

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОБОТИ СУЧАСНИХ СВЕРДЛОВИННИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ АБРАЗИВНО-МЕХАНІЧНОГО УДАРНОГО БУРІННЯ

A. Ihnatov¹, <https://orcid.org/0000-0002-7653-125X>

I. Askerov¹, <https://orcid.org/0000-0002-8398-0205>

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

DESIGN AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF THE OPERATION OF MODERN DOWNHOLE DEVICES FOR ABRASIVE-MECHANICAL PERCUSSION DRILLING

Мета. Аналіз конструктивних і технологічних особливостей пристроїв абразивно-механічного ударного буріння та обґрунтування підвищення ефективності руйнування гірських порід шляхом оптимізації режимних параметрів роботи вибійних пристроїв ГПБ - 1Т, ГПБ - 1В, ГПБ - 1ГУ, ГПБ - 1ПУ.

Методика дослідження. Використано системний аналіз технічних рішень, інженерне узагальнення конструктивних схем і експериментальні дослідження процесу руйнування порід у модельних свердловинах. Сформовано узагальнену модель руйнування породи, що враховує поєднання кулеструминного, абразивного, механічного та ударно-обертального впливів. Узагальнено принципи визначення режимних параметрів роботи: витрати робочого середовища Q , швидкості руху куль v_k , їх діаметра d_k , кількості куль M , частоти обертання механічного органу n , осьового навантаження C , а також частоти f і енергії E ударів.

Результати дослідження. Встановлено закономірності розвитку конструкцій від кулеструминних схем (ГПБ - 1Т) до абразивно-обертальних (ГПБ - 1В) та ударно-обертальних (ГПБ - 1ГУ, ГПБ - 1ПУ). Експериментально визначено раціональну кількість породоруйнівних куль $M = 35 - 45$, за якої досягається максимальна інтенсивність руйнування. Показано, що збільшення частоти обертання до $n = 225 - 370$ хв⁻¹ та осьового навантаження до $C = 2 - 4$ Н/мм² підвищує швидкість поглиблення вибою. Для ударних моделей встановлено раціональний режим роботи $f = 5 - 7$ Гц.

Наукова новизна. Набули подальшого розвитку принципи комбінованого кулеструминного, абразивного та ударно-обертального руйнування порід із встановленням впливу параметрів M , n , C , f на інтенсивність руйнування у привибійній зоні. Визначено їх раціональні значення для досліджуваних умов ($M \approx 40$; $n \approx 300$ хв⁻¹; $C \approx 3$ Н/мм²; $f \approx 6$ Гц) та підходи до ефективного узгодження режимів роботи запропонованих пристроїв.

Практичне значення. Отримані результати дозволяють обґрунтувати раціональні режими роботи пристроїв ГПБ - 1Т, ГПБ - 1В, ГПБ - 1ГУ, ГПБ - 1ПУ та підвищити ефективність буріння свердловин у різних гірничо-геологічних умовах.

Ключові слова: буріння, гідроударник, кулеструминне буріння, ударно-обертальний спосіб, породоруйнівні кулі, вибійний пристрій, свердловина, режимні параметри.

Вступ. Буріння свердловин різного промислового призначення є критичною технологічною операцією у процесі розвідки та розробки покладів вуглеводнів, мінеральних ресурсів та інших корисних копалин, а також у створенні інженерно-геологічних об'єктів для будівництва та наукових досліджень [1]. Саме процес буріння свердловин дозволяє розкрити продуктивні горизонти та геологічні структури, розташовані на великих глибинах, що є ключовим фактором ефективного освоєння ресурсів [2].

Технологічний процес буріння включає ряд взаємопов'язаних операцій, головними з яких є: руйнування гірської породи на вибої свердловини за допомогою певного типу бурового інструменту [3], транспортування продуктів руйнування на поверхню та контроль гідродинамічних параметрів циркуляції очисного агента, а також стабілізація стінок свердловини [4]. Ефективність виконання перерахованих операцій визначає швидкість проходки, техніко-економічні показники буріння та надійність експлуатації свердловини [5].

Руйнування гірської породи на вибої здійснюється буровим інструментом, конструкція якого обирається залежно від фізико-механічних властивостей порід, глибини буріння, геологічних умов та прийнятої технології проведення бурових робіт [6]. Найпоширенішими є долота ріжучого типу, а також шарошкові та алмазні, які забезпечують різні механізми руйнування порід – різання, дроблення, стирання або їх комбінацію [7]. В процесі роботи буровий інструмент передає на вибій осьове навантаження та крутний момент, що створює відповідні умови для ефективного руйнування породи [8].

Важливим елементом технологічного процесу буріння є забезпечення безперервного видалення продуктів руйнування гірської породи з вибою свердловини, що сприяє ефективному поглибленню свердловини та запобігає повторному подрібненню вже вибуреної породи [9]. Для цього використовується система циркуляції бурового розчину, а також інших очисних агентів, які безперервно транспортують буровий шлам по затрубному простору на поверхню [10]. Одночасно буровий розчин або інший тип очисного агента виконує низку важливих функцій, зокрема забезпечує охолодження та змащування бурового інструменту, зменшує тертя у свердловині, а також стабілізує її стінки, запобігаючи обвалам і втратам циркуляції шляхом утворення фільтраційної кірки на контакті з гірською породою [11]. Контроль гідродинамічних (аеродинамічних) параметрів циркуляції очисного агента передбачає регулювання швидкості руху бурового розчину (газоподібного агента), витрати, тиску та реологічних властивостей у системі циркуляції [12]. Очисний агент подається насосами (компресорами) через бурильну колону до вибою свердловини, де захоплює частинки зруйнованої породи та транспортує їх на поверхню через затрубний простір свердловини [13]. Для ефективного очищення вибою швидкість потоку повинна бути достатньою для підняття частинок бурового шламу, але водночас не надто великою, щоб не викликати ерозію стінок свердловини або втрати циркуляції у проникних пластах [14].

Стабілізація стінок свердловини полягає у створенні умов, за яких гірські породи, що формують стінки свердловини, зберігають свою цілісність і не руйнуються під дією механічних або гідродинамічних навантажень [15].

Під час буріння природна рівновага гірських порід порушується, оскільки видаляється частина породи, що може спричинити обвали та осипання стовбура свердловини [16]. Для запобігання таким явищам застосовують бурові розчини з певними фізико-хімічними властивостями; вони створюють гідростатичний тиск на стінки свердловини, який компенсує пластовий тиск і перешкоджає обваленню порід [17]. Крім того, частинки твердої фази бурового розчину утворюють на стінках свердловини тонку фільтраційну кірку, яка зміцнює їх і зменшує проникнення рідини в пористі пласти [18].

