

О.А. Пащенко, А.О. Ігнатов, О.Б. Владико, кандидати технічних наук

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»,
пр. Дмитра Яворницького, 19, 49027, м. Дніпро, Україна, e-mail: pashchenko.o.a@ntu.one*

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКОГО МАСИВУ НА ВИБОЇ СВЕРДЛОВИНИ

Мета роботи – встановлення фізичної суті явищ, що відбуваються при відділенні елементу гірської породи від масиву в умовах дії зовнішнього тиску і циркуляції активованих промивальних рідин. Останнє дозволить визначити найбільш раціональні параметри процесу руйнування гірської породи на вибої свердловини і гідравлічної програми циркуляції очисного агента, причому результатом позначеного повинне стати отримання максимальної продуктивності бурового циклу при мінімальних витратах енергії.

Комплексними лабораторними і аналітичними прийомами досліджені особливості технології руйнування порід з урахуванням впливу гідростатичного тиску, фізико-хімічних параметрів очисного агента, особливостей гідравлічної програми і властивостей гірського масиву.

Виявлені основні закономірності руйнування гірських порід при високому гідростатичному тиску безпосередньо в натурних умовах. Покладений в основу позначених досліджень метод фізичного моделювання характеризується, передусім, тим, що здійснення досліджень можливе на зразках, які забезпечують максимальну подібність процесу руйнування, при лабораторних випробуваннях, натурних свердловинних умовах. В ході експерименту створені граничні умови, відповідні цілісному масиву порід, і вони зберігаються незмінними протягом усього часу досліджень. Для вивчення фізичної картини процесу впливу гідростатичного тиску на енергоємність руйнування породи, при різних параметрах циркуляційного середовища, застосовувалися відомі закони гідродинаміки і опору матеріалів, результати досліджень інших авторів, а також дані, отримані в лабораторних і промислових умовах.

Проектування ефективних режимів руйнування гірських порід і раціональних конструкцій технічних засобів можливе тільки на основі знання характеристик міцності гірських порід, які вони мають в натурних умовах.

Отримані результати досліджень є базовими для проектування раціональної гідравлічної програми очищення свердловин в умовах дії гідростатичного тиску. Отримані експериментальні залежності, що характеризують процес руйнування гірських порід на вибої свердловини при прояві гідростатичного тиску, можуть бути покладені в основу конструювання і експлуатації інноваційного бурового інструменту.

Ключові слова: *гірська порода, свердловина, гідростатичний тиск, бурова промивальна рідина, міцність, осьове навантаження, потік, процес руйнування.*

Постановка проблеми

Без перебільшення, вельми складний виробничий цикл спорудження свердловин різного призначення складається з великої кількості трудомістких та енергоємних взаємопов'язаних основних процесів [1], таких як: руйнування гірської породи на вибої; видалення зруйнованої породи з-під торця породоруйнівного інструменту і транспортування її на поверхню; підтримка стінок свердловини в стійкому стані; спуск і підйом бурового інструменту. Ефективність здійснення кожного з названих процесів в значній мірі визначається способом і умовами реалізації руйнування гірського масиву на вибої свердловини. В свою чергу, руйнівні процеси залежать від способу і режиму циркуляції, а також властивостей бурових промивальних рідин, вибір яких визначається екологічними і технологічними вимогами до них, а також гірничо-геологічними умовами спорудження свердловин.

Є показовим те, що майже всі широко застосовувані сучасні способи руйнування гірських порід засновані, за загально фізичним визначенням, на механічному розділенні деякого об'єму твердої маси (гірської породи) на окремі елементи – частки невеликого розміру, яке відбувається під дією локальної концентрованої напруги, перевищуючої опір сил внутрішніх зв'язків [2]. Руйнівна напруга, у випадку реалізації бурових технологій, може створюватися за наявності зовнішніх сил, що виникають при зануренні в гірську породу спеціальних інструментів, які мають значно більшу твердість, аніж сама порода. Причому, в залежності від значного числа техніко-технологічних чинників, на вибої свердловини може встановитися деякий характер руйнування породи, а саме один з названих: об'ємний, поверхневий, втомний тощо.

Механічні способи руйнування передбачають багатократну силову дію відповідного інструменту, за рахунок чого в гірській породі розвивається система тріщин, твердість її знижується, і, як наслідок, періодично на вибої свердловини виникають умови для прояву об'ємного руйнування [3]. В цілому, більшість гірських порід можна віднести до розряду неоднорідних тріщинуватих крихких тіл, активний розвиток руйнівних явищ в яких починається поблизу включень і тріщин – внаслідок локальної концентрації напруги. Неможливо залишити поза увагою і те, що в сучасній практиці спорудження свердловин ведуться значні науково-дослідні роботи, спрямовані на оптимізацію вибійних руйнівних процесів та розробку нових високоефективних способів буріння; в комплексі це дозволить, з одного боку, скоротити витрати енергії і часу, а з іншого, підвищити рівень потужності, яка реалізовується на вибої.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вивчення широкого кола інформаційних джерел науково-виробничого характеру [1, 4] переконливо доводить наступне: значного розвитку отримали окремі важливі положення теорій механіки руйнування гірських порід та фізико-хімічних поверхневих явищ, зокрема, набув деяких уточнень механізм процесів, що відбуваються на межах розділу «гірська порода – промивна рідина» і «породоруйнівний інструмент – промивна рідина»; встановлено прийнятний кореляційний зв'язок між діючими факторами і властивостями гірських порід і бурового інструменту; обґрунтовано механізм впливу промивальних рідин на процес руйнування гірських порід, стійкість бурового інструменту та стійкість стінок свердловин; розроблені наукові основи прогнозування якісних і кількісних показників процесів при бурінні свердловин з урахуванням впливу промивальних рідин; теоретично обґрунтована і експериментально підтверджена необхідність врахування термодинамічного і кінетичного аспектів при прояві ефекту адсорбційного зниження міцності гірських порід; розроблені наукові підходи до конструювання бурових снарядів і породоруйнівних інструментів, які забезпечують підвищення ефективності процесів при бурінні свердловин. Також значно збільшилася кількість робіт, присвячених застосуванню водних розчинів поверхнево-активних речовин (ПАР) при бурінні свердловин [5], як одного з найбільш перспективних наукових напрямів у цій області. Встановлено, що ПАР можуть чинити істотний вплив на енергоємність процесу руйнування гірських порід, стійкість породоруйнівного інструменту, підтримання стінок свердловини, реологічні властивості дисперсних систем тощо. Разом з тим, в такій важливій справі, як створення методики вибору складів промивних рідин, іншими словами – активації останніх, та технології їх приготування і застосування, що забезпечують підвищення ефективності різних процесів при бурінні свердловин, переважає чисто емпіричний підхід.

