

Актуальні питання нафтогазової галузі

УДК 622.241.026

ГОЛОВНЕ ЗАВДАННЯ ГЕОМЕХАНІКИ У ВИРІШЕННІ ПРОБЛЕМ ГЛИБОКОГО БУРІННЯ

¹ Е.М.Барановський, ² В.М.Мойсишин

¹ Комплексна лабораторія технології буріння та кріплення свердловин ПВ УкрДГРІ; 79018, м. Львів, вул. Тургенєва, 33; кімн. 45; тел. (0322) 373126; e-mail: pvukrdgri@mail.lviv.ua

² ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42123; e-mail: math@nung.edu.ua

Рассмотрены основные направления изучения процесса разрушения горной породы на разных уровнях, а также проблемы, которые могут возникнуть в масштабе массива, скважины, матрицы и блока. На основании анализа известных формул для оценки коэффициента снижения прочности пород в массиве получена новая зависимость для условий глубокого бурения. Предложена формула для определения перемещений на боковой поверхности бурящейся скважины.

Досвід проведення глибоких свердловин засвідчив, що нестійкість стовбура не завжди є критичним чинником у процесі буріння. Для отримання ідеальної його стійкості потрібні значні зміни деяких параметрів буріння (зокрема, густини бурового розчину), що інколи не сумісно з економічними показниками чи безпекою при будівництві свердловини. Тому кінцева мета полягає в тому, щоб мати метод проектування, який ґрунтується на прогнозі руйнування стінок стовбура. Для досягнення цієї мети необхідно знати поведінку породи на різних етапах розвитку в ній деформації. Virішенням цієї проблеми займається геомеханіка, яка є одним із розділів фізики гірських порід і процесів.

Значний обсяг наукових праць, присвячених геомеханіці, свідчить, що головним завданням її є передбачення реакції (деформації або руйнування породи в різних масштабах), яка виникає під дією зусилля чи поштовху при проходці гірничої виробки, термічних напружень та геологічних процесів. Існують масштаби, при яких споруда не залежить суттєво від порушень і неоднорідностей. Прикладом такого явища може бути свердловина діаметром 8 1/2" в масиві з тріщинами, відстань між якими становить 3 м [1]. Все стає цілком інакше, якщо по-

The reference directions of learning of the process of corrupting of rock at different levels are reviewed and also the problems which one can arise in a scale of the array, slit, matrix and block. On the basis of the analysis of the known formulas for a rating of coefficient of lowering of hardness of breeds in the array, the new dependence for conditions of deep drilling is obtained. The formula for definition of movings on a lateral surface of the drilling slit is proposed.

рушення і неоднорідності мають один порядок з діаметром свердловини. Знову виникають всі ті ж проблеми масштабу.

При вивченні процесів руйнування гірських порід можна виділити п'ять масштабних рівнів [2]:

– субмікроскопічний, при якому під руйнуванням розуміють розрив атомних або молекулярних зв'язків;

– мікроскопічний, при якому проходить розвиток мікротріщин, площин ковзання, що призводить до руйнування окремих кристалів і зерен та розриву зв'язків між ними;

– субмакроскопічний, який має на увазі руйнування в шматку гірської породи з утвореннями окремих тріщин;

– макроскопічний, при якому руйнування розглядається в масштабі і припускає утворення макротріщин (з врахуванням дефектів масиву, викликаних геологічними чинниками);

– мегаскопічний, при якому процес руйнування розглядається для великих об'ємів гірських порід (зокрема, з великими дефектами масиву, які викликані геологічними чинниками).

З позиції механіки суцільного середовища тріщини – це поверхня поділу, на якій зазнають розриву, напружень і деформацій. Так, розви-

ток тріщин при дії напружень стиснення з порушенням суцільності середовища переводить її в напружений стан розтягу, визначаючи в подальшому лише відривний характер руйнування.

