

© А.О. Ігнатів<sup>1</sup>, О.А. Пашченко<sup>1</sup>, Є.А. Коровяка<sup>1</sup>, В.Ю. Семехін<sup>2</sup>,  
О.О. Логвиненко<sup>2</sup>, І.К. Аскеров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

<sup>2</sup> ТОВ «Будстрой Консалт», Дніпро, Україна

## ДЕЯКІ ПОЯСНЕННЯ УДАРНОГО МЕХАНІЗМУ ВПЛИВУ НА ГІРСЬКІ ПОРОДИ ПРИ БУРІННІ СВЕРДЛОВИН

© A. Ihnatov<sup>1</sup>, O. Pashchenko<sup>1</sup>, Ye. Koroviaka<sup>1</sup>, Yu. Semekhin<sup>2</sup>,  
O. Logvinenko<sup>2</sup>, I. Askerov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup> LLC "Budstroy Consult", Dnipro, Ukraine

## SOME EXPLANATIONS OF THE IMPACT MECHANISM ON ROCKS WHEN DRILLING WELLS

**Мета.** Розробка теоретичних основ, конструктивної схеми та методики розрахунку режимно-технологічного супроводження процесів спорудження свердловин за умов використання модернізованих пристроїв абразивно-механічного ударного способу руйнування гірського масиву.

**Методика дослідження.** Теоретичні й лабораторні дослідження особливостей функціонування пристроїв абразивно-механічного ударного способу руйнування гірського масиву, виконано із застосуванням сучасних методів аналітичного аналізу і експериментальних досліджень, зокрема шляхом використання загальних принципів математичного та фізичного моделювання, методик обробки результатів досліджень у середовищі EXCEL, MATHCAD, контрольно-вимірювальних приладів і матеріалів. Протікання свердловинних вибійних бурових процесів моделювалось на експериментальних свердловинах навчального бурового полігону Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» із застосуванням бурового верстату ЗІФ-650М та бурової установки УКБ-4П, а також відповідного бурового і допоміжного інструменту.

**Результати дослідження.** Детальним аналізом конкретних робіт і досліджень показана перспективність розробки методів гідромеханічного буріння, ефективних як з позицій механіки руйнування, так і енергоємності процесу. Встановлена необхідність визначення фізичної суті явищ, які відбуваються при відділенні елемента гірської породи від масиву в умовах зовнішнього тиску, що у свою чергу дозволить в означати найбільш раціональні параметри руйнування гірської породи на вибої свердловини, тобто максимальну продуктивність при мінімальних витратах енергії. Вивчені засадничі принципи механізму руйнування гірських порід ударами куль з виведенням найважливіших аналітичних залежностей, що характеризують вибійні процеси формування свердловини.

**Наукова новизна.** Позначений основний критерій, що визначає ефективність руйнування гірських порід – енергоємність відділення елемента від масиву, яка є власною характеристикою матеріалу і відбиває витрати енергії на відділення деякого об'єму від гірського масиву.

**Практичне значення.** Показаний механізм взаємодії основних деталей і вузлів розроблених бурових снарядів, що забезпечує досягнення раціональних показників процесу спорудження свердловин у відповідних гірничо-геологічних умовах. Сформульовані теоретичні і практичні основи роботи механічного породоруйнівного органу пристроїв, що розробляються.

З'ясовані основні параметри процесу руйнування гірських порід в повітрі і водному середовищах. Виділені принципи і методи встановлення впливу гідростатичного тиску на ефективність руйнування гірських порід при абразивно-механічному ударному бурінні.

**Ключові слова:** буріння свердловин, гідромеханічне буріння, промивальна рідина, гірська порода, куля, механічна швидкість поглиблення, пневмомеханічний снаряд, вибій, гірський масив, стовбур свердловини.