Відтак, процес буріння є складною системою взаємопов'язаних операцій, серед яких ключове місце займає процес руйнування гірської породи.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Постійне вдосконалення технологій буріння та раціоналізація взаємодії бурового інструменту з гірською породою є важливими завданнями сучасної науки і промисловості [19]. Підвищення ефективності процесу руйнування гірських порід на вибої свердловини є одним із ключових напрямів удосконалення сучасних технологій буріння [20]. Водночас процес буріння свердловин супроводжується рядом технічних і технологічних проблем, серед яких особливе місце займають зниження механічної швидкості буріння, інтенсивне зношування бурового інструменту, значні енергетичні витрати, а також виникнення ускладнень, пов'язаних із нестійкістю стінок стовбура свердловини та недостатньо ефективним видаленням продуктів руйнування гірської породи з вибою [21]. В складних гірничо-геологічних умовах перелічені фактори можуть суттєво знижувати ефективність бурових робіт і призводити до збільшення тривалості та вартості спорудження свердловин [22]. Існуючі натеper технічні рішення не завжди забезпечують раціональну передачу механічної енергії від бурового інструменту до гірського масиву, особливо в умовах значної неоднорідності фізико-механічних властивостей порід, що призводить до істотного зниження швидкості проходки, підвищеного зношування породоруйнівного інструменту та збільшення енергетичних витрат [23]. Крім того, недостатньо дослідженими залишаються питання інтенсифікації процесів руйнування породи шляхом застосування спеціальних технічних пристроїв і допоміжних засобів, які дозволяють змінювати характер навантаження на вибій або створювати додаткові фізичні (або інші) впливи на породу [24].

Таким чином, найбільш нагальним завданням сучасної бурової справи є систематичний пошук, наукове обґрунтування та експериментальне дослідження новітніх технічних рішень, а також ефективних способів руйнування гірських порід, які спрямовані на суттєве підвищення інтенсивності та продуктивності процесу буріння [25]. Реалізація таких заходів дозволить не лише збільшити швидкість проходки свердловини та знизити енергетичні витрати, а й оптимізувати роботу породоруйнівного інструменту, зменшити його зношування та підвищити надійність і ефективність бурового процесу.

Мета статті полягає в аналізі конструктивних і технологічних особливостей пристроїв абразивно-механічного ударного буріння та обґрунтування підвищення ефективності руйнування гірських порід шляхом оптимізації режимних параметрів роботи вибійних пристроїв.

Обґрунтування вживання і опис вибраної автором методики. Дослідження ґрунтувалися на системному аналізі науково-технічних рішень у галузі кулеструмінного та абразивно-механічного буріння, інженерному узагальненні конструктивних особливостей вибійних пристроїв та експериментальному дослідженні процесів руйнування гірських порід у привибійній зоні свердловини [26]. На першому етапі виконано аналіз відомих конструкцій пристроїв абразивно-механічного ударного буріння, що дозволило визначити особливості та напрями розвитку моделей ГПБ - 1Т, ГПБ - 1В, ГПБ - 1ГУ та ГПБ - 1ПУ, а також основні механізми руйнування породи. На другому етапі сформовано узагальнену модель процесу руйнування породи в привибійній зоні, що базується на поєднанні кулеструмінного, абразивного, механічного та ударного впливів. На третьому етапі узагальнено підходи до визначення основних режимних параметрів роботи пристроїв, зокрема витрати робочого середовища Q , швидкості руху породоруйнівних куль v_k , їх діаметра d_k , кількості куль у привибійній зоні M , частоти обертання механічного породоруйнівного органу n , величини осьового навантаження на вибій C , а також характеристик ударного механізму – частоти ударів f та енергії удару E . Увагу також приділено визначенню раціональної кількості куль M , що забезпечує найбільшу інтенсивність руйнування породи та стабільність циркуляції куль у потоці робочого середовища. На завершальному етапі виконано експериментальні дослідження, в ході яких проаналізовано вплив параметрів M , n , C та f на швидкість поглиблення вибою.

Виклад основного матеріалу дослідження. Ефективне руйнування гірських порід на вибої свердловини є одним із ключових факторів високої продуктивності бурових робіт. Сучасна бурова практика вимагає застосування різноманітних методів впливу на гірський масив, що дозволяють адаптувати технологічний процес до фізико-механічних властивостей порід і специфіки геологічного середовища. Розробка та впровадження таких методів спрямовані на підвищення швидкості проходки, оптимізацію енергетичних витрат і забезпечення стабільності процесу буріння навіть у складних умовах [19].

Традиційні механічні методи буріння обмежуються застосуванням статичного навантаження на буровий інструмент і обертанням коронок або доліт, що в умовах високої міцності гірських порід відрізняється зниженими швидкостями поглиблення [14]. Крім традиційних механічних методів, у сучасній буровій практиці застосовують інноваційні технології руйнування породи, що поєднують різні фізико-механічні ефекти. Одним із таких прикладів є кулеструмінне буріння, при якому енергія великої кількості сталевих або тврдосплавних куль, розігнаних потоком робочої рідини в спеціальних пристроях, забезпечує інтенсивне руйнування гірського масиву на вибої свердловини. Цей метод дозволяє ефективно видаляти продукти руйнування, зменшувати механічне навантаження на буровий інструмент та підвищувати продуктивність процесу поглиблення свердловин.

Характерною особливістю кулеструминного буріння є те [24], що вибій свердловини при ньому набуває вогнутої, криволінійної форми. Вказане обумовлено тим, що кулі, викинуті з апарата, рухаються у різних напрямках і під різними кутами зустрічають поверхню вибою, а це спричиняє нерівномірне руйнування породи. Крім того, зіткнення куль між собою викликає рикошет, який додатково впливає на форму вибою. Такий хаотичний характер руху куль є типовим і визначає особливості процесу руйнування гірського масиву. Сформульовані технічні та технологічні обмеження стали безпосереднім поштовхом до розробки низки інноваційних рішень.

До загальних рис всіх конструкцій пристроїв кулеструминного буріння можна віднести (табл. 1): комбінований абразивно-механічний принцип руйнування породи (в усіх пристроях використовується поєднання ударного та обертального механізму, а також абразивний вплив куль або уламків породи); порядок формування периферійної зони вибою (мета кожного пристрою – ефективне руйнування криволінійних або параболічних частин вибою із забезпеченням прямокутного профілю свердловини); наявність рухливих породоруйнівних елементів (усі пристрої включають кулі або їх уламки разом з продуктами руйнування гірського масиву, що активно взаємодіють із породою і виконують абразивну функцію); вибійну систему приводу робочого органу (кожен пристрій має механізм, який забезпечує обертання або циклічні удари).

Відповідно до відомостей, наведених у табл. 1, можна зазначити, всі моделі мають спільну базову конструкцію, що включає корпус пристрою, струминний апарат та породоруйнівні кулі. Основні відмінності між ними полягають у конструкції механічного породоруйнівного органу, способі утримання куль та типі приводу, причому розвиток технічної ідеї в пристроях абразивно-механічного ударного буріння відображає послідовне вдосконалення конструкції з метою підвищення ефективності руйнування порід.

Початковим етапом є модель ГПБ - 1Т, у якій реалізовано обертальний механізм руйнування породи за допомогою породоруйнівного кільця з посадковими гніздами для куль та турбінного приводу [25]. Необхідність такого рішення була зумовлена недоліками традиційних кулеструминних пристроїв, які не забезпечували ефективною обробку периферійної зони вибою, що призводило до формування параболічної його форми, зниження механічної швидкості буріння або навіть зупинки процесу поглиблення.