За протяжністю тріщини можна поділити на п'ять класів [3]. Тріщини 1-го класу є наслідком дефектів кристалічної ґратки і мають протяжність від $1 \cdot 10^{-9}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ м. Тріщини 2-го класу – мікротріщини, що виникають як наслідок дефектів міжкристалічного цементу. Маючи протяжність їх в межах від $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ м, мікротріщини впливають на опір порід при бурінні. Тріщини 3-го класу мають протяжність від $1 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^2$ м. Вони чинять найбільший вплив на процеси руйнування масивів гірських порід при їх виїмці, зсувах і обвалах. Тріщини 4-го класу – розриви, які є наслідком глибинних переміщень масивів гірських порід у процесі формування земної кори. Ці тріщини мають протяжність $1 \cdot 10^2$ – $1 \cdot 10^3$ м. Нарешті, тріщини 5-го класу – великі тектонічні розриви або регіональні тріщини, які є наслідком регіональних тектонічних процесів, можуть мати протяжність від $1 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^5$ м. Їх лінійні розміри перевищують розміри об'єктів, що розглядаються в процесах видобутку корисних копалин.

Таким чином, з позицій оцінки процесів руйнування гірських порід масиви гірських порід з тріщинами 1-го і 2-го класів не можна відносити до числа тріщинуватих; їх можна розглядати, як монолітні і ізотропні. Породи з тріщинами 3-го класу є тріщинуватими, причому ступінь їх тріщинуватості повинна оцінюватись в конкретному випадку. Породи з тріщинуватістю 4-го і 5-го класів представляють інтерес лише для вирішення регіональних геологічних завдань. Дослідження тріщин на різних масивах свідчать про те, що за сумарною довжиною в масиві переважають макротріщини, що і визначає необхідність пильної уваги до тріщин 3-го класу.

В роботі [1] наведена таблиця, яка характеризує основні напрямки її використання залежно від масштабного чинника. Звертає на себе увагу значна різноманітність завдань залежно від розміру конкретного об'єму породи, і це питання масштабу в геомеханіці потребує особливого коментаря. Такий підхід є необхідним, хоч і достатньо складним, оскільки потребує вибору, що базується на позбавлених кількісних оцінок якісних критеріях.

Наведений нижче приклад свідчить, наскільки важливе питання масштабу проектування в геомеханіці. При бурінні інтервалу потужністю 2-3 м була повністю виведена з ладу свердловина. Причиною аварії стала дія зовсім іншого масштабу – масштабу дуже великих блоків в сотні метрів. Із цього прикладу можна зробити висновок, що подібні ситуації спеціалісти не враховували [1].

В масштабі масиву можуть виникнути дві проблеми:

– якщо основна маса породи помітно деформується під дією напруження, колектор

може суттєво ущільнитись, а викликані переміщення можуть призвести до просідання поверхні, що може спричинити важкі наслідки, інколи небезпечні для споруд, що знаходяться на поверхні, та для інструменту на глибині;

– якщо родовище знаходиться в тріщинуватих породах, то головна турбота спеціаліста, який оцінює властивості колектора, – це дізнатися: які тріщини будуть продуктивні; як відрегує середовище, що складається із окремих блоків, під дією місцевих напружень і різноманітних варіацій тиску.

У масштабі свердловин, що перебувають в бурінні, стінки можуть змінювати свій стан під дією напружень, які можливо розрахувати. Вони здатні суттєво змінити фізико-механічні властивості порід та призвести до ускладнень при проведенні геофізичних та інших досліджень в свердловині.

В області буріння в масштабі матриці і блока одночасно виникають дві протилежні проблеми: як можна швидше і ефективніше зруйнувати породу в напрямку буріння, але при цьому не зруйнувати стінки, та як забезпечити стабільність подальшої проходки і якість досліджень свердловини. Ці два завдання здійснюються на відстані декількох міліметрів одне від одного: перше – завдання буримості, яке вирішується в масштабі матриці і визначає вибір відповідної техніки; друге – проблема стійкості стінок. Труднощі її вирішення в цьому плані можуть коштувати багатьох діб простою бурової установки чи втрати пробуреного стовбура свердловини.