Однак об'єктивна складність всіх перерахованих аспектів, їх взаємопроникнення, неоднозначність властивостей гірського масиву, деяка обмеженість вихідних положень неодмінно потребують проведення подальших досліджень усього комплексу тісного зв'язку між зазначеними вище обставинами, які і визначають ефективність руйнування порід [6].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Руйнування гірської породи у водному середовищі супроводжується утворенням різниці тисків на вільну і на знову утворювану поверхню. Вона залежить від величини гідростатичного тиску, швидкості відриву елемента від масиву, в'язкості рідини, її густини і багатьох інших чинників. Робота інструменту у водному середовищі потребує певних витрат енергії на переміщення зруйнованої породи і подолання гідродинамічного опору руху самого інструменту [5].

Тиск на вибої свердловини обумовлений наявністю стовпа промивальної рідини; при цьому, якщо промивальна рідина знаходиться в нерухомому стані, тиск називається гідростатичним, а якщо потік рідини знаходиться в русі, то тиск є гідродинамічним. Оскільки при бурінні свердловини циркулююча рідина повинна забезпечувати промивання свердловини, тобто переміщатися, то на вибій діятиме гідродинамічний тиск. У загальному випадку вплив тиску промивальної рідини чинить складну дію, він є комбінацією гідростатичного і гідродинамічного тисків. Деякі дослідники називають цей тиск пригноблюючим, тобто таким, що перешкоджає руйнуванню [7]. Такий термін узагальнює всі сторони негативної дії рідини у свердловині на процес буріння. Величина гідродинамічного тиску залежить від глибини свердловини, тобто гідростатичного тиску, густини промивальної рідини і надлишкового тиску, що виникає в затрубному просторі через наявність місцевих гідравлічних опорів при циркуляції промивальної рідини і, у свою чергу є залежним від напряму, швидкості і характеру потоку рідини.

У такій постановці питання нескладно побачити, що всі розробки, які стосуються вдосконалення інструментального забезпечення циклу деформування гірського масиву та обґрунтування режимно-технологічних параметрів циркуляційних процесів для бурової промивальної рідини, в обов'язковому порядку повинні узгоджуватися із вибійними умовами розвитку елементарного акту руйнування породи [8].

Нині майже відсутні методики з проектування технічних засобів і технологій проведення робіт за дії значного гідростатичного тиску, а також недостатньо досліджені процеси, що протікають при руйнуванні гірських порід в означених умовах [9]. Отже, вивчення основних деформаційних характеристик гірських порід в умовах дії гідростатичного тиску дозволить виявити чинники, що впливають на енергоємність процесу руйнування, і визначити параметри технічних засобів для проведення бурових робіт.

Мета статті – вибір і обґрунтування критеріїв ефективності циклів руйнування гірських порід в умовах дії гідростатичного тиску і застосування активованих промивальних рідин, та очищення вибою і стовбуру свердловини від зруйнованої породи, що в комплексі забезпечують вірну ідентифікацію процесу поглиблення свердловини з високою мірою продуктивності і економічності.

Обґрунтування вживання і опис вибраної авторами методики

Механічні властивості вивчених зразків гірської породи визначалися за допомогою стенду для дослідження впливу гідростатичного тиску на процес руйнування гірських порід, обладнаного: приладом УМГП-3, індикаторами, барокамерою. В процесі підготовки до проведення досліджень було проведено тарирування установки УМГП-3 за допомогою динамометра ДОСМ-3-1 в діапазоні навантажень від 0 до 10000 Н. При проведенні досліджень зразки гірських порід були випробувані в повітряному і водному середовищах при тисках до 10 МПа. При цьому вимірювалися і задавалися наступні параметри: висота відриву елемента, що відокремився; діаметр нижньої основи елемента, що відокремився; діаметр пуансона; зусилля відриву. Кількість випробовуваних зразків складала шість екземплярів для кожного виду гірської породи при проведенні досліджень в однотипному середовищі. Після визначення геометричних параметрів відокремленого елемента розраховувалися відповідні характеристики порід і енергоємність його відриву.

Дослідження особливостей реалізації гідравлічної програми виконано із застосуванням сучасних методів аналітичного аналізу й експериментальних досліджень, зокрема шляхом використання методів математичного й фізичного моделювання, методик обробки результатів досліджень у середовищі MATHCAD, контрольо-вимірювальних приладів і матеріалів [10].

Протікання циркуляційних процесів моделювалось на спеціальному лабораторному стенді, обладнаному контрольо-вимірювальним блоком (витратомір, манометр).

Виклад основного матеріалу дослідження

При виборі способу буріння гірських порід в умовах дії зовнішнього тиску, зокрема гідростатичного, одним з найважливіших є питання впливу цього тиску на фізико-механічні властивості та умови руйнування порід, а також на характер напруженого стану; неодмінно слід враховувати не лише узагальнений показник – міцність гірських порід, але і такі фізико-механічні параметри, як крихкість, пластичність, твердість, абразивність, тріщинуватість, щільність, пористість [11]. На ефективність руйнування впливає також і технологія проведення робіт: зусилля подачі інструменту, швидкість обертання (різання, дрібнення), час контакту породоруйнівного інструменту з масивом, прийоми відділення зруйнованих елементів гірської породи, значення витрат промивальної рідини та ін.

Встановлено, що кожний зі способів руйнування є ефективним в певних породах. Саме тому створення універсального робочого органу для руйнування гірських порід в широкому діапазоні їх міцності і умов залягання представляється надскладним і не вирішуваним завданням.

На руйнування витрачається енергія, причому, як правило, чим більше витрачено енергії, тим більший об'єм буде відокремлений від масиву. При будь-якому виді руйнування результати оцінюють питомими витратами енергії. Зрозуміло, з позиції енергозбереження кращим способом і оптимальним режимом створення свердловини необхідно вважати такий, який забезпечує мінімальну енергоємність. Тому, з точки зору скорочення витрат енергії, необхідно вибирати породоруйнівний інструмент і технологію руйнування так, щоб досягти мінімуму енергоємності руйнування. Останнє дає можливість врахувати вплив гідростатичного тиску на основні показники характеристик міцності гірських порід, що визначають навантаження на робочий інструмент.

Ефективність руйнування порід оберталиним способом залежатиме від властивостей гірських порід, а також від технічних і технологічних чинників. Перераховані чинники зрештою визначають умови, в яких відбуваються процеси руйнування порід, формування стовбура свердловини і керна, викривлення свердловин і інші процеси [12]. Від них також залежить вибір найбільш раціонального способу буріння свердловин, типу (конструкції) вибійного інструменту, бурового снаряда і режиму його роботи, і інші технологічні параметри і операції.