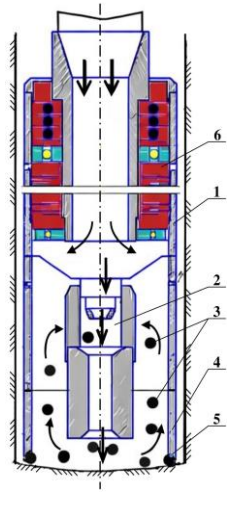
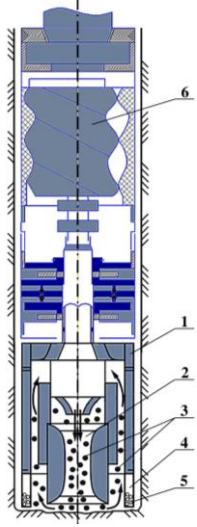
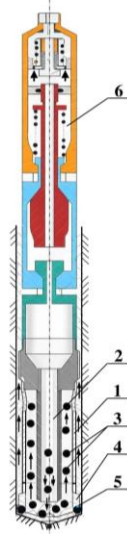
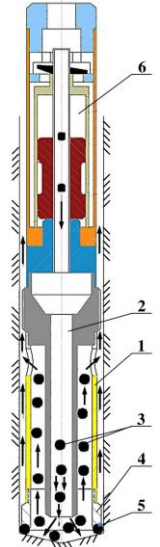
Подальший розвиток технічної ідеї представлений у моделі ГПБ - 1В, де механічний породоруйнівний орган виконано у вигляді пористої матриці [7]. Таке конструктивне рішення дозволило використовувати уламки куль і частинки породи як абразивний матеріал, що підвищило ефективність руйнування периферійної частини вибою. Необхідність цього удосконалення була викликана недостатньою ефективністю механічного впливу куль у попередній конструкції та потребою зменшення витрат енергії на руйнування.

Наступним етапом розвитку стала модель ГПБ-1ГУ, у якій до обертального механізму додано гідроударник, що дозволило реалізувати ударно-обертальний гідродинамічний спосіб руйнування порід. Впровадження ударно-

го механізму було необхідним через обмежену ефективність чисто обертальних схем буріння у міцних породах, де енергії гідродинамічного потоку та механічного контакту куль було недостатньо для здійснення інтенсивного руйнування гірської породи на вибої свердловини.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика конструктивних ознак пристроїв абразивно-механічного ударного буріння

№	Ознака пристрою	Найменування моделі пристрою			
		ГПБ - 1Т	ГПБ - 1В	ГПБ - 1ГУ	ГПБ - 1ПУ
1	Принципова схема пристрою				
2	Основний елемент	корпус пристрою 1			
3	Ініціатор руху куль в потоці	струминний апарат 2			
4	Породоруйнівний елемент	породоруйнівні кулі 3			
5	Механічний породоруйнівний орган	кільце 4	матриця 4	коронка 4	коронка 4
6	Тип елементів для утримання куль	посадкові гнізда 5	пориста структура 5	крізнi пази 5	глухі пази 5
7	Елементи руйнування (додаткові)	-	уламки куль та породи	-	зубки коронки
8	Привод обертання	турбінний апарат 6	гвинтовий двигун 6	бурильна колона	бурильна колона
9	Ініціатор ударних імпульсів	-	-	гідроударник 6	пневмоударник 6
10	Тип циркуляційного середовища	промивальна рідина	промивальна рідина	промивальна рідина	стиснене повітря

Подальшим етапом розвитку є модель ГПБ - 1ПУ, де замість гідроударного механізму застосовано пневмоударник, а робочим середовищем виступає стиснене повітря. Поява такого рішення була зумовлена необхідністю забезпечення роботи пристрою в складних гірничо-геологічних умовах, зокрема в свердловинах із поглинанням промивальної рідини або в районах з обмеженим водопостачанням, де використання традиційних гідравлічних систем є неефективним або неможливим.

Трансформація конструкцій відображає послідовне усунення недоліків попередніх технічних рішень і перехід від простого обертального механізму руйнування до комбінованих ударно-обертальних систем, здатних працювати у ширшому діапазоні гірничо-геологічних та технологічних умов (табл. 2). При цьому в усіх розглянутих конструкціях важливу роль відіграє абразивний ефект, що виникає внаслідок взаємодії породоруйнівних куль, їх уламків та частинок гірської породи з поверхнею вибою. Навіть у пристроях, де основним механізмом руйнування є обертальний або ударно-обертальний вплив, додатковий абразивний механізм забезпечує інтенсивніше стирання і сколювання породи, особливо в периферійній частині вибою. В результаті поєднання кулеструминного, абразивного та ударно-обертального впливів досягається більш ефективно руйнування гірського масиву.

Таблиця 2

Технічні задачі і результати для пристроїв абразивно-механічного ударного буріння свердловин

Тип моделі пристрою	Основна технічна задача	Технічний результат, що досягнутий
ГПБ - 1Т	Підвищення ефективності буріння та усунення параболічної форми вибою за рахунок удосконалення механічного породоруйнівного органу	Формування правильної периферійної зони вибою, збільшення швидкості буріння та зменшення зношування елементів бурового снаряда
ГПБ - 1В	Підвищення ефективності обробки периферійної зони вибою та зменшення витрат енергії на руйнування породи	Реалізація переважно абразивного механізму руйнування із використанням уламків куль і породи, збільшення інтенсивності буріння
ГПБ - 1ГУ	Забезпечення стабільного руйнування порід різної міцності та створення комбінованого механізму руйнування	Реалізація ударно-обертального гідродинамічного механізму руйнування, підвищення ефективності буріння у міцних породах
ГПБ - 1ПУ	Забезпечення можливості буріння у свердловинах з поглинанням та в умовах обмеженого водопостачання	Реалізація ударно-обертального пневматичного способу буріння, розширення умов застосування

Відповідно до наведених в табл. 2 відомостей видно, що удосконалення конструкцій пристроїв спрямоване на послідовне вирішення конкретних технічних задач: підвищення ефективності обробки периферійної зони вибою, інтенсифікацію руйнування породи та забезпечення стабільності процесу буріння. В результаті цього реалізовано перехід від переважно обертального до абразивного та ударно-обертального механізмів руйнування.

В основних базових технічних рішеннях, які були використані як прототипи, принцип керування процесом буріння ґрунтувався переважно на регулюванні режиму циркуляції промивальної рідини, що забезпечувала переміщення породоруйнівних куль у привибійній зоні. Такі підходи дозволяли загалом задовільно реалізувати кулеструмінний механізм руйнування породи, однак мали обмежені можливості щодо ефективної обробки периферійної частини вибою та стабілізації форми свердловини. В запропонованих технічних рішеннях принципи керування отримали подальший розвиток за рахунок поєднання гідродинамічного впливу потоку робочого середовища з механічною, абразивною та ударною дією робочих органів.