**Вступ.** Останнім часом прослідковується стійка тенденція модернізації основних технічних засобів й технології руйнування гірських порід при бурінні свердловин; однак вона носить дещо однобічний характер, через розгляд вказаних питань, в основному, крізь призму удосконалення лише системи конструктивного виконання й оснащення породоруйнівного інструменту [1]. Яскравим прикладом зазначеного, серед іншого, є широкомасштабне розгорнення досліджень стосовно використання в якості озброєння бурових доліт спеціальних алмазно-твердосплавних вставок. В літературі та виробництві більш широко застосовується таке визначення, як «полікристалічна алмазна композиція» або коротше PDC. Розглядувані долота, за характером руйнування гірської породи, доцільно віднести до інструменту різально-сколюючої дії. В цілому долота PDC призначені для розбурювання пластичних й крихко-пластичних гірських порід, однак слід пам'ятати, що їх породоруйнівні елементи оснащені доволі крихкими матеріалами, а це накладає певні, досить значні, обмеження на сферу застосування такого типу інструменту. За даними виробничих підприємств, основним видом відмови доліт PDC є руйнування алмазно-твердосплавних зубків, яке спостерігається при роботі доліт в гірських породах підвищеної твердості й абразивності, в тріщинуватих гірських породах, а також при проходженні м'яких і середніх гірських порід з твердими включеннями [2].

На сьогодні долота PDC відрізняються досить високою вартістю, що висуває на передній план питання правильного вибору області їх застосування. Головним завданням, яке постає перед технологами-проектувальниками, є ретельне вивчення геологічного розрізу свердловини і виділення тих її інтервалів, в яких застосування доліт PDC не раціонально і навіть неприпустиме.

На підставі наведеного прикладу нескладно побачити, що існує цілком окреслена проблематика раціоналізації технології і технічних засобів, які призначені до застосування в породах міцного і надміцного комплексу, причому, як відомо, останні відрізняються також значним ступенем абразивності – найвпливовішим обмежувальним чинником [3].

Для подолання певних труднощів при спорудженні свердловин у вказаних вище комплексах порід, в якості альтернативи існуючим, пропонується комбінований спосіб буріння, під назвою абразивно-механічний ударний.

**Актуальність досліджень.** Загальновідомо, що переважаюча більшість сучасних, широко застосовуваних, способів руйнування масиву порід (у тому числі при отриманні гірської виробки – свердловини) заснована на механічному розділенні деякого об'єму твердої маси на окремі елементи – частки деякого невеликого розмірного діапазону під дією локальної наведеної концентрованої напруги, яка за абсолютним значенням перевищує опір сил внутрішніх зв'язків руйнованого

матеріалу [4]. Руйнівна напруга, за вказаних умов, може створюватися під дією деяких зовнішніх сил, що виникають при зануренні в породний масив спеціальних інструментів, які мають більшу твердість, а ніж сама гірська порода.

Відповідно до створюваних умов, на вибої свердловини, за тій, або іншій дії спеціального інструменту, характер дезінтеграції породи може бути об'ємний, поверхневий і втомний. Причому, за рахунок багатократного силового впливу інструменту на масив, в породі розвивається певна система тріщин, унаслідок чого твердість її значно знижується, і, з деяким періодом, на вибої свердловини виникають умови для об'ємного руйнування [5].

Більшість різновидів гірських порід можна з упевненістю віднести до ряду неоднорідних тріщинуватих крихких тіл, стале руйнування яких починається поблизу включень і тріщин, внаслідок локальної концентрації напруги. На практиці, досить часто, значні зрушення і руйнування виникають внаслідок розвитку поверхонь ковзання (тобто тріщин зрушення).

Теоретично, якщо до вільної поверхні твердого тіла, наприклад гірської породи, прикласти через жорсткий пуансон (у нашому випадку – породоруйнівний елемент) зовнішнє механічне навантаження, то при достатній величині останнього в досліджуваному тілі почнуть проявлятися пружні, а з часом – залишкові деформації. Разом із занурюваним пуансоном, за напрямом його руху, зміщуватиметься матеріал, який знаходиться в зоні контакту такого пуансона з твердим тілом, а також деяка частина матеріалу, що знаходиться за межами контактної зони.