До технологічних умов спорудження свердловини належать: режим роботи вибійного інструменту, режим видалення продуктів руйнування породи зі свердловини, гідродинамічна дія потоку промивальної рідини на вибій свердловини, динамічність дії колони бурильних труб і інші чинники.

Технічні умови, що визначають ефективність руйнування порід, включають: конструкцію (типорозмір) породоруйнівного інструменту і бурового снаряда, стан вибою свердловини – насамперед міру анізотропії породи, наявність шламу, стан стінок свердловини та ін.

Отже, на процес буріння значною мірою чинять вплив параметри зовнішнього середовища, зокрема: гідростатичний тиск, густина, в'язкість рідини у свердловині, а також параметри технології буріння.

Основним енергетичним показником процесів руйнування гірських порід є питома об'ємна робота руйнування, під якою розуміється відношення витраченої в процесі руйнування енергії до об'єму зруйнованої породи. Саме величина питомої об'ємної роботи характеризує енергоємність процесів руйнування.

Вивчення впливу гідростатичного тиску на фізико-механічні властивості гірських порід здійснювали на стенді, який включає: прилад УМГП-3, барокамеру і насос для створення в ній гідростатичного тиску; його загальна схема представлена на рис. 1.

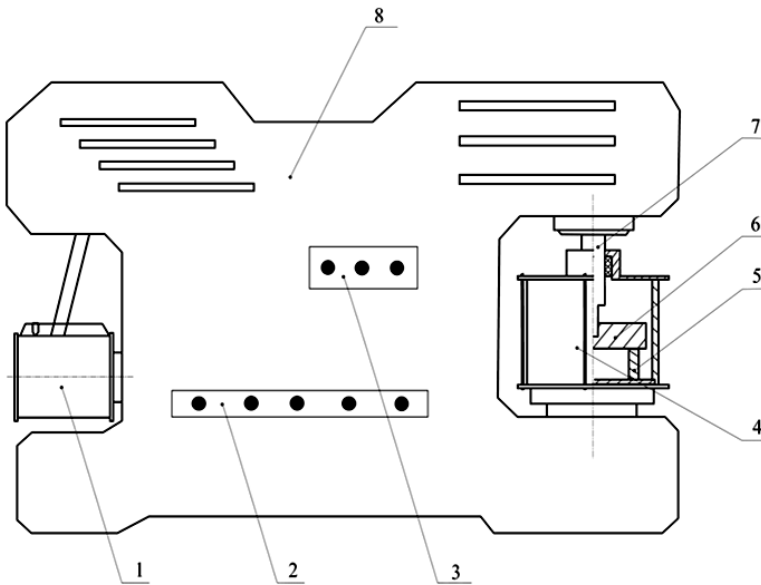


Рис. 1. Схема стенду для дослідження впливу гідростатичного тиску на процес руйнування гірських порід: 1 – барабан; 2 – перемикачі приладу УМГП-3; 3 – індикатори; 4 – барокамера; 5 – оправка; 6 – зразок гірської породи; 7 – пуансон; 8 – прилад УМГП-3

показані перерізи відірваного елемента у вертикальній площині для випробовуваних матеріалів.

Вивчення енергоємності процесу руйнування було почате з дослідження процесу руйнування в повітряному середовищі. Серія досліджень з вивчення процесів руйнування відривом елемента породи від масиву проводилася на вапняку, мрамурі і граніті. При відриві елемента від зразка породи утворюється конусоподібне поглиблення, відповідне розмірам відірваного елемента. Його діаметр по поверхні зразка є діаметром більшої основи відірваного елемента D .

На рис. 2–4

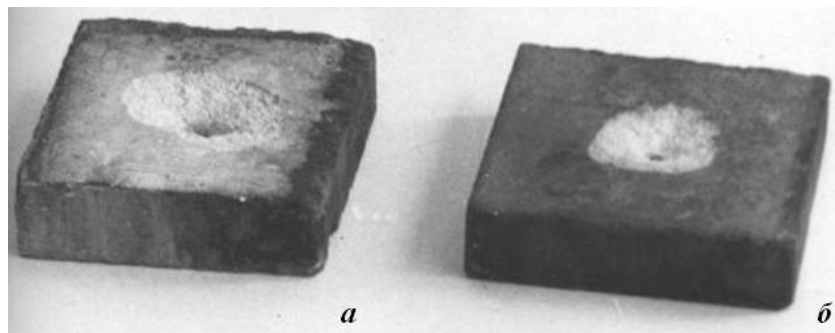


Рис. 2. Вигляд зразків вапняку після експерименту: а – повітряне середовище; б – водне середовище

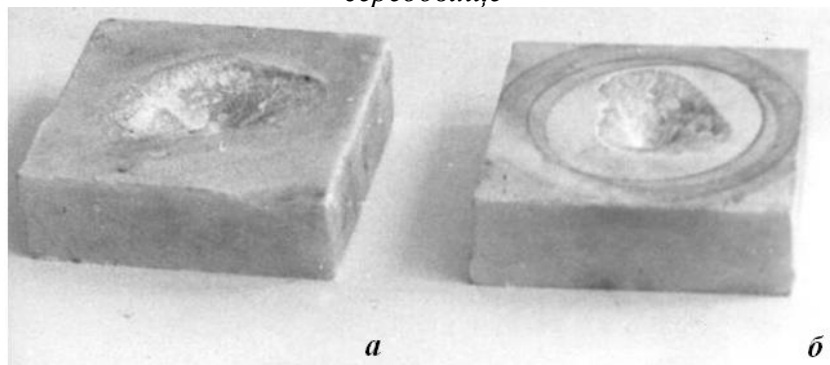


Рис. 3. Вигляд зразків мрамuru після експерименту: а – повітряне середовище; б – водне середовище

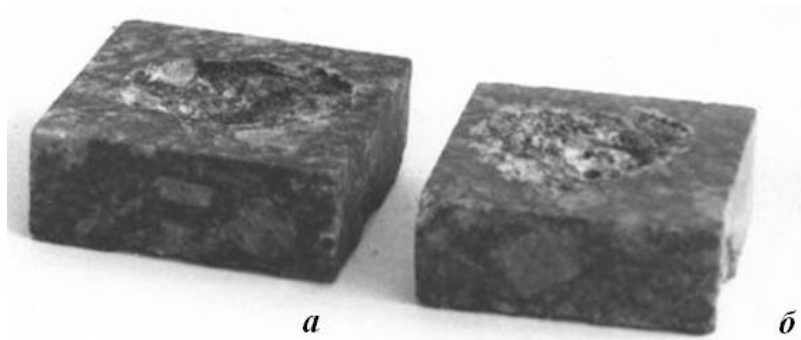


Рис. 4. Вигляд зразків граніту після експерименту:
а – повітряне середовище; б – водне середовище

Знову утворювана поверхня руйнування в середовищі повітря має неоднорідний вигляд, що, напевно, пов'язано з анізотропією матеріалу, наявністю мікроскопічних тріщин і інших дефектів. Характер кривих «навантаження – деформація» мало залежить від типу породи. Як в щільних породах (граніт, мармур), так і в пористих (вапняк) пружна деформація

практично (5 – 10% від повної) закінчується руйнуванням, не переходячи в пластичну.