Важливу роль у керуванні процесом буріння відіграє також регулювання обертального руху механічних (породоруйнівних) робочих органів пристрою. При цьому на процес руйнування вплив чинить також абразивні властивості породоруйнівних куль, їх уламків та частинок гірської породи, які під час циркуляції у потоці робочого середовища та акумулювання у відповідних робочих органах створюють додатковий позитивний ефект стирання і сколювання поверхні вибою свердловини. В конструкціях, що містять ударні механізми, додатковим фактором керування є параметри ударного впливу. Поєднання обертального, абразивного та ударного впливів створює передумови для реалізації більш ефективного механізму руйнування порід (табл. 3).

Проводячи аналіз відомостей табл. 3, можна стверджувати: запропоновані технічні рішення розвивають і доповнюють принципи керування, закладені у відомих конструкціях, та спрямовані на підвищення ефективності процесу буріння і розширення технологічних можливостей застосування кулеструмінних вибійних пристроїв у різних гірничо-геологічних умовах.

Конструктивні рішення розглядуваних пристроїв спрямовані на забезпечення різних механізмів руйнування породи у центральній та периферійній зонах вибою свердловини з урахуванням особливостей його формування під час саме кулеструмінного буріння (табл. 4).

Показані в табл. 4 загальні підходи до реалізації принципів обробки вибою ґрунтуються на поєднанні кулеструмінного, абразивного, механічного та ударного впливів на гірську породу, що дозволяє забезпечити ефективне руйнування як центральної, так і периферійної частин вибою та підтримувати оптимальну геометрію свердловини в процесі буріння.

Водночас реалізація зазначених принципів обробки вибою потребує обґрунтованого вибору режимів роботи пристроїв, які визначають інтенсивність взаємодії робочих елементів з породою та ефективність процесу руйнування. В зв'язку з цим важливим етапом дослідження є визначення загальних підходів до

розрахунку основних режимних параметрів роботи кулеструминних вибійних пристроїв (табл. 5).

Таблиця 3

Принципи керування пристроями абразивно-механічного ударного буріння свердловин

№	Параметри керування пристроями	Модель пристрою абразивно-механічного ударного буріння			
		ГПБ - 1Т	ГПБ - 1В	ГПБ - 1ГУ	ГПБ - 1ПУ
1	Спосіб передачі енергії рухливим кулям та вибійному приводному органу	потік промивальної рідини			стиснене повітря
2	Керування приводним органом	зміна витрати промивальної рідини та осевого навантаження	зміна витрати промивальної рідини	зміна витрати стисненого повітря	
3	Принцип увімкнення вибійного обертального або ударного механізму	при пуску поверхневого бурового насоса		автоматичне, при контакті з породним уступом та одночасно працюючим поверхневим буровим насосом або компресором	
4	Режим роботи механічного робочого органу	обертальний	абразивно-обертальний	ударно-обертальний	ударно-обертальний
5	Метод поглиблення свердловини	обертальний кулеструминний	абразивно-обертальний кулеструминний	ударно-обертальний гідродинамічний	ударно-обертальний пневматичний
6	Регулювання темпу руйнування	витрата рідини		витрата рідини або стисненого повітря та осеове навантаження	
7	Тип керування	гідравлічне		гідро(пнемо)механічне	
8	Робота у складних геологічних умовах	обмежена	похило-направлені свердловини	міцні породи	поглинання рідини

Таблиця 4

Технічні та технологічні принципи обробки центральної та периферійної зон вибою свердловини пристроями абразивно-механічного ударного буріння

Модель пристрою	Принцип обробки центральної зони вибою	Принцип обробки периферійної зони вибою	Можливості вибійного пристрою	Вплив витрати робочого середовища
ГПБ - 1Т	Руйнування породи циркулюючими кулями під дією струминного потоку промивальної рідини	Обертання породоруйнівного кільця з кулями, що обробляють криволінійну периферію вибою	Формування правильної геометрії вибою, підвищення швидкості буріння	Зі збільшенням витрати рідини зростає швидкість руху куль та інтенсивність руйнування центральної частини вибою
ГПБ - 1В	Руйнування породи кулями в струминному потоці промивальної рідини	Абразивна обробка периферії матрицею з пористою структурою, заповненою уламками куль і частинками породи	Підвищення ефективності руйнування та стабільності буріння у викривлених свердловинах	Зміна витрати рідини регулює циркуляцію куль і надходження абразивного матеріалу до пористої матриці
ГПБ - 1ГУ	Кулеструминне руйнування породи потоком промивальної рідини	Ударно-обертальна обробка коронкою з кулями під дією гідроударника	Ефективне руйнування міцних порід та стабілізація процесу буріння	Витрата рідини визначає інтенсивність струминного руйнування та роботу гідроударника
ГПБ - 1ПУ	Кулеструминне руйнування породи потоком стисненого повітря	Ударно-обертальна обробка зубчастою коронкою з кулями під дією пневмоударника	Робота в умовах поглинання промивальної рідини та за відсутності водопостачання	Збільшення витрати повітря підвищує швидкість руху куль та енергію ударів пневмоударника

Принципи розрахунку режимних параметрів роботи пристроїв абразивно-механічного ударного буріння

№	Режимний параметр	Фізична сутність параметра	Принцип розрахунку	Основні фактори впливу
1	Витрата робочого середовища (рідини або повітря)	Визначає інтенсивність циркуляції куль і транспортування продуктів руйнування	Розраховується з умови забезпечення необхідної швидкості потоку в струминному апараті	Діаметр каналів, тиск на вході, властивості середовища
2	Швидкість потоку робочого середовища	Забезпечує захоплення та транспортування породоруйнівних куль	Визначається за витратою і площею прохідного перерізу струминного апарата	Витрата середовища, геометрія сопел
3	Частота обертання механічного робочого органу	Визначає інтенсивність механічної обробки периферійної зони вибою	Розраховується за параметрами приводу (турбіна, гвинтовий двигун або поверхневий буровий верстат)	Витрата середовища, крутний момент, опір породи руйнуванню
4	Осьове навантаження на вибій через механічний робочий орган	Забезпечує контакт породоруйнівних елементів з породою	Визначається з умови ефективного руйнування породи без перевантаження інструмента	Міцність породи, діаметр свердловини, маса бурильної колони
5	Частота ударів (для ударних пристроїв)	Характеризує інтенсивність ударного руйнування породи	Розраховується за параметрами гідро- або пневмоударника	Витрата та тиск робочого середовища, конструкція ударного механізму
6	Енергія удару	Визначає здатність руйнувати міцні породи	Визначається за масою рухомих елементів і швидкістю їх переміщення	Маса поршня, тиск середовища, довжина ходу

Таким чином, представлені в табл. 5 підходи до реалізації принципів розрахунку режимних параметрів розглядуваних пристроїв передбачають комплексне врахування гідродинамічних, механічних та абразивних факторів, що визначають ефективність руйнування породи у привибійній зоні.