З такої, дещо умовної, інтерпретації механізму дезінтеграції гірської породи нескладно бачити, що ефективність процесу поглиблення свердловини повністю визначається досконалість реалізації на вибої певних закономірних факторів руйнівного циклу [6].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Глибокий аналіз літературних джерел і виробничих даних говорить про те, що в сучасній практиці будівництва свердловин ведуться досить масштабні науково-дослідні роботи з дослідження та інструментального впровадження нових високоефективних способів буріння, які дозволяють з одного боку скоротити витрати енергії і часу, а з іншого – підвищити рівень потужності, реалізованої на вибої споруджуваної свердловини [7].

На противагу класичному обертальному механічному способу розглядаються методи, що використовують новітні досягнення різних фундаментальних і прикладних наук. Особливе місце у великій гаммі нових способів займає гідромеханічний, і зокрема одна з його конструктивно-технологічних інтерпретацій, що використовує енергію великої кількості сталевих або твердосплавних куль, багаторазово контактуючих із вибоєм свердловини з великою швидкістю. Доволі помітна ефективність розглядуваного способу, визначувана значністю величини потужності, що реалізовується на вибої свердловини і досить висока тривалість рейсу, яка обмежується лише зносостійкістю струминного апарату – ключового вузлу гідромеханічного пристрою, зумовила усебічне конструкторське і технологічне удосконалення його супроводження, спрямоване на адаптацію даного

методу до різних гірничо-геологічних умов [5].

Проте, навіть за такої уваги до новітніх способів буріння, можна відмітити відсутність обґрунтованих методик з проектування досконалих технічних засобів і технологій проведення робіт в умовах дії різних виробничих чинників, а також недостатність ступеню дослідження тих процесів, що протікають при руйнуванні гірських порід, за інтенсифікованого впливу на останні. Вивчення основних деформаційних характеристик гірських порід в умовах дії динамічних навантажень, дозволить виявити ті чинники, що впливають на енергоємність процесу руйнування і визначити параметри технічних засобів для проведення бурових робіт. Наявність тісного зв'язку між усіма відміченими вище обставинами, які визначають ефективність руйнування порід, робить неможливим подальше удосконалення процесів буріння без досить повного і послідовного вивчення усіх явищ, що відбуваються на вибої споруджуваної і досліджуваної свердловини [8].

Вказані завдання вирішуються фахівцями кафедри нафтогазової інженерії та буріння Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». В результаті широкого аналізу і узагальнення наукового і практичного матеріалу, був створений ряд кардинально нових снарядів гідро(пневмо)механічного буріння, а також вивчено питання механіки руйнування гірських порід стосовно проєктованих пристроїв з урахуванням особливостей вибійних умов. Новизна і технічний рівень проєктованих снарядів підтверджені серією патентів України. Розроблені технічні, а рівно і технологічні рішення можуть бути впроваджені на основних об'єктах ведення бурових робіт, як в Україні, так і за кордоном.

**Мета статті** – обґрунтована розробка теоретичних основ, конструктивної схеми та методики розрахунку режимно-технологічного супроводження процесів спорудження свердловин за умов використання модернізованих пристроїв абразивно-механічного ударного способу руйнування гірського масиву.

**Обґрунтування вживання і опис вибраної автором методики.** Теоретичні й лабораторні дослідження особливостей функціонування пристроїв абразивно-механічного ударного способу руйнування гірського масиву, виконано із застосуванням сучасних методів аналітичного аналізу і експериментальних досліджень, зокрема шляхом використання загальних принципів математичного та фізичного моделювання, методик обробки результатів досліджень у середовищі EXCEL, MATHCAD, контрольно-вимірювальних приладів і матеріалів [9].