При проведенні досліджень у водному середовищі перед випробуваннями зразки були витримані у водопровідній воді протягом 48 годин для попереднього насичення пор порід водою. Характер руйнування зразків такий же, як і в повітрі: відокремлений елемент має вигляд усіченого конуса з бічною поверхнею, що описується криволінійною твірною.

Енергоємність руйнування мармuru і граніту при їх руйнуванні у водному середовищі значно збільшилася в порівнянні з повітрям, за винятком вапняку, енергоємність якого збільшилася незначно, що, очевидно, пов'язано з високою пористістю (до 28%), насиченням пор останнього водою і розмоканням.

Дослідження впливу гідростатичного тиску на енергоємність руйнування гірських порід проводилися при тиску 10 МПа (рис. 5). Використані ті ж породи, що і в попередніх випробуваннях. Зростання гідростатичного тиску відбувалося протягом 1,5 годин.

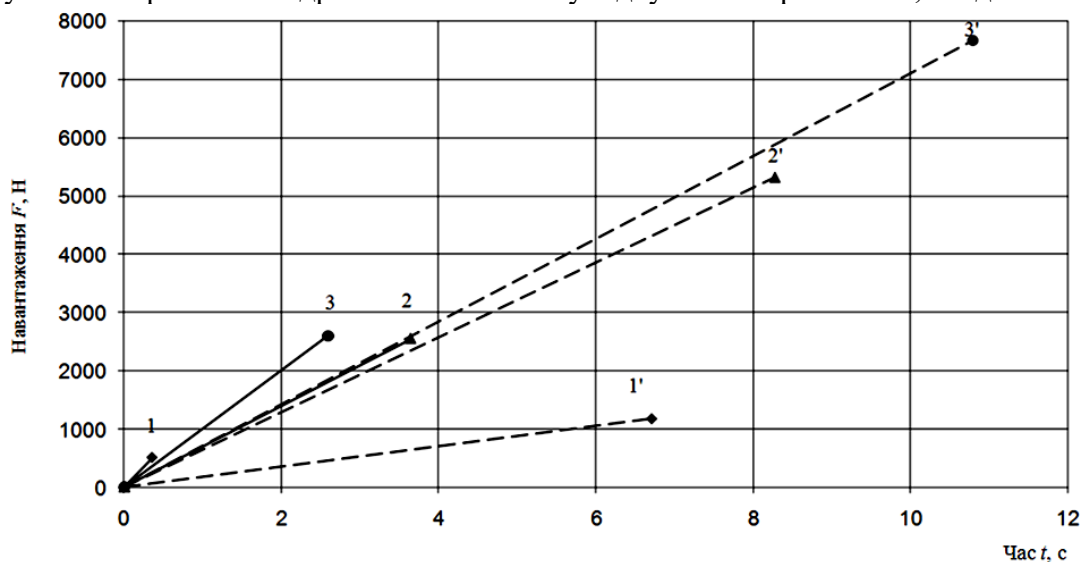


Рис. 5. Залежність величини навантаження на гірську породу від часу та гідростатичного тиску: 1, 2, 3 – вапняк, мармур, граніт відповідно (тиск 0,1 МПа); 1', 2', 3' – вапняк, мармур, граніт відповідно (тиск 40 МПа)

Як видно з даних рис. 5, швидкість навантаження залежить від пружно-пластичних властивостей зразка і параметрів зовнішнього середовища; швидкість переміщення в усіх дослідженнях залишалася постійною.

Проведення експериментів у водному середовищі при гідростатичному тиску показало, що характер руйнування гірських порід під тиском у водному середовищі змінюється мало. Відзначається зменшення нижньої основи конуса відриваного елемента. Причому, краї відокремленого під тиском елемента гірської породи мають чітко виражений обривистий характер. Відзначається більше зростання енергоємності руйнування граніту в порівнянні з вапняком і мармуром, а також розмокання цих порід.

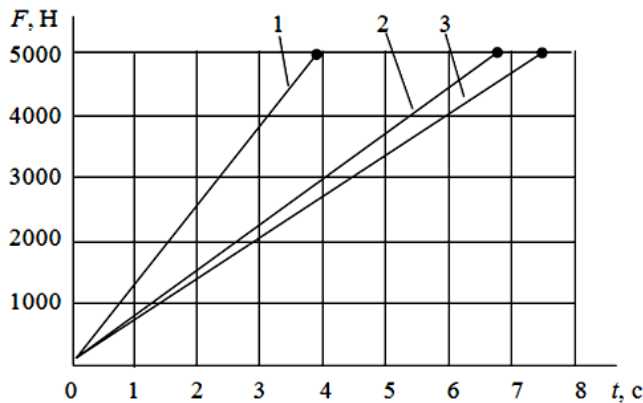


Рис. 6. Час досягнення заданого навантаження: 1, 2, 3 – у водному середовищі при тисках 0,1; 20 та 40 МПа відповідно

На рис. 6 представлено тарифувальний графік часу досягнення заданого навантаження в 5000 Н у водному середовищі за тиску 0,1; 20 та 40 МПа.

На підставі отриманих експериментальних даних розраховані енергоємність руйнування випробовуваних порід і визначений характер впливу гідростатичного тиску на параметри руйнування (рис. 7).