Враховуючи зазначені підходи до реалізації принципів ефективного функціонування розглядуваних пристроїв, виникає логічна необхідність систематизувати порядок визначення основних параметрів, що характеризують їх роботу. Тому розрахунок режимних і конструктивних параметрів доцільно виконувати у певній послідовності, яка враховує взаємозв'язок гірничо-геологічних умов буріння, режимів роботи пристрою та особливостей його конструктивного виконання. Спочатку визначають гірничо-геологічні умови буріння, зокрема міцність порід, діаметр свердловини, необхідну механічну швидкість буріння та особливості циркуляції робочого середовища. На основі цих даних визначають необхідне осьове навантаження на вибій C , яке повинно забезпечувати ефективний контакт породоруйнівних елементів із породою. Далі визначають потрібну витрату робочого середовища (промивальної рідини або стисненого повітря) Q , яка забезпечує транспортування продуктів руйнування та циркуляцію породоруйнівних куль у струминному апараті. За заданою витратою Q розраховують швидкість потоку у струминному апараті та його геометричні параметри, зокрема діаметр каналів і сопел A_c . Наступним етапом визначають параметри руху породоруйнівних куль, зокрема енергію удару куль W , швидкість руху куль v_k та їх кількість M у потоці, а також діаметр куль d_k , які дозволяють проводити ефективне руйнування центральної частини вибою. Після цього розраховують параметри механічного породоруйнівного органу, що забезпечує обробку периферійної зони вибою (кільце, матриця або коронка), а також частоту його обертання n , яка залежить від типу приводу. Для пристроїв із ударним механізмом додатково визначають частоту нанесення ударів f , енергію удару E та параметри ударного вузла (маса ударника m , довжина ходу бойка ударної машини s , перепад тиску в гідроударнику або пневмоударнику Δp). На завершальному етапі перевіряють узгодженість режимних і конструктивних параметрів пристрою, оцінюють його енергетичні витрати та забезпечення стабільності процесу буріння. Оптимізація отриманих параметрів дозволяє здійснювати ефективне руйнування породи як у центральній, так і у периферійній частинах вибою свердловини.

Нами проведено дослідження, зокрема щодо визначення необхідної кількості породоруйнівних куль M , яка повинна одночасно циркулювати у привибійній зоні свердловини для забезпечення ефективного розвитку процесів руйнування гірської породи. Метою таких досліджень було встановлення раціонального значення параметра M , при якому досягається найбільша інтенсивність руйнування вибою та створюються сприятливі умови для стабільного функціонування кулеструминної системи буріння.

Дослідження проводилися в модельних свердловинах при швидкості руху породоруйнівних куль $v_k \approx 40$ м/с та діаметрі куль $d_k = 5$ мм. Кількість куль, що одночасно брали участь у циркуляції, змінювали в межах $M = 10 - 50$ шт. Руйнування зразків крупнозернистого граніту здійснювалося у середовищі техніч-

ної води, обробленої поверхнево-активною речовиною сульфонол з концентрацією $c = 3,0$ г/л. В ході експериментальних досліджень аналізувався вплив кількості куль, що беруть участь у циркуляції, на результати руйнування породи. Встановлено наступне: зі збільшенням кількості куль від $M = 10$ шт. до $M = 40$ шт. інтенсивність руйнування зростає, а з подальшим збільшенням кількості куль до $M = 50$ шт. вона знижується, що пояснюється погіршенням умов руху куль у потоці робочого середовища та зростанням кількості їх взаємних зіткнень. Отримані результати дозволили встановити, що найбільш ефективна реалізація процесу гідромеханічного буріння досягається при раціональній кількості куль у привибійній зоні в межах $M = 35 - 45$ шт.; вказане число куль забезпечує максимальну інтенсивність розвитку процесів руйнування гірської породи та стабільність роботи вибійного пристрою.

Раціональну кількість куль M , що одночасно циркулюють у привибійній зоні, можна визначати також і аналітично. Експериментальний підхід ґрунтується на дослідженні впливу параметру M на інтенсивність руйнування гірської породи, а його аналітичне визначення доцільно здійснювати з умови забезпечення потрібної сумарної енергії ударного впливу на вибій за одиницю часу, яка повинна бути не меншою за енергію, необхідну для руйнування об'єму гірської породи, що відповідає заданій швидкості буріння. Оцінювання величини енергії удару одиничної кулі в загальному випадку здійснюється за такою залежністю:

$$W = \frac{mv_k^2}{2}, \quad (1)$$

де m – маса одиничної кулі, що наносить удар по вибою свердловини, кг; v_k – швидкість одиничної кулі, м/с.

Сумарна енергія ударів усіх куль за одиницю часу:

$$\Sigma W = MWf_k, \quad (2)$$

де f_k – середня частота зіткнень однієї кулі з вибоєм свердловини.

Величина ΣW повинна дорівнювати або перевищувати енергію руйнування гірської породи

$$\Sigma W \geq q_{en}V_{en}, \quad (3)$$

де q_{en} – питома енергія руйнування гірської породи, Дж/м³; V_{en} – об'єм гірської породи, що руйнується за секунду, м³/с.

Оціночна кількість куль

$$M = \frac{2q_{en}V_{en}}{mv_k^2 f_k}. \quad (4)$$

Враховуючи щільність матеріалу кулі ρ_k та їх діаметр d_k

$$M = \frac{12q_{en}V_{en}}{\pi\rho_k d_k^3 v_k^2 f_k}. \quad (5)$$

Для запропонованих кулеструминних систем буріння кількість породоруйнівних куль M у привибійній зоні можна також визначати з гідродинамічних умов їх циркуляції, тобто з урахуванням витрати робочого середовища Q та концентрації куль у потоці. Кількість куль (при відомому часі їх перебування в потоці рідини), що одночасно знаходяться у привибійній зоні через витрату потоку:

$$M = \frac{6c_k Q t_k}{\pi d_k^3}, \quad (6)$$

де c_k – об'ємна концентрація куль у потоці циркулюючого середовища; t_k – середній час перебування кулі у привибійній зоні, с.

Середній час перебування кулі у привибійній зоні можна оцінити як

$$t_k = \frac{L_{ц}}{v_k}, \quad (7)$$

де $L_{ц}$ – характерна довжина ділянки циркуляції куль у привибійній зоні, м.

Вираз для визначення кількості куль при відомих геометрії зони циркуляції та швидкості куль

$$M = \frac{6c_k Q L_{ц}}{\pi d_k^3 v_k}. \quad (8)$$

Наведені залежності (1–8) дозволяють аналітично оцінити необхідну кількість породоруйнівних куль M , що одночасно циркулюють у привибійній зоні свердловини. Перший підхід ґрунтується на енергетичному балансі процесу руйнування гірської породи і передбачає визначення кількості куль з умови забезпечення достатньої сумарної енергії ударного впливу на вибій. Другий підхід базується на гідродинамічних умовах циркуляції куль у потоці робочого середовища та враховує витрату середовища, концентрацію куль і геометрію зони їх руху. Поєднання енергетичного та гідродинамічного підходів дозволяє більш обґрунтовано оцінювати раціональну кількість куль у привибійній зоні та використовувати отримані залежності для вибору оптимальних режимів роботи проєктованих бурових пристроїв.