Протікання свердловинних вибійних бурових процесів моделювалось на експериментальних свердловинах навчального бурового полігону Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» із застосуванням бурового верстату ЗІФ-650М та бурової установки УКБ-4П, а також відповідного бурового і допоміжного інструменту.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** За призначенням свердловини підрозділяють на наступні типи [3, 10]: розвідувальні, за допомогою яких здійснюються пошуки і розвідка родовищ корисних копалин; експлуатаційні – для видобутку рідких (вода, розсоли, нафта), і газоподібних (горючий газ, гелій і ін.)

корисних копалин; геотехнологічні – для експлуатації родовищ твердих корисних копалин методом вилуговування, розплавлення і розчинення; інженерно-геологічні – для вивчення фізико-механічних властивостей гірських порід перед початком будівництва, досліджень з метою попереднього вивчення геологічного розрізу, моніторингу результатів промислової діяльності, вивчення режиму і якості підземних вод; технічні (заморожування пливунів, вентиляція підземних виробок, спорудження буронабійних паль, будівництво ліній електропередач, пониження рівня підземних вод, скидання підземних вод в поглинаючі породи і т. ін.).

Широкою номенклатурою відрізняються і способи буріння свердловин [4, 11], причому провідне місце тут займає механічний спосіб руйнування гірських порід та його різновид – обертальний, за якого руйнування гірської породи на вибої свердловини відбувається шляхом різання, сколювання і стирання спеціальними буровими інструментами (долота обертального типу, алмазні і твердосплавні коронки і ін.). Цей вид буріння залежно від способу руйнування вибою ділиться на буріння суцільним вибоєм і буріння кільцевим вибоєм – колонкове.

Обертальне буріння також класифікується на буріння з двигуном на поверхні, від якого обертання буровому інструменту передається бурильними трубами, і на буріння із вибійним двигуном, коли останній опускається в свердловину на бурильних трубах безпосередньо за буровим інструментом. Вибійними двигунами можуть бути турбобур, гвинтовий двигун, електробур, гідровібратор й ін. Якщо обертання колоні бурильних труб передається від двигуна через особливий механізм – ротор, розташований над гирлом свердловини, то такий вид буріння називається роторним [3].

За обертального буріння зруйнована порода (шлам) виноситься з вибою свердловини на поверхню промивальною рідиною (водою, глинистим або соляним розчином тощо) або видувається стисненим повітрям [12]; при бурінні шнеком – по його витках; при бурінні ложкою або зміювиком – підіймається з свердловини разом з цим інструментом. За колонкового буріння іноді значна частина зруйнованої породи підіймається на поверхню в шламових трубах.

Шнекове буріння є різновидом обертального буріння, коли порода руйнується спеціальним різцем, який під дією осевого тиску занурюється в породу, а під дією окружного зусилля, що виникає при безперервному його обертанні, ріже породу на вибої свердловини [13]. Шлам, що утворюється при цьому, безперервно виходить зі свердловини по витках шнека, який постійно обертається.

Іншим різновидом механічного способу буріння є ударно-канатний; при ньому гірська порода руйнується за допомогою ударів по вибою спеціальним буровим інструментом (долота ударного типу, бурові стакани). Буровий інструмент опускається в свердловину і приводиться в дію сталевим канатом. Зруйнована порода видаляється зі свердловини на поверхню желонками різної конструкції. При прохідці м'яких порід желонка застосовується і як породоруйнівний інструмент.

Поширення одержав також і такий механічний спосіб буріння, як ударно-

обертальний, за нього руйнування гірської породи відбувається при комбінуванні одночасної ударної і обертальної дій породоруйнівних машин – гідро- або пневмоударників на вибій свердловини.