У масштабі свердловин постають проблеми, пов'язані з її діаметром. Так, діаметр розвідувальної свердловини є основним показником конструкції, який визначає техніко-технологічну і економічну сторони її будівництва, а також витрати, пов'язані з проведенням процесів випробування і дослідження. Другою важливою проблемою як для розвідувальної буріння, так і експлуатаційної свердловини є їх кріплення з обсадкою чи без неї. Наведені дані свідчать про необхідність врахування масштабного чинника при будівництві та експлуатації свердловин.

Відомо, що будь-які масиви гірських порід, як правило, розбиті системами тріщин природного або штучного походження на окремі (блоки). Залежно від ступеня такої тріщинуватості суттєво змінюються властивості порід у зразках і масиві. Проведені дослідження свідчать про зниження пружнопластичних властивостей гірських порід в масиві порівняно із зразками, що є наслідком збільшення імовірності розподілу в масиві гірських порід відносно зразків різного роду тріщин і неоднорідностей, які знижують пружнопластичні властивості порід. У даній роботі зроблена спроба визначити ступінь впливу масштабного чинника на фізико-механічні характеристики гірських порід.

Для врахування впливу тріщинуватості на міцнісні властивості порід нерідко використовують так звані коефіцієнти структурного ослаблення. Ці коефіцієнти характеризують відно-

шення меж міцності тріщинуватих і монолітних порід. Межа міцності породи на стиснення в масиві визначається шляхом множення значення відповідної межі міцності цієї породи на відповідний коефіцієнт ослаблення.

У результаті експериментальних досліджень [3] встановлено, що міцнісні властивості порід визначаються перш за все їх дефектністю: зі збільшенням початкової тріщинуватості порід їх опір розтягу різко падає. Отже, початкову тріщинуватість порід, яка визначає їх дефектність і міцність, можна розглядати, як основний критерій оцінки схильності порід до руйнування.

Відповідно основним положенням статистичної теорії міцності будь-якому макроскопічному руйнуванню I роду передують руйнування II роду – утворення мікротріщин. Зі збільшенням зовнішнього навантаження при певних умовах мікротріщини починають швидко рости і утворюються макротріщини I роду. Таким чином, в оцінці процесів руйнування гірських порід необхідне використання технічних критеріїв макроскопічної стадії руйнування, однак гірські породи необхідно оцінювати з врахуванням статистичної функції розподілу в них мікротріщин ще на стадії, яка передують руйнуванню. В такій оцінці гірських порід важливу роль відіграє масштабний чинник. Відомо, що чим більший об'єм масиву, який піддається руйнуванню, і чим вища в ньому кількість дефектів, тим менші витрати енергії на його руйнування.

Доказом реалізації в гірських породах масштабного ефекту служить той факт, що зі збільшенням розмірів випробовуваних зразків знижуються також всі показники пружно-пластичних властивостей гірських порід. У зв'язку з чим для визначення міцності гірських порід в масиві потрібно міцність зразків цих порід домножити на коефіцієнт [3]

$$\beta = \frac{1}{1 + \alpha_\beta \ln \frac{a}{l}}, \quad (1)$$

де: $\frac{a}{l}$ – відношення характерного лінійного розміру об'єму, який руйнується, до середньої відстані між тріщинами в масиві;

α_β – коефіцієнт, залежний від зразку і характеру тріщинуватості порід.

Математична обробка даних гірських порід дає підстави виразити коефіцієнт α_β таким чином:

$$\alpha_\beta = 0,25\sigma_p, \quad (2)$$

де σ_p – опір порід розтягу.

За кордоном досить широке використання знайшли два методи кількісного обліку структурного порушення породного масиву: за допомогою показника RQD і методу І.Хансаги [4]. Показник RQD являє собою відношення загальної довжини L_p кусків керна більшої за

10 см до сумарної довжини кусків керна L_1 , тобто:

$$RQD = \frac{L_p}{100L_1}. \quad (3)$$

Із аналізу даного показника видно, що він не залежить ні від типу породи, ні від її міцнісних показників. Кількість представницьких кусків керна також не грає ролі.

