2000$ кг/м³ у формули (9) і (12), тоді одержимо закономірності зміни $\sigma_{окт}$ і $\tau_{окт}$ для всього діапазону типів гірських порід, у яких $0,1 \leq \nu \leq 0,497$.

Узагальнюючи викладене вище можна зробити такі практичні висновки:

1. Відомі експериментальні результати механічних випробувань зразків гірських порід за методикою Кармана, та інших дослідників, у камерах високого тиску з одночасною зміною різниці величин між головними напруженнями, не можуть бути перенесені на умови гірського масиву, бо ця методика побудована на взаємодії двох механічних систем, які створюють умови зовнішнього, а не внутрішнього навантажування на елементарні частинки матеріалу зразка.

2. Експериментальне моделювання дії об'ємної сили гравітації, на зразок гірської породи, можливе лише за допомогою центрифуги, але в цьому немає потреби, бо всю потрібну для розрахунків інформацію можна одержати на підставі стандартних геофізичних вимірювань.

3. Оскільки для гірських порід, у яких $\nu=0,5$, $\tau_{max}=0$, то вести мову про пластичність або текучість в умовах гірського масиву безпідставно, бо зміна форми матеріалу залежить тільки від наявності дотичних напружень.

4. Концентрація напружень на стінках свердловини залежить тільки від типу гірських порід і не залежить від діаметра, глибини та форми контура свердловини. Теоретичне обґрунтування концентрації напружень на стінках свердловини при різних значеннях коефіцієнтів C і k дає можливість прогнозувати потрібну величину гідростатичного тиску у кожному конкретному випадку.

Проведен анализ влияния поверхностных явлений на устойчивость стенок скважин. Показано, что горный массив, который является упругим полупространством, нагруженный внутренними силами поля гравитации и в нем не могут возникать условия пластичности или текучести горных пород. Исследовано концентрацию напряжений на стенках ствола скважины.

Ключевые слова: *устойчивость, поверхностные явления, горное давление, напряжение, гидростатическое давление.*

Y. S. Kotskulych, D. Y. Mocherniuk, O. B. Martsynkiv

THE INFLUENCE OF SURFACE PHENOMENA ON THE STABILITY OF WELLBORE

It has carried out an analysis of the influence of surface phenomena on the stability of the wellbore. It has shown that a rock mass, which is an elastic half-space, is loaded with internal forces of the gravitational field, and conditions of plasticity or rock flowage can not appear inside of it. The concentration of stresses on the wellbore is investigated.

Key words: *stability, surface phenomena, rock pressure, tension, hydrostatic pressure.*

Література

1. Васильченко А. О., Локтєв С. В., Боровик М. В., Яремійчук Я. С., Филь В. Г., Андрусак А. М. Захист стінок свердловини. Перегляд ролі реагентів // Нафтова і газова промисловість. – 1998. – № 3. – С. 18–20.
2. Витрик В. Г., Мрозек Е. Р., Пятунин А. И., Каралаш Н. В. и др. Разработка и промышленные испытания нового типа полимер-калиевого бурового раствора // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 1997. – № 8. – С. 19–21.
3. Браун Т., Лемей Г. Ю. Химия в центре наук: В 2-х ч. – М.: Мир, 1983. – 448 с. и 520 с.
4. Мороз А. С., Ковальова А. Г. Фізична та колоїдна хімія. – Львів: Світ, 1994. – 280 с.
5. Желтов Ю. П. Деформации горных пород. – М.: Недра, 1966. – 197 с.
6. Мочернюк Д. Ю. Теоретичне обґрунтування техніко-економічних переваг буріння похило спрямованих свердловин з довгими горизонтальними ділянками // Збірник УНГА «Проблеми нафтогазового комплексу України». – Київ, 2002. – С. 59-68.
7. Moczerniuk D. Fizyko-mechaniczne charakterystyki skat znajdujących się w warunkach naprężeń górotworu // Nafta – Gaz, № 6 – 7, 2002. S. 359–362.

Надійшла 14.08.17

References

1. Vasylychenko A. O., Loktiev S. V., Borovyk M. V. et al. (1998). Zakhyst stinok sverdlovyny. Perehliad roli reahentiv [Protecting the walls of the well. Revision of the role of reagents] *Naftova i hazova promyslovist.* – *Oil and gas industry*, 3, 18–20 [in Ukrainian].
2. Vitrik V. H., Mrozek E. R., Piatunin A. I. et al. (1997). Razrabotka i promyshlennye ispytaniia novoho tipa polimer-kalievoho burovoho rastvora [Development and industrial tests of a new type of polymer-potassium drilling mud] *Stroitelstvo neftianykh y hazovykh skvazhin na sushe i na more.* – *Construction of oil and gas wells on land and at sea*, 8, 19–21 [in Russian].
3. Braun T. & Lemei H. Yu. (1983). *Khimiia v tsentre nauk [Chemistry in the center of science]*. Moscow: Mir [in Russian].
4. Moroz A. S. & Kovalova A. H. (1994) *Fizychna ta koloidna khimiia [Physical and colloidal chemistry]*. Lviv: Svit [in Ukrainian].
5. Zheltov Yu. P. (1966) *Deformatsii hornykh porod [Deformations of rocks]*. Moscow: Nedra [in Russian].
6. Mocherniuk D. Yu. (2002) Teoretychne obgruntuvannia tekhniko-ekonomichnykh perevah burinnia pokhylo spriamovanykh sverdlovyn z dovhymy horyzontalnymy diliankamy [Theoretical substantiation of technical and economic advantages of drilling inclined directional wells with long horizontal sections] *Zbirnyk UNHA «Problemy naftohazovoho kompleksu Ukrainy».* – *UOGA Collection "Problems of oil and gas sector of Ukraine"*, 59–68 [in Ukrainian].
7. Moczerniuk D. (2002) Fizyko-mechaniczne charakterystyki skat znajdujących się w warunkach naprężeń górotworu [Physical-mechanical skat characteristics under the stress condition of the rock mass] *Nafta – Gaz.* – *Oil – Gas*, 6 – 7, 359–362. [in Polish].