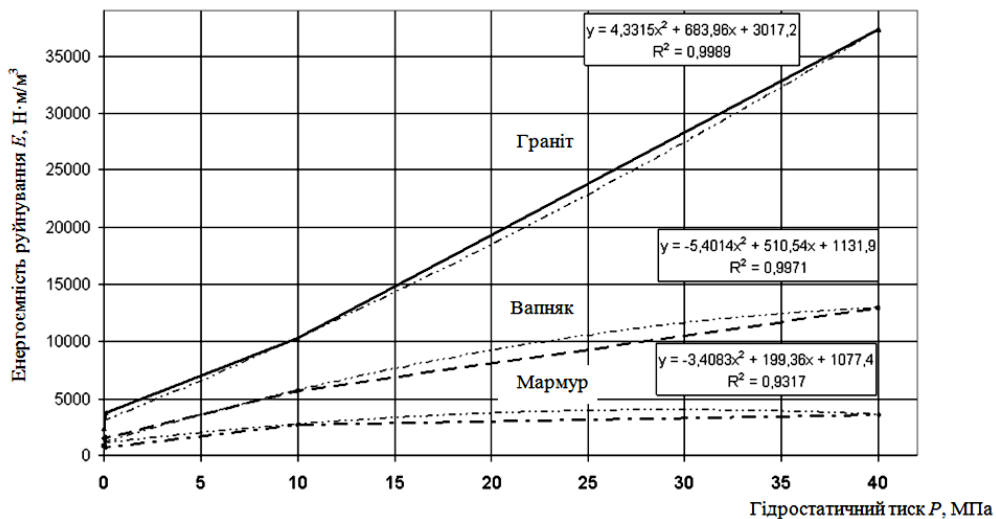


Рис. 7. Залежність енергоємності руйнування гірських порід від гідростатичного тиску при відриві елемента

Збільшення гідростатичного тиску до 10 МПа привело до збільшення енергоємності руйнування в порівнянні з 0,1 МПа: вапняку – у 4,0 рази, мармуру – 3,7 рази, граніту – 2,7 рази. Збільшення гідростатичного тиску до 40 МПа збільшило енергоємність руйнування в порівнянні з 0,1 МПа: вапняку – у 5,3 рази, мармуру – 8,3 рази, граніту – 9,9 рази. В той же час, зусилля відриву F_0 із збільшенням гідростатичного тиску до 40 МПа збільшилося для вапняку у 1,03 рази, мармуру – 2,08 рази, граніту – 3,95 рази.

Руйнування твердого тіла завжди полягає в поступовому розвитку нових поверхонь розділу з навколишнім середовищем, і величина вільної поверхневої енергії тіла, що руйнується, в основному визначає роботу поділу твердого тіла на частини – роботу диспергування як міру твердості. З іншого боку, з термодинаміки відомо, що позитивна адсорбція речовини, введеної в навколишнє середовище, тобто концентрація її молекул поблизу поверхні, завжди супроводжується відповідним зниженням вільної поверхневої

енергії [13]. Рідина, в якій відбуваються процеси деформування і руйнування твердого тіла, може активно брати участь в означених процесах, полегшуючи і прискорюючи їх. У процесах механічного руйнування твердого тіла під впливом зовнішніх зусиль, переданих тілу якимось інструментом, в деформованих шарах, прилеглих до поверхні руйнування, утворюються зони передруйнування та створюється область підвищеної тріщинуватості. Підвищенням молекулярної спорідненості промивальної рідини до поверхні твердого тіла можна значно полегшити процеси його деформування і руйнування, викликаючи розм'якшення твердого тіла в зоні пружних або пластичних деформацій, і таким чином викликати зниження твердості або міцності тіла, що деформується під впливом проникнення рідини в зону передруйнування.

Адсорбційне зниження твердості відбувається внаслідок підвищення спорідненості гірської породи і промивальної рідини. Це проявляється в інтенсивному зв'язуванні водних (гідратних) оболонок на внутрішній поверхні мікрощілин або їх устях. Утворення водних оболонок на поверхнях твердого тіла і зміна їх товщини може відбуватися при зміні концентрації позитивно або негативно заряджених іонів (іони водню H^+ та гідроксилу OH^-), які можуть адсорбуватися на поверхні твердого тіла з утворенням так званого подвійного електричного шару. Такий шар складається з двох частин: адсорбційного, пов'язаного з поверхнею, і рухомого – дифузного.

Падіння електричного потенціалу в дифузійній частині подвійного шару, тобто різниці потенціалів між нерухомим адсорбційним шаром і зовнішньою межею дифузійної оболонки, є електрокінетичним потенціалом твердої поверхні в даній рідині і характеризує її заряд. При малих концентраціях дисоційованих іонів нерухомий адсорбційний шар насичений. Підвищення концентрації іонів в рідині викликає адсорбцію їх з однойменно зарядженими іонами адсорбційного шару. При цьому відбувається перехід відповідної кількості протіонів з рідини в дифузний шар. Цей процес супроводжується збільшенням електрокінетичного потенціалу поверхні твердого тіла.

Зниження твердості гірських порід при бурінні з використанням активованої промивальної рідини пов'язано зі зниженням значення поверхневого натягу останньої. Це узгоджується з відомим явищем адсорбційного зниження міцності твердих тіл – ефектом П.А. Ребіндера [14]. При цьому енергія змочування на одиницю змоченої поверхні тим більше, чим більше фізико-хімічна спорідненість тіла до рідини. Енергія змочування і є кількісною мірою цієї спорідненості, тобто мірою здатності даної рідини насичувати вільні молекулярні сили на утворюючих поверхнях в твердому тілі.

Гірські породи є в основному полікристалічними багатокомпонентними структурами з різними фізико-механічними характеристиками. Тому взаємодія промивальної рідини з різними елементами гірської породи неоднакова. До більшого впливу схильна цементуюча складова гірських порід, до меншого – кристалічні включення, в силу своєї більш міцної структури. Цю особливість необхідно враховувати при моделюванні процесу руйнування гірської породи буровим долотом на вибої при спорудженні свердловини.

Для визначення зміни міцності гірських порід використовувався метод Шрейнера, який полягає в тому, що для досліджуваних зразків гірських порід задають площу контакту і вимірюють навантаження на індентор, під дією якого відбуваються деформування і руйнування породи. Метод вдавнення штампа дозволяє не тільки визначати твердість гірських порід, а й оцінювати їх пружні і пластичні характеристики на невеликих зразках і на кернах.

Метою лабораторних досліджень було визначення зміни значень механічних властивостей гірських порід при впливі на них активованої (у т.ч. електрохімічно) рідини.

Завдання досліджень: визначення пружних і пластичних сил деформації гірських порід при вдавлюванні індентора; встановлення значень питомої об'ємної роботи руйнування породи; визначення твердості гірських порід за штампом і її зміни при впливі на породу активованої рідини (табл. 1).