Паралельно з визначенням раціональної кількості породоруйнівних куль M важливим є дослідження впливу інших режимних параметрів процесу руйнування, зокрема частоти обертання механічного породоруйнівного органу. З цією метою були проведені додаткові експериментальні дослідження в модельних свердловинах, результати яких дозволили оцінити вплив частоти обертання механічного породоруйнівного органу на швидкість поглиблення вибою для різних типів порід. Отримані результати показали, що підвищення частоти обертання механічного породоруйнівного органу n від 225 до 260 та 370 хв⁻¹ сприяє зростанню швидкості поглиблення вибою, яке пояснюється збільшенням кількості контактів породоруйнівних елементів із поверхнею породи та інтенсифікацією абразивно-механічної взаємодії у привибійній зоні. Водночас встановлено, що збільшення осьового навантаження S на механічний орган від 2 до 4 Н/мм² також приводить до підвищення швидкості руйнування, оскільки пок-

ращуються умови контакту між механічним органом, кулями та породою. Таким чином, підвищені значення частоти обертання та осьового навантаження забезпечують інтенсифікацію процесу буріння.

Проведено також цикл комплексних експериментальних досліджень, метою яких стало отримання та узагальнення даних щодо впливу величини енергії удару одиначної кулі W на особливості розвитку деформаційних і руйнівних процесів у масиві гірських порід (на прикладі стендового дослідження руйнування блоку крупнозернистого граніту), а також на характер формування лунок руйнування (їх глибини h та об'єму V_p) в приповерхневій зоні. Основні результати виконаних досліджень наведено на рис. 1.

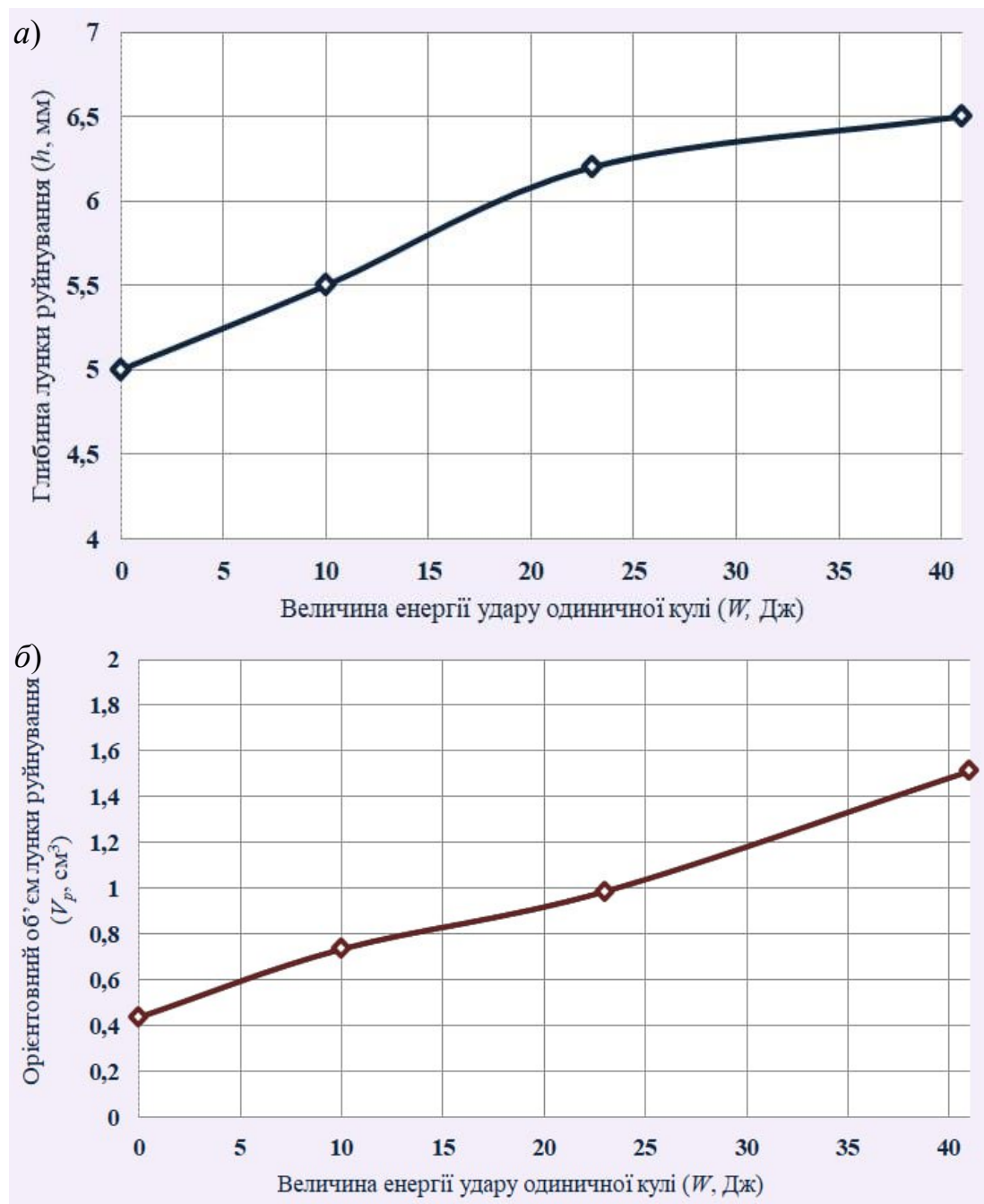


Рис. 1. Вплив енергії удару кулі W на глибину h (а) та об'єм V_p (б) лунок руйнування в крупнозернистому граніті

В якості логічного продовження попередніх досліджень проведено цикл експериментів, спрямованих на визначення впливу енергії удару одиничної кулі на розвиток деформаційних і руйнівних процесів у масиві гірських порід (на прикладі руйнування блоку дрібнозернистого граніту), а також на параметри формування лунок руйнування. Результати досліджень наведено на рис. 2.