Набуває також розповсюдження вібробуріння (перспективний механічний спосіб, наприклад, для інженерно-геологічних досліджень) – занурення вібратором (віброзанурювачем, вібромолотом) спеціального породоруйнівного інструменту – зонда в м'який ґрунт з великою швидкістю (0,1 - 2 м/хв і більше). Під дією наведеної вібрації (1250 - 2000 коливань в хвилину) в ґрунті виникають певні фізичні явища, що викликають зменшення сил тертя і зчеплення в останньому.

Конкурентоспроможною, у відповідних умовах, вважається група фізичних способів буріння (термічні, вибухові, гідравлічні, електрофізичні і комплексні) [5]. Наприклад термічне буріння, найбільш перспективне в дуже міцних, багатих кварцом породах.

Сучасні досягнення в області фізики привели до появи серії нових методів руйнування гірських порід: лазерного, електроімпульсного, плазмового й ін.

Серед достатньо великої кількості нових нетрадиційних способів руйнування гірських порід і буріння свердловин, які відрізняються від класичного механічного способу, усе більше поширення отримують способи буріння із використанням високонапірних струменів рідини; причому дія останніх аналогічна дії інструменту для механічного руйнування гірських порід: вони дезінтегрують породу, на яку впливають шляхом створення в ній напруги, що перевищує опір породи розтягуванню або зрушенню. Високонапірні струмені можна розділити на такі категорії [5, 14]: ерозійні – струмені чистої води, рідше полегшеного бурового розчину; абразивні – струмені, що складаються з рідини, в якій у зваженому стані знаходяться абразивні частки: кварцовий пісок, сталевий дріб (кулеструминний спосіб) й ін.

Нині сфера застосування кулеструминного способу в основному епізодично зводиться лише до штучного викривлення геологічних свердловин.

Однією з важливих переваг кулеструминного способу є відсутність в конструкції бурового снаряда типового для усіх механічних методів породоруйнівного інструменту, що практично не обмежує довжину рейсу.

Особливості реалізованого механізму руйнування гірських порід на вибої (диктуються, серед іншого, наявністю спеціального струминного апарату) дозволяють спускати снаряд, як на колоні бурильних труб, так і на гнучкому кабелі.

Реалізація в конструкції снаряда комплексного методу руйнування гірських порід може бути досягнута за рахунок застосування, наприклад, механічних породоруйнівних органів з робочими елементами у вигляді куль. Причому, конструкція таких органів передбачає досить тривалий термін роботи на вибої, і навіть можливість їх виконання у вигляді знімної модифікації.

Створення обертання для кулеструминного снаряда можна здійснювати за допомогою включення в його конструкцію будь-якого із вибійних двигунів. У свою чергу осьове навантаження можна передавати як вагою бурового інструменту, так і вибійним механізмом подавання.

Конструктивне виконання кулеструминних снарядів дозволяє бурити свердловини безкерновим і колонковим способами, а в останньому випадку можливе і гідравлічне транспортування керна на поверхню по каналу, що сполучає вибійний снаряд з поверхневим устаткуванням.

Приведеними технічними рішеннями далеко не вичерпуються усі можливі варіанти технологічної схеми буріння кулеструминним способом.

Процеси, що відбуваються в кулеструминному апараті, можуть бути описані такими рівняннями [15]:

1) законом збереження маси

$$G_{зм} = G_p + G_{ін}, \quad (1)$$

де  $G_{зм}, G_p, G_{ін}$  – вагові витрати змішаного, робочого та інжектваного потоків;

2) законом імпульсів, який для розрахунку кулеструминних апаратів може бути представлений в такому вигляді:

$$\frac{1}{g} \left[ G_p u_{p2} + G_{ін} u_{ін2} - (G_p + G_{ін}) u_3 \right] = p_3 f_3 - (p_{p2} f_{p2} + p_{ін3} f_{ін3}), \quad (2)$$

де  $u_{p2}, u_{ін2}, u_3$  – швидкості робочого та інжектваного потоків у вхідному перерізі циліндричної камери змішення і змішаного потоку у вихідному перерізі цієї камери;  $p_{p2}, p_{ін2}, p_3$  – статичні тиски робочого та інжектваного потоків у вхідному перерізі циліндричної камери змішення і змішаного потоку у вихідному перерізі цієї камери;  $f_{p2}, f_{ін2}, f_3$  – площа перерізу робочого та інжектваного потоку при виході в камеру змішення і змішаного потоку на виході.