Таблиця 1. Результати випробувань структурно-механічних властивостей гірських порід на установці УМГП-3 (граніт середньозернистий)

Види досліджуваних секторів	Найбільше навантаження P_p , кН	Середнє значення P'_p , кН	Твердість за штампом $p_{ш}$, кН/мм ²	Питома об'ємна робота руйнування, A_v	
1. Необроблена поверхня (суха)	4,7; 4,86; 5,9; 3,1; 6,1; 4,4	4,84	$6,16 \cdot 10^6$	5237	108%
2. Поверхня, оброблена водопровідною водою (рН = 6,5)	5,67; 5,1; 4,45; 4,6; 5,22; 7,35	5,4	$6,88 \cdot 10^6$	4850	100%
3. Поверхня, оброблена кислотною рідиною (аноліт рН = 3)	4,42; 6,35; 4,6; 4,23; 4,95; 6,1	5,1	$6,5 \cdot 10^6$	6704	138%
4. Поверхня, оброблена лужною рідиною (католіт рН = 9)	4,8; 5,9; 3,9; 5,05; 5,4; 4,23	4,88	$6,21 \cdot 10^6$	3870	80%

Узагальнені результати експериментальних досліджень свідчать про те, що вплив кислотної складової обробленої рідини дозволяє знизити величину навантаження, при якій відбувається руйнування породи, в середньому на 7 – 8%, а вплив лужної складової – відповідно на 9 – 10%, в порівнянні з впливом необробленої рідини.

Раціональна витрата очисного агента повинна забезпечувати найкращі результати буріння за даних геолого-технічних умов [15]. Нині використовуються такі критерії для визначення мінімальної витрати промивальної рідини: величина швидкості висхідного потоку, питома витрата на одиницю діаметру долота; конкретні значення витрати для кожного типу і розміру породоруйнівного інструменту і властивостей порід. Крім того, на практиці використовують рекомендації зі швидкості висхідного потоку промивальної рідини (табл. 2).

Таблиця 2. Рекомендовані швидкості висхідного потоку

Породоруйнівний інструмент	Швидкість висхідного потоку при промиванні, м/с	
	водою або розчинами ПАР	глинистим розчином
Долота різального типу	0,6–1,0	0,6–0,8
Шарошкові долота	0,6–0,8	0,4–0,6

Швидкість винесення часток [16] $V_{ч}$ повинна забезпечити достатню чистоту кільцевого простору стовбура свердловини, яка залежить від допустимого збагачення об'єму промивальної рідини в кільцевому просторі свердловини частками твердого тіла, що у свою чергу залежить від механічної швидкості буріння. Тому цю величину слід визначати за формулою

$$V_{ч} = \frac{f_3 V_M (\rho - \rho_3)}{f_{kn} \lambda (\rho_{kn} - \rho)}, \quad (1)$$

де f_3 і f_{kn} – площі перерізу вибою і кільцевого простору між стінками свердловини і бурильними трубами відповідно; V_M – механічна швидкість буріння; λ – коефіцієнт, що враховує гвинтоподібний рух часток у висхідному потоці в процесі буріння; ρ – щільність часток зруйнованої породи; ρ_{kn} – густина промивальної рідини в кільцевому просторі.

Згідно з рекомендаціями [15], різниця густини низхідного і висхідного потоку очисного агента не повинна перевищувати 10 кг/м³ для води, а для глинистого розчину вона знаходиться в межах 20 – 30 кг/м³.

При проектуванні режиму промивання також широко використовують рекомендовані значення питомої витрати промивальної рідини на 1 мм діаметру породоруйнівного інструменту. Необхідну подачу насоса в цьому випадку визначають з наступного співвідношення

$$Q = q_n D \quad (2)$$

де q_n – питома витрата рідини на 1 мм діаметру породоруйнівного інструменту; D – діаметр породоруйнівного інструменту.

У табл. 3 приведені результати розрахунку $V_{\text{ч}}$ для свердловини одноколонної конструкції, буримої із застосуванням шарошкового долота діаметром 190,5 мм. Значення ρ приймається рівним 2500 кг/м³, густина глинистого розчину складає 1200 кг/м³.

Таблиця 3. Результати розрахунку швидкості винесення шламу для свердловини одноколонної конструкції (з промиванням водою і глинистим розчином), м/с

Тип промивальної рідини	Категорія порід за твердістю											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Вода або розчин ПАР	1,52	0,74	0,45	0,25	0,17	0,12	0,11	0,09	0,056	0,035	0,023	0,012
Глинистий розчин	0,53	0,26	0,16	0,09	0,06	0,04	0,038	0,031	0,019	0,012	0,008	0,004

Наведені в табл. 3 дані свідчать про те, що рекомендовані початкові дані для розрахунку $V_{\text{ч}}$ не відповідають практиці. Так, наприклад, при бурінні в породах VIII категорії за твердістю і промиванні водою швидкість винесення часток шламу на поверхню складає 0,09 м/с. При цій швидкості винесення шламу, за глибини свердловини 1000 м, почне поступати на поверхню тільки після трьох годин після початку буріння. Розрахункова швидкість винесення часток шламу знижується із зростанням категорії породи за твердістю. Значення $V_{\text{ч}}$ при бурінні з промиванням водою дещо вищі, ніж при промиванні глинистим розчином. Таким чином, для забезпечення якісних умов очищення забою свердловини, і особливо у разі підвищеного ступеня шламоутворення (це явище спостерігається при бурінні схильних до осипів порід), продуктивність насосів необхідно визначати виключно за умов дотримання необхідних висхідних швидкостей потоку промивальної рідини.

Висновки

1. Отримані в процесі експериментальних досліджень дані дозволяють перейти до математичного моделювання – дослідження диференціального рівняння, що описує процес руйнування гірської породи в умовах дії зовнішнього середовища і значних гідростатичних тисків; математичне моделювання має на меті перенесення результатів одиничних експериментів на цілий ряд процесів, які супроводжують цикл руйнування гірських порід механічним способом.

2. Встановлення фізичної суті явищ, що відбуваються при відділенні елементу гірської породи від масиву в умовах дії зовнішнього тиску, дозволяє визначити найбільш раціональні параметри руйнування гірської породи на вибої свердловини, тобто максимальну продуктивність при мінімальних витратах енергії; проектування ефективних режимів

руйнування гірських порід і раціональних конструкцій технічних засобів можливо тільки на основі знання характеристик міцності гірських порід, які вони мають в натурних умовах.

3. Детальним аналізом конкретних робіт і досліджень показана перспективність вивчення ролі дисперсних систем на водній основі, як фактору інтенсифікації циклу руйнування і, в багатьох випадках, безпосередніх визначальних учасників процесів позитивної трансформації значень міцності і терміну служби матеріалів; у зв'язку із зазначеним, особливий інтерес представляють існуючі гіпотетичні пояснення і моделі впливу робочих середовищ на водній основі на процес руйнування і міцність твердих тіл.

4. Підняті і досліджені в статті питання: впливу параметрів гідравлічної програми і властивостей очисного агента на вибійні процеси руйнування порід, взаємозв'язку між фізико-геометричними характеристиками продуктів руйнування і циркуляційними процесами на вибої і в стовбурі свердловини – повинні продовжуватися в напрямку уніфікації техніко-технологічного супроводжування бурового циклу для всього різноманіття геолого-технічних факторів споруджування свердловин різного призначення.