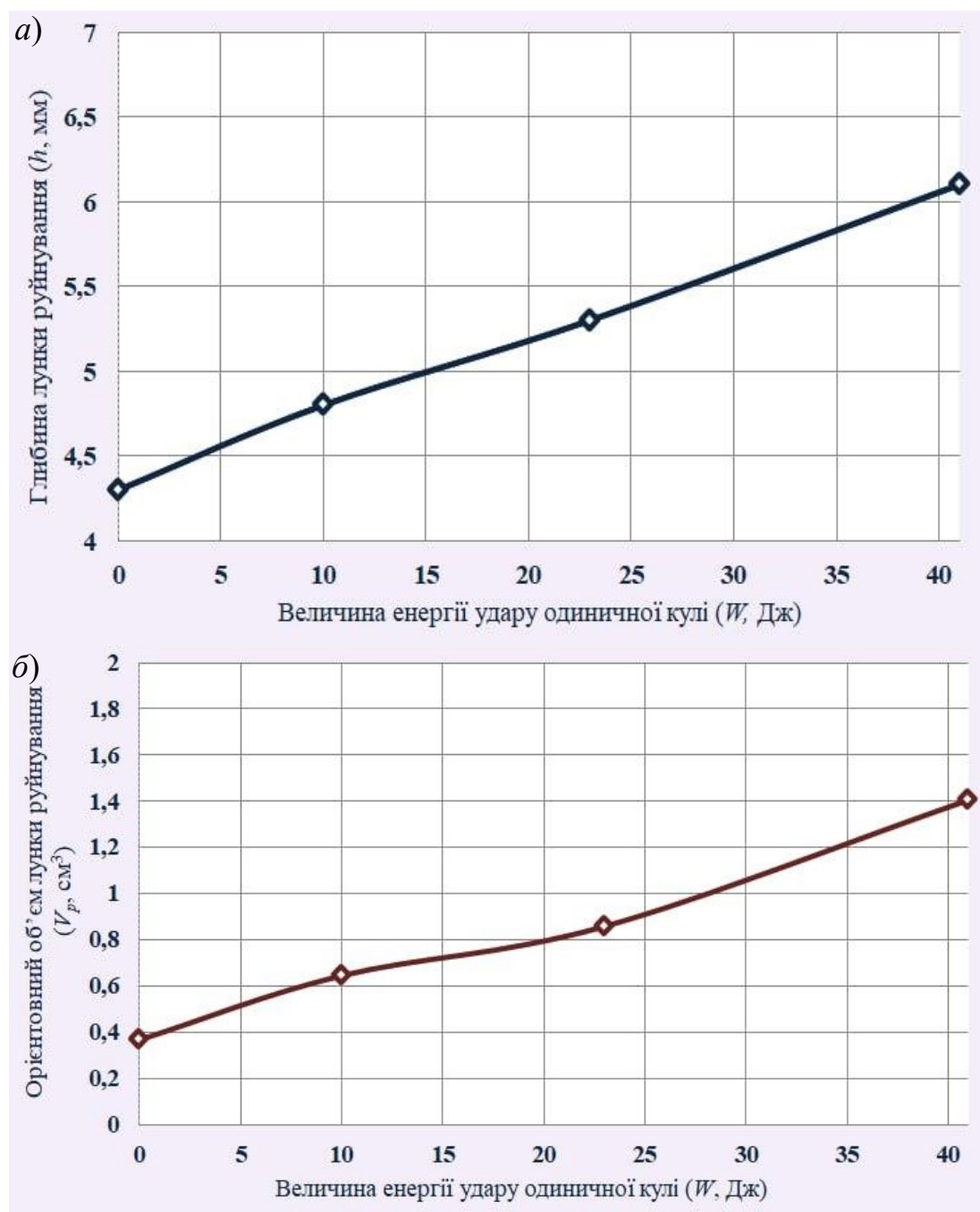


Рис. 2. Вплив енергії удару кулі W на глибину h (а) та об'єм V_p (б) лунок руйнування в дрібнозернистому граніті

Відповідно до результатів експериментальних досліджень встановлено, що зі збільшенням енергії удару одиничної кулі W відбувається закономірне зростання як глибини h , так і об'єму V_p лунок руйнування. При цьому характер залежностей для крупнозернистого та дрібнозернистого гранітів є подібним. Во-

дночас у дрібнозернистому граніті спостерігається дещо інтенсивніше збільшення параметрів лунок руйнування, що свідчить про більшу чутливість мінералогічної структури цієї породи до зростання енергії ударного навантаження. Отримані результати підтверджують визначальний вплив енергії удару кулі W на ефективність розвитку процесів деформації та руйнування гірських порід у приповерхневій зоні.

Поряд із зазначеними результатами досліджень, важливим є також аналіз режимів роботи ударного механізму вибійного пристрою, який забезпечує додаткову інтенсифікацію процесу руйнування гірських порід. Проведені дослідження показали, що ефективна робота гідроударника забезпечується при частоті нанесення ударів приблизно $f \approx 5-7$ Гц, яка відповідає типовому режиму функціонування такого типу ударних механізмів та забезпечує формування регулярних імпульсних навантажень на породоруйнівні елементи й сприяє підвищенню інтенсивності руйнування гірської породи.

Розглянуті конструкції пристроїв відображають послідовний розвиток технічної ідеї, спрямований на підвищення ефективності руйнування гірських порід, стабілізацію процесу буріння та розширення умов застосування методу абразивно-механічного ударного буріння. В ранніх конструкціях основна увага приділяється забезпеченню ефективної циркуляції породоруйнівних куль та формуванню раціональної геометрії вибою свердловини. Подальші конструктивні удосконалення пов'язані з використанням додаткових механічних або абразивних елементів, що беруть участь у процесі руйнування породи. Наступним етапом розвитку є впровадження ударних механізмів, які забезпечують додаткову імпульсну дію на породоруйнівні елементи. Поєднання обертального, абразивного та ударного впливів дозволяє суттєво підвищити ефективність руйнування міцних порід і розширити область застосування кулеструминних технологій буріння (табл. 6).

Таблиця 6

Порівняльна характеристика переваг і недоліків моделей пристроїв абразивно-механічного ударного буріння свердловин

Модель пристрою	Основні переваги	Можливі недоліки
ГПБ - 1Т	Проста конструкція; стабілізація форми вибою; підвищення швидкості буріння	Низька ефективність у міцних породах; залежність від витрати промивальної рідини
ГПБ - 1В	Підвищена ефективність руйнування за рахунок абразивної матриці; краща обробка периферії вибою	Зношування матриці; можливе засмічення пористої структури
ГПБ - 1ГУ	Висока ефективність руйнування міцних порід; поєднання обертального та ударного впливу	Ускладнення конструкції; залежність від циркуляції рідини
ГПБ - 1ПУ	Можливість роботи без промивальної рідини; ефективне буріння в умовах поглинання	Потреба у компресорному обладнанні; складність регулювання режимів

Таким чином, узагальнення результатів аналізу (табл. 6) показує, що вдосконалення конструкцій вибійних пристроїв здійснюється шляхом поєднання різних механізмів руйнування гірських порід і спрямоване на підвищення ефективності процесу буріння. При цьому кожне конструктивне рішення має певні переваги та обмеження, які необхідно враховувати під час вибору моделі пристрою для конкретних гірничо-геологічних умов.

Висновки. Проведений аналіз показав, що ефективність руйнування гірських порід на вибої свердловини визначається застосуванням комбінованих методів впливу, які поєднують кулеструминний, абразивний, механічний та ударний механізми руйнування. Дослідження конструкцій пристроїв абразивно-механічного ударного буріння, представлених моделями ГПБ - 1Т, ГПБ - 1В, ГПБ - 1ГУ та ГПБ - 1ПУ, засвідчило послідовний розвиток технічних рішень від обертальних кулеструминних систем до комбінованих абразивно-обертальних та ударно-обертальних схем, що дозволяє підвищити ефективність обробки периферійної зони вибою, інтенсифікувати руйнування міцних порід і розширити умови застосування таких бурових пристроїв. Встановлено, що ефективність роботи названих пристроїв визначається узгодженою дією основних режимних параметрів буріння, зокрема витрати робочого середовища, швидкості руху породоруйнівних куль, частоти обертання механічного породоруйнівного органу, величини осьового навантаження та параметрів ударного механізму. Експериментально визначено раціональну кількість породоруйнівних куль у привибійній зоні свердловини, яка становить $M = 35-45$ шт., що забезпечує максимальну інтенсивність руйнування породи. Показано, що збільшення частоти обертання механічного органу n до $225-370$ хв⁻¹ та осьового навантаження C до $2-4$ Н/мм² сприяє зростанню швидкості поглиблення вибою. Для моделей ГПБ - 1ГУ та ГПБ - 1ПУ, оснащених ударними механізмами, встановлено раціональний режим роботи при частоті ударів приблизно $f = 5-7$ Гц, що забезпечує ефективну імпульсну дію на породоруйнівні елементи. Отримані результати підтверджують доцільність використання комбінованих абразивно-механічних та ударно-обертальних схем руйнування гірських порід у пристроях ГПБ - 1Т, ГПБ - 1В, ГПБ - 1ГУ та ГПБ - 1ПУ для підвищення ефективності буріння свердловин.