Основною втратою в струминних апаратах є така на удар, що пов'язана із змішенням двох співісних потоків з різними початковими швидкостями.

Питома втрата на удар, віднесена до одиниці витрати суміші дорівнює

$$E = \frac{1}{2g} \frac{n^2}{(1+n)^2} (u_p - u_{ін2})^2, \quad (3)$$

де  $n$  - коефіцієнт інжекції.

За взаємодії окремої породоруйнівної кулі із вибоєм відбувається формування початкової контактної поверхні в основному за рахунок пластичних деформацій (область 1, рис. 1, а). Вказаний етап нетривалий, після нього починається пружна деформація кулі і гірської породи (рис. 1, б). Величина пружних деформацій породоруйнівної кулі і гірської породи в сумі складають величину зближення контактуючих ударом тіл  $a$ . Враховуючи те, що швидкість куль у момент зіткнення може досягати 40 - 70 м/с і що при таких швидкостях прикладення навантаження гірські породи втрачають пластичні властивості, можна припустити наступне: породи до самого моменту крихкого руйнування деформуватимуться пружно [16].

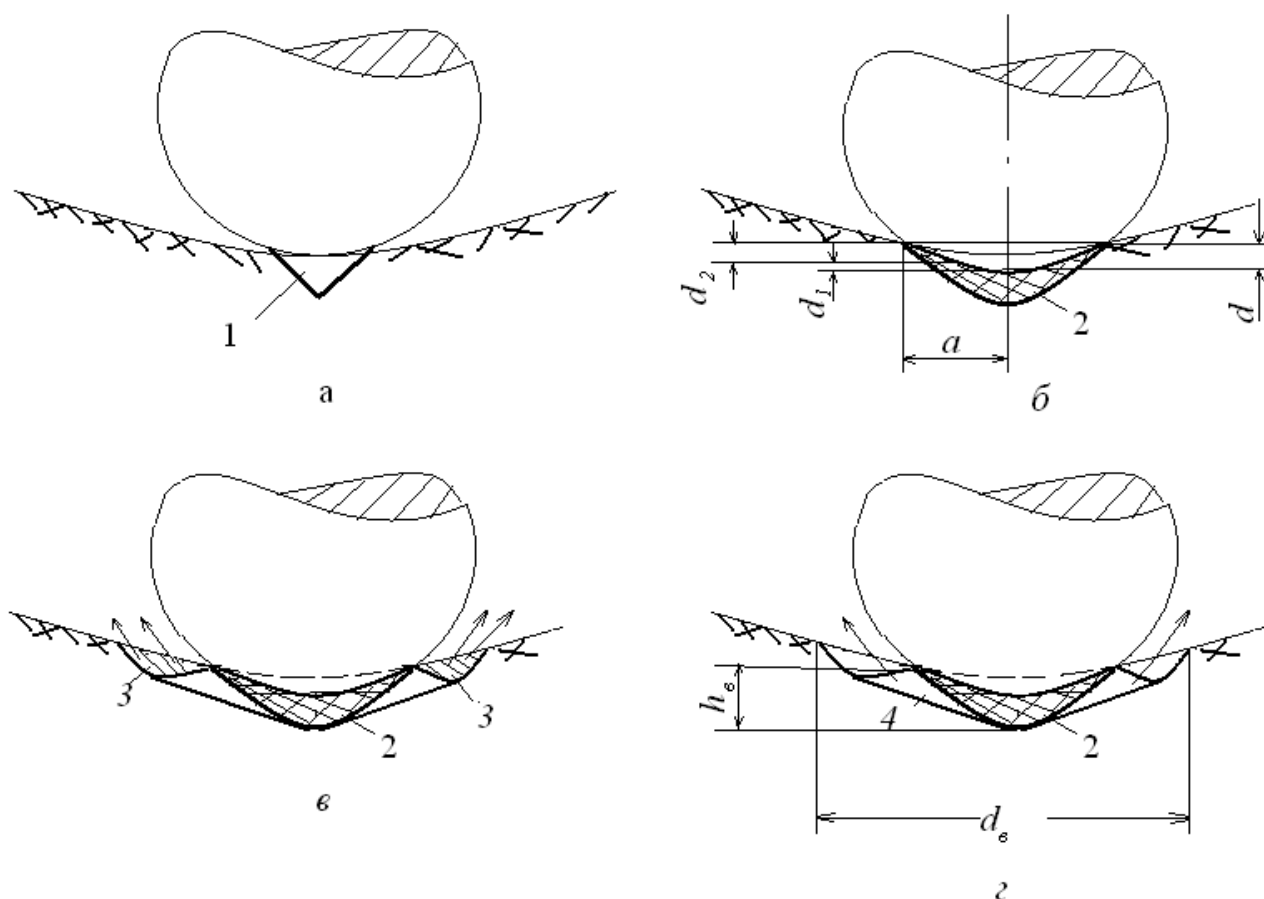


Рис. 1. Механізм утворення елементарної воронки руйнування при зіткненні кулі із вибоєм свердловини кулеструминного буріння

Перед самим моментом крихкого руйнування радіус контактної майданчика максимальний і рівний  $a$ . Безпосередньо під контактною поверхнею порода знаходиться в умовах сильного усебічного стискування і є як би наростом на вдавленій частині кулі, що розсовує прилеглі до нього об'єми породи у бік нових поверхонь – іншими словами це так зване «ущільнене ядро» 2.