О.А. Pashchenko, А.О. Ihnatov, О.В. Vladyko

Dnipro University of Technology

SOME FEATURES OF ROCK DESTRUCTION AT THE BOTTOM OF THE WELL

Purpose of the work was establishment of the physical nature of the phenomena occurring during the separation of a rock element from the massif under the action of external pressure and circulation of activated flushing fluids. The latter will make it possible to determine the most rational parameters of the process of destruction of rocks at the bottom of the well and the hydraulic program of circulation of the cleaning agent, and the result of this should be obtaining the maximum productivity of the drilling cycle with minimum energy consumption.

Complex laboratory and analytical techniques were used to study the features of rock destruction technology, taking into account the influence of hydrostatic pressure, physicochemical parameters of the cleaning agent, features of the hydraulic program and properties of the rock mass.

The main regularities of the destruction of rocks at high hydrostatic pressure are revealed directly in natural conditions. The method of physical modeling, which is the basis for the indicated studies, is characterized, first of all, by the fact that research is possible on samples that provide the maximum similarity of the destruction process, during laboratory tests, in full-scale well conditions. In the course of the experiment, boundary conditions were created that correspond to an integral rock mass, and they remain unchanged during the entire study period. To study the physical picture of the process of the influence of hydrostatic pressure on the energy intensity of rock destruction, with various parameters of the circulating medium, the well-known laws of hydrodynamics and resistance of materials, the results of experiments by other researchers, as well as data obtained in laboratory and industrial conditions were used.

Designing effective modes of destruction of rocks and rational structures of technical means are possible only on the basis of knowledge of the strength characteristics of rocks that they have in natural conditions.

The obtained research results are basic for the design of a rational hydraulic well cleaning program under the conditions of the action of hydrostatic pressure. The obtained experimental dependences characterizing the process of destruction of rocks at the bottom of the well with the manifestation of hydrostatic pressure can be used as the basis for the design and operation of an innovative drilling tool.

Key words: *rock, well, hydrostatic pressure, drilling fluid, strength, axial load, flow, fracture process.*

А.А. Пащенко, А.А. Игнатов, А.Б. Владыко

Национальный технический университет «Днепропетровская политехника»

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОГО МАССИВА НА ЗАБОЕ СКВАЖИНЫ

Цель работы – установление физической сущности явлений, происходящих при отделении элемента горной породы от массива в условиях действия внешнего давления и циркуляции активированных промывочных жидкостей. Последнее позволит определить наиболее рациональные параметры процесса разрушения горной породы на забое скважины и гидравлической программы циркуляции очистного агента, причем результатом обозначенного должно стать получение максимальной производительности бурового цикла при минимальных затратах энергии.

Комплексными лабораторными и аналитическими приемами исследованы особенности технологии разрушения пород с учетом влияния гидростатического давления, физико-химических параметров очистного агента, особенностей гидравлической программы и свойств горного массива.

Выявлены основные закономерности разрушения горных пород при высоком гидростатическом давлении непосредственно в натуральных условиях. Положенный в основу обозначенных исследований метод физического моделирования характеризуется, прежде всего, тем, что осуществление исследований возможно на образцах, обеспечивающих максимальное подобие процесса разрушения, при лабораторных испытаниях, натурным скважинным условиям. В ходе эксперимента созданы граничные условия, соответствующие целостному массиву пород, и они сохраняются неизменными в течение всего времени исследований. Для изучения физической картины процесса влияния гидростатического давления на энергоемкость разрушения породы, при различных параметрах циркуляционной среды, применялись известные законы гидродинамики и сопротивления материалов, результаты опытов других исследователей, а также данные, полученные в лабораторных и промышленных условиях.

Проектирование эффективных режимов разрушения горных пород и рациональных конструкций технических средств возможно только на основе знания прочностных характеристик горных пород, которые они имеют в натуральных условиях.

Полученные результаты исследований являются базовыми для проектирования рациональной гидравлической программы очистки скважин в условиях действия гидростатического давления. Полученные экспериментальные зависимости, характеризующие процесс разрушения горных пород на забое скважины при проявлении гидростатического давления, могут быть положены в основу конструирования и эксплуатации инновационного бурового инструмента.

Ключевые слова: горная порода, скважина, гидростатическое давление, буровая промывочная жидкость, прочность, осевая нагрузка, поток, процесс разрушения.

Література

1. Войтенко В., Вітрик В. Технологія і техніка буріння. – Київ: Центр Європи, 2012. – 708 с.
2. Калинин А. Г., Ошкордин О.В, Питерский В.М. Разведочное бурение. – Москва: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 748 с.
3. Ihnatov A.O., Koroviaka, Ye.A., Pinka, J., Rastsvietaiev V.O., Dmytruk O. O. Geological and mining-engineering peculiarities of implementation of hydromechanical drilling principles // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.– 2021. – V. 1. – P. 11–18.
4. Hossain M.E. Fundamentals of drilling engineering. – Wiley & Sons, Incorporated, John, 2016. – 736 p.
5. Давиденко А.Н., Ратов Б.Т., Пащенко А.А., Игнатов А.А. Влияние гидростатического давления на ударное абразивно-механическое бурение скважин. – Алматы: Каспийский общественный университет, 2018. – 171 с.

6. Lopez J.C., Lopez J. E., Javier F. Drilling and blasting of rocks. – CRC Press Taylor & Francis, 2017. – 408 p.
7. Azar J.J., Robello S.G. Drilling Engineering. – PennWell Books, 2007. – 486 p.
8. Давиденко А.Н., Игнатов А.А. Абразивно-механическое ударное бурение скважин. – Днепропетровськ: Держ. вищ. навч. закл. «Нац. гірн. ун-т», 2013. – 110 с.
9. Давиденко А.Н., Дудля Н.А., Хоменко В.Л., Пашченко А.А. Разрушение горных пород планетарными долотами в условиях действия гидростатического давления – Днепропетровськ: Держ. вищ. навч. закл. «Нац. гірн. ун-т», 2010. – 196 с.
10. Curry G.L., Feldman R.M. Manufacturing systems. Modeling and analysis. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. – 338 p.
11. Hossain M.E. Fundamentals of drilling engineering. – Wiley & Sons, Incorporated, John, 2016. – 736 p.
12. Вирвінський П.П., Кузін Ю.Л., Хоменко В.Л. Геологорозвідувальна справа і техніка безпеки. – Днепропетровськ: Держ. вищ. навч. закл. «Нац. гірн. ун-т», 2010. – 368 с.
13. Sharma, K.K., & Sharma L.K. A textbook of physical chemistry. – Vikas Publishing, 2016. – 880 p.
14. Давиденко А.Н., Игнатов А.А., Полищук П.П. Транспортировка продуктов разрушения при бурении скважин. – Д.: Держ. вищ. навч. закл. «Нац. гірн. ун-т», 2016. – 116 с.
15. Давиденко А.Н., Игнатов А.А. Прямая и обратная схемы очистки при бурении скважин. – Д.: Держ. вищ. навч. закл. «Нац. гірн. ун-т», 2012. – 101 с.
16. Гукасов Н.А., Кочиев А.М. Гидравлика в разведочном бурении. – Москва: Недра, 1991. – 237 с.