Суть методу І.Хансаги полягає у відшукуванні деякого коефіцієнта, який визначається як середньоарифметичне двох коефіцієнтів

$$\alpha = \frac{\alpha_0 + \alpha_\kappa}{2}, \quad (4)$$

де: α_0 – коефіцієнт ослаблення зразка;

α_κ – коефіцієнт ослаблення керна.

Вони дорівнюють

$$\alpha_0 = \frac{ph}{L}, \quad \alpha_\kappa = \frac{L_1}{\kappa L}. \quad (5)$$

Кінцевий вираз для коефіцієнта структурного ослаблення запишеться у вигляді

$$\alpha = \frac{1}{2L} \left(ph + \frac{L_1}{\kappa} \right), \quad (6)$$

де: L – довжина досліджуваного інтервалу свердловини;

p – кількість зразків із кусків керна;

h – висота зразка;

L_1 – загальна довжина кусків керна;

κ – число кусків керна.

На відміну від показника RQD коефіцієнт І.Хансаги враховує кількість зразків, нижня межа яких пов'язана з діаметром і довжиною керна.

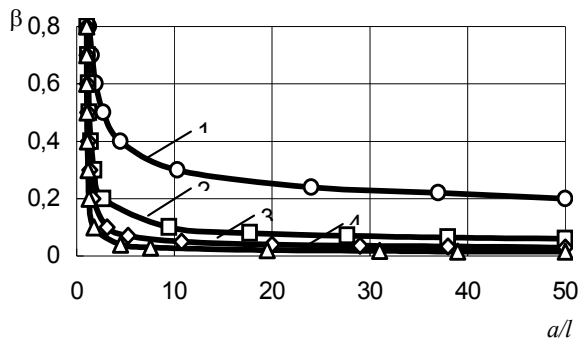
Аналіз наведених залежностей дає підстави зробити висновок, що найбільш чутливим до зміни властивостей гірських порід є коефіцієнт, представлений формулою (1). Як відомо, міцності порід на розтяг і стиснення пов'язані між собою достатньо тісним кореляційним зв'язком, який свідчить про те, що опір розтягу становить в середньому 0,1 від опору цих же порід стисненню. Це дає підстави виразити загальну міцнісну характеристику середовища як функцію коефіцієнта міцності f . Другою важливою обставиною в оцінці міцності гірських порід в масиві є її зв'язок з природною тріщинуватістю порід.

Згідно з відомою класифікацією гірських порід за тріщинуватістю, середня відстань між природними тріщинами всіх систем в масиві коливається від 1,5 до 0,1 м. Важливою обставиною є також залежність міцності гірських порід від характерного лінійного розміру блоку, який піддається руйнуванню. Після внесення відповідних змін у формулу (1) отримаємо

$$\beta = \frac{1}{1 + f \ln \frac{a}{l}}, \quad (7)$$

де f – коефіцієнт міцності.

З урахуванням наведених міркувань коефіцієнт зниження міцності гірських порід в масиві можна виразити серією кривих на графіку (рис. 1). Аналіз даних рис. 1 засвідчує, що зі збільшенням відношення характерного лінійного розміру об'єму a , який піддається руйнуванню, до середньої відстані між тріщинами l , тобто збільшення масштабності об'єму руйнування (збільшення a/l) або ступеня тріщинуватості середовища (зменшення a/l), відбувається зниження міцності гірських порід в десятки і сотні разів відносно міцності у зразку.



1 - $f = 1$; 2 - $f = 4$; 3 - $f = 8$; 4 - $f = 16$.

Рисунок 1 — Зміна коефіцієнта ослаблення міцнісних властивостей гірських порід в масиві відносно їх міцності в зразку для порід з f

У масштабі свердловини подано графік (рис. 2) зміни коефіцієнта ослаблення міцнісних властивостей порід залежно від її діаметра. Характер зміни даного коефіцієнта підтверджує можливість суттєвого зниження фізико-механічних властивостей порід, що може призвести до руйнування стінок стовбура.