Перелік посилань

1. Azar, J.J., & Robello, S.G. (2007). *Drilling Engineering*. PennWell Books.
2. Guhey, R. (2017). *Geology*. Publisher: Imprint NIPA.
3. Lopez, J.C., Lopez, J. E., & Javier, F. (2017). *Drilling and blasting of rocks*. CRC Press Taylor & Francis. <https://surli.cc/vxaxwu>
4. Don, W.D. (2019). *Oilwell Drilling Engineering*. Publisher: ASME Press. <https://surl.lu/emrana>
5. Caenn, R., Gray, G.R. & Darley, H.C.H. (2020). *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*. Publisher: Gulf Professional Publishing.
6. Aziukovskyi, O., Koroviaka, Y., & Ihnatov, A. (2023). *Drilling and operation of oil and gas wells in difficult conditions*. Zhurfond.
7. Ihnatov, A. (2021). Analyzing mechanics of rock breaking under conditions of hydromechanical drilling. *Mining of Mineral Deposits*, 15(3), 122–129. <https://doi.org/10.33271/mining15.03.122>
8. Zhang, Z. X. (2016). *Rock fracture and blasting*. Theory and applications. Elsevier Inc. Publishing.
9. Vaddadi, N. (2015). *Introduction to oil well drilling*. Bathos publishing.

10. Hossain, M.E., & Al-Majed, A.A. (2015). *Fundamentals of sustainable drilling engineering*. Scrivener publishing. <https://doi.org/10.1002/9781119100300>
11. Hossain, M.E., & Islam, M.R. (2018). *Drilling engineering: problems and solutions*. Scrivener publishing. <https://doi.org/10.1002/9781118998632>
12. Skalle, P. (2015). *Drilling Fluid Engineering*. Publisher: bookboon.com
13. Hossain, M.E. (2016). *Fundamentals of drilling engineering*. Scrivener publishing.
14. Jeffery, W.H. (2015). *Deep Well Drilling: The Principles and Practices of Deep Well Drilling*. Publisher: Palala Press.
15. Skinner, L. (2016). *IADC Drilling Series – Coiled Tubing Operations*. Publisher: IADC Technical.
16. Raffa, P. & Druetta, P. (2019). *Chemical Enhanced Oil Recovery*. Publisher: De Gruyter.
17. Fink, J. (2015). *Petroleum Engineer's Guide to Oil Field Chemicals and Fluids*. Publisher: Gulf Professional Publishing. <https://surl.li/ybpbqk>.
18. Aadnoy, B.S., & Looyeh, R. (2019). *Petroleum Rock Mechanics: Drilling Operations and Well Design*. Publisher: Gulf Professional Publishing.
19. Ігнатів, А.О., Пашенко, О.А., Коровяка, Є.А., Семехін, В.Ю., Логвиненко О.О., Аскеров І.К. (2021). Деякі пояснення ударного механізму впливу на гірські породи при бурінні свердловин. *Збірник наукових праць НГУ*, 66, 177–192. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/66.177>.
20. Guan, Z., Chen, T., & Liao, H. (2021). *Theory and Technology of Drilling Engineering*. Publisher: Springer. <https://surl.li/mblmlg>.
21. Saha, R., Tiwari, P., & Uppaluri R.V.S. (2021). *Chemical Nanofluids in Enhanced Oil Recovery: Fundamentals and Applications*. Publisher: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003010937>.
22. Jadhav, S. (2015). *Oil & Gas Production*. Publisher: Scitus Academics Llc.
23. Austin, E.H. (2012). *Drilling Engineering*. Publisher: Springer Science & Business Media.
24. Ігнатів, А. О., Коровяка, Ye. А., Пінка, J., Растсвієтєєв, V. О., & Дми́трук, О. О. (2021). Geological and mining-engineering peculiarities of implementation of hydromechanical drilling principles. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 11–18. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/011>
25. Ігнатів, А. О., Коровяка, Y. А., Павличенко, А. V., Растсвієтєєв, V. О., & Аскеров, I. K. (2023). Determining key features of the operation of percussion downhole drilling machines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1254(1), 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012053>
26. Sadeghi, J. (2021). *Uncertainty Modeling for Engineers*. Github publishing. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4483793>.

ABSTRACT

Purpose. Analysis of abrasive-mechanical percussive drilling devices and substantiation of improved rock destruction efficiency through optimization of operating parameters of downhole devices GPB - 1T, GPB - 1V, GPB - 1GU, and GPB - 1PU.

Research methodology. System analysis, engineering generalization, and experimental studies in model boreholes were applied. A generalized rock destruction model was developed, accounting for the combined action of pellet impact, abrasive, mechanical, and percussive-rotary effects. The principles for determining the main operating parameters were generalized, including the flow rate of the working medium Q , the velocity of ball movement v_k , their diameter d_k , the number of balls M , the rotational speed of the mechanical element n , the axial load C , as well as the impact frequency f and impact energy E .

Research results. Regularities in the development of designs were established, ranging from pellet impact drill schemes (GPB - 1T) to abrasive-rotary (GPB - 1V) and percussive-rotary systems (GPB - 1GU, GPB - 1PU). The rational number of rock-breaking balls was experimentally determined as $M = 35\text{--}45$, at which the maximum rock destruction intensity is achieved. It was shown that in-

creasing the rotational speed to $n = 225\text{--}370 \text{ min}^{-1}$ and the axial load to $C = 2\text{--}4 \text{ N/mm}^2$ increases the rate of bottom-hole penetration. For the percussive models, a rational operating mode with an impact frequency of $f = 5\text{--}7 \text{ Hz}$ was established.

Originality. The principles of combined ball-jet, abrasive, and percussive-rotary rock destruction were further developed, with the influence of the parameters M , n , C , f on the intensity of rock destruction in the bottom-hole zone being established. Their rational values for the studied conditions ($M \approx 40$; $n \approx 300 \text{ min}^{-1}$; $C \approx 3 \text{ N/mm}^2$; $f \approx 6 \text{ Hz}$) have been determined, along with approaches to the effective coordination of operating modes of the proposed devices.

Practical implications. The obtained results make it possible to substantiate rational operating modes for the devices GPB - 1T, GPB - 1V, GPB - 1GU, GPB - 1PU and to improve the efficiency of well drilling under various mining and geological conditions.

Keywords: *drilling, hydraulic hammer, pellet impact drill, percussion-rotary method, rock-breaking balls, downhole device, well, operating parameters.*

дата першого надходження статті до видання	10.01.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	13.02.2026
дата публікації (оприлюднення)	31.03.2026