Надійшла 16.07.21

References

1. Voitenko, V., & Vitryk, V. (2012). *Tekhnolohiia i tekhnika burinnia [Technology and technique of the drilling]*. – Kyiv: Tsentr Yevropy [in Ukrainian].
2. Kalinin, A.G, Oshkordin, O.V, Piterskiy, V.M. (2000). *Razvedochnoe burenie [Prospecting drilling]*. – Moscow: ООО “Nedra-Biznestsentr” [in Russian].
3. Ihnatov, A.O., Koroviaka, Ye.A., Pinka, J., et al. (2021). Geological and mining-engineering peculiarities of implementation of hydromechanical drilling principles. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 11 – 18.
4. Hossain, M.E. (2016). *Fundamentals of drilling engineering*. Wiley & Sons, Incorporated, John.
5. Davydenko, A.N., Ratov, B.T., Pashchenko, A.A. et al. (2018). *Vliianie hidrostاتического davleniia na udarnoe abrazivno-mekhanicheskoe burenie skvazhin [Influence of hydrostatical pressure on percussion abrasive mechanical well drilling]*. – Almaty: Kaspiyskiy obschestvennyi universitet [in Russian].
6. Lopez, J.C., Lopez, J. E., & Javier, F. (2017). *Drilling and blasting of rocks*. CRC Press Taylor & Francis [in English].
7. Azar, J.J., & Robello, S.G. (2007). *Drilling Engineering*. PennWell Books [in English].
8. Davidenko, A.N., & Inatov, A.A. (2013). *Abrazivno-mekhanicheskoe udarnoe burenie skvazhin [Abrasive mechanical percussion well drilling]*. – Dnipropetrovsk: Derzh. visch. navch. zakl. «Nats. girn. un-t» [in Russian].
9. Davydenko, A.N., Dudlia, N.A., Khomenko, V.L. et al. (2010). *Razrushenie gornykh porod planetarnymi dolotami v usloviyakh deistviia hidrostaticeskoho davleniia [Destruction of rocks by planetary bits under the action of hydrostatic pressure]*. DnIpropetrovsk: Derzh. visch. navch. zakl. «Nats. girn. un-t» [in Russian].

10. Curry, G.L. & Feldman, R.M. (2012). *Manufacturing systems. Modeling and analysis*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
11. Hossain, M.E. (2016). *Fundamentals of drilling engineering*. Wiley & Sons, Incorporated, John.
12. Vyrvynskyi, P.P., Kuzin, Yu.L., & Khomenko V.L. (2010). *Heolohorozvidualna sprava i tekhnika bezpeky [Geological prospecting business and safety engineering]*. Dnipropetrovsk: Derzh. vyshch. navch. zakl. «Nats. hirn. un-t» [in Ukrainian].
13. Sharma, K.K., & Sharma L.K. (2016). *A textbook of physical chemistry*. Vikas Publishing.
14. Davydenko, A.N., Ihnatov A.A., & Polyshchuk, P.P. (2016). *Transportirovka produktov razrusheniia pri burenii skvazhin [Transporting of rock destruction at well drilling]*. Dnipropetrovsk: Derzh. vyshch. navch. zakl. «Nats. hirn. un-t» [in Russian].
15. Davydenko, A.N., & Ihnatov, A.A. (2012). *Priamaia i obratnaia shemy ochistki pri burenii skvazhin [Direct and reverse cleaning schemes at well drilling]*. Dnipropetrovsk: Derzh. vyshch. navch. zakl. «Nats. hirn. un-t» [in Russian].
16. Gukasov, N.A., & Kochiev, A.M. (1991). *Gidravlika v razvedochnom burenii [A hydraulics in the prospecting drilling]*. – Moscow: Nedra [in Russian].

УДК 622.24.051

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-134-138

В.В. Квач, інженер

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2,
04047, М. Київ, e-mail: apz146@gmail.com*

ЕТАПИ РОЗВИТКУ КОНСТРУКЦІЙ ДОЛІТ ІНМ ДЛЯ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН НА НАФТУ І ГАЗ

Представлені етапи розробки і промислові випробування бурових доліт, армованих надтвердим композиційним алмазозносним матеріалом (НКАМ) «Славутич». Розроблено бурове шаришкове долото з твердосплавними опорами ковзання і варіанти доліт з герметизованою опорою. Проведено буріння на свердловині. Розроблено долото ІНМ-188 МС, з цільнофрезерованим корпусом, і прийшла раціпропозиція зі зміненою схемою розташування породоруйнівних вставок з НКАМ. Були побудовані і проаналізовані дві схеми розташування вставок по відношенню до коефіцієнта перекриття для м'яких і середніх порід. Порівнювалися схеми по відношенню до лінії різання вставок з НКАМ за сумою алмазовмісту їх в частині ΣL_a до довжини до всієї лінії різання ΣL_r . Кількість займаної площі породоруйнівних вставок до повної ріжучої площі корпусу для доліт ІНМ становила $K_o=0,1\div 0,68$. Проведено випробування колонковими долотами ІНМ-132/52с для буріння Кольської свердловини СГ-3 по твердих породах. При бурінні твердих порід розроблено долото ІСМ-214,3т з максимальним оснащенням вставками НКАМ, яке знайшло застосування в кущовому бурінні в Тюменському регіоні. В ІНМ АН України були розроблені бурголовки, зарізні долота, фрезери, розширювачі. Для буріння твердих порід і підвищення ефективності розроблені долота з АТП і з АТП з CVD-алмазом (SU-CVD алмаз), що відзначаються більш високою твердістю.

Ключові слова: *долото, колонкове долото, алмазозносний матеріал НКАМ, типи доліт, зарізне долото, фрезер, розширювач, АТП, CVD-алмаз, SU-CVD алмаз, SV-CVD алмаз.*

В СРСР випускалися два типи алмазних доліт: $\varnothing 188$ мм та $\varnothing 212$ мм. Проводилось патентне опрацювання по алмазним і шарошечним долотам США та інших країн, включаючи