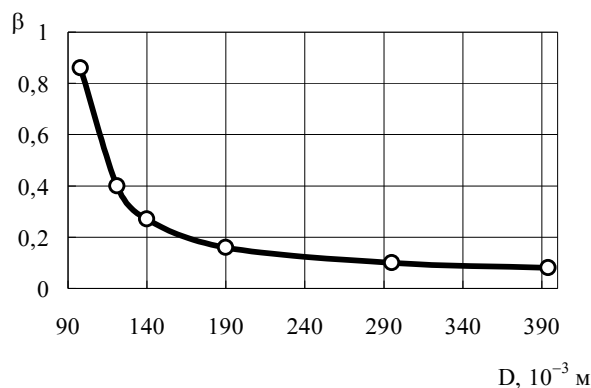


Рисунок 2 — Залежність коефіцієнта ослаблення міцності гірських порід від діаметра свердловини

Розглянемо переміщення в породі довкола стовбура і на його контурі. При цьому слід врахувати відмінні особливості свердловини – наявність технологічно необхідного при бурінні свердловин внутрішнього тиску, створюваного у вибої стовпом бурового розчину, а також існуючі у пласті співвідношення між напружен-

ням в гірській породі і пластовим тиском. Вважаємо, що напружений стан гірських порід, який складає розріз, симетричний відносно осі свердловини. Зроблені припущення дають змогу розглядати оточуючий свердловину масив гірських порід, як товстостінний циліндр.

Для визначення переміщень на бічній поверхні свердловини скористаємось формулою радіального переміщення точок циліндричної поверхні радіуса r (відкритий циліндр) [5]

$$u_r = \frac{pr_1^2}{E(r_2^2 - r_1^2)} \left[(1 - \mu)r + (1 + \mu)\frac{r_2^2}{r} \right], \quad (8)$$

де: p – гідростатичний тиск, створений вагою рідини від поверхні до глибини точки дослідження;

r_1 – радіус свердловини;

r_2 – радіус зони довкола свердловини, в якій можливі ті чи інші руйнування породи;

E – модуль Юнга;

μ – коефіцієнт Пуасона.

При $r = r_1$ отримаємо формулу для визначення збільшення радіуса свердловини, яка набуде вигляду

$$u_r = \frac{pr_1^2}{E(r_2^2 - r_1^2)} \left[(1 - \mu)r_1 + (1 + \mu)\frac{r_2^2}{r_1} \right]. \quad (9)$$

На підставі наведеної формули зроблено розрахунки, результати яких подано графіком на рис. 3, де показано залежність переміщень на бічній поверхні свердловини від її діаметра. Характер зміни кривої графіка свідчить про можливість ускладнень стовбура свердловини в результаті збільшення тангенціальних напружень в його стінках [6].

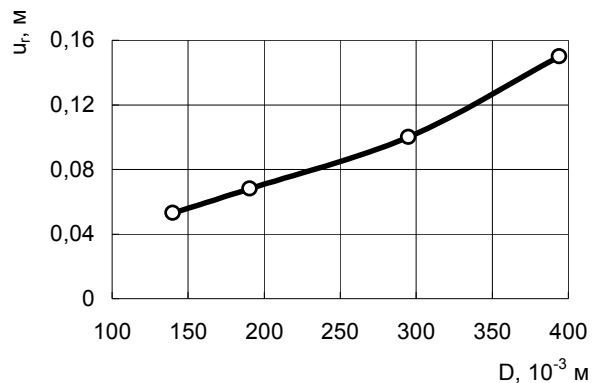


Рисунок 3 — Залежність переміщень на бічній поверхні свердловини від її діаметра

При вивченні впливу масштабного ефекту на стійкість пристовбурної зони свердловини представляє інтерес зіставлення глибин проникнення в неї фільтрату бурового розчину. Відомо, що зі збільшенням діаметра свердловини, глибина проникнення фільтрату зростає. Математична обробка експериментальних даних дала змогу отримати рівняння залежності зміни глибини проникнення фільтрату від діаметра свердловини [7]

$$\delta^2 + 2r\delta - 2rc = 0, \quad (10)$$

де: r – радіус отвору;
 $c=12,2$ – постійна величина.

Розв'язуючи рівняння (10) відносно δ , отримаємо формулу для визначення глибини проникнення фільтрату в пристовбурну зону

$$\delta_{1,2} = -r \pm \sqrt{r^2 - 24,4r}. \quad (11)$$

За даною формулою проведено розрахунки, результати яких подано у вигляді графіка (рис. 4). З отриманої графічної залежності видно, що зниження глибини проникнення фільтрату у пристовбурну зону проходить одночасно зі зниженням радіальних переміщень на бічній поверхні свердловини.

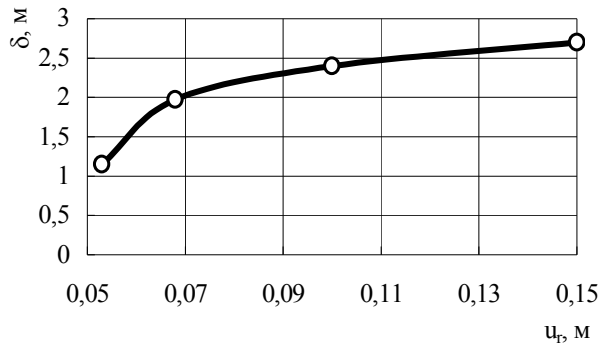
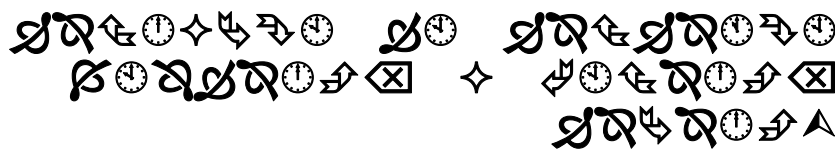


Рисунок 4 — Характер взаємозв'язку між глибиною проникнення фільтрату у пристовбурну зону і радіальними переміщеннями на бічній поверхні свердловини

Отримані результати досліджень науково обґрунтовують причини руйнування гірських порід, пов'язаних з масштабним ефектом. Практичне значення їх полягає у можливості вибору конструкції свердловини, розробки нових методів і технічних засобів для її буріння з урахуванням об'єму масиву гірських порід, який піддається руйнуванню.

Література

1. Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти: Пер. с англ. и франц. / Под ред. В.Мори и Д.Фурмен-тро. – М.: Мир, 1994. – 416 с.
2. Ершов Л.В., Либерман Л.К., Нейман И.Б. Механика горных пород. – М.: Недра, 1987. – 192 с.
3. Мосинец В.Н., Абрамов А.В. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород. – М.: Недра, 1982. – 248 с.
4. Баклашов И.В. Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве. – М.: Наука, 1973. – 224 с.
5. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Наукова думка, 1975. – 703 с.
6. Мочернюк Д.Ю. Влияние геомеханических факторов на технологию бурения глубоких нафтогазовых свердловин. – Л.: Обл. вид., 2004. – 127 с.
7. Муфидзаде В.М. К вопросу устойчивости приствольной зоны в процессе проводки скважин // Аз. нефт. хоз-во. – 1983. – №10. – С.19–21.



Редакція журналу запрошує до співпраці спеціалістів нафтогазової галузі, котрі бажають опублікувати свої матеріали.

Будемо раді допомогти Вам налагодити ділові контакти через опублікування у нашому журналі реклами продукції та розробок Вашого підприємства.

Сподіваємось, що Ви передплатите наш журнал на 2007 рік.

Наша адреса: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15
 Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
 тел. (03422) 4–20–15, 994–180
 e-mail: rozvidka@nung.edu.ua