Гірська порода руйнується при досягненні розтягуючою напругою своїх граничних значень в межах контактної контура. Проявляється це шляхом виколування кільцевих об'ємів 3 по концентричних тріщинах за межами контура тиску (рис. 1, в). Загальною закономірністю руйнування крихких тіл при втискуванні сферичних інденторів є те, що нормальна напруга розриву на поверхні тіл досягає своїх максимальних значень раніше, ніж дотична напруга усередині тіла.

Внаслідок розклинюючої дії «ущільненого ядра» на навколишню породу за наявності новоутворених поверхонь відбувається завершальний акт процесу утворення воронки руйнування – сколювання породи в кільцевій зоні 4 (рис. 1, г). Майже одночасно з цим матеріал «ущільненого ядра» дробиться в тонкий порошок. Утворюється воронка руйнування діаметром  $d_e$  і завглибшки  $h_e$ .

Відомо, що при руйнуванні гірської породи у водному середовищі утворюється різниця тисків на вільну і на знову утворювану поверхню, причому її значення залежить від величини гідростатичного тиску, швидкості відриву елемента від масиву, в'язкості рідини, її густини і інших чинників. Робота інструменту



у водному середовищі вимагає певних витрат енергії на переміщення зруйнованої породи і подолання гідродинамічного опору руху самого інструменту [17].

Тиск на вибої свердловини обумовлений наявністю стовпа промивальної рідини, при цьому, якщо промивальна рідина знаходиться в нерухомому стані, тиск називається гідростатичним, якщо потік рідини знаходиться в русі, то тиск є гідродинамічним. Оскільки при бурінні свердловини промивальна рідина повинна забезпечувати промивання останньої, тобто переміщатися, то на вибій діятиме гідродинамічний тиск. У загальному випадку вплив тиску промивальної рідини чинить складну дію, що є комбінацією гідростатичного і гідродинамічного тисків.

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, залежного від напрямку, швидкості і гідравлічного характеру руху потоку рідини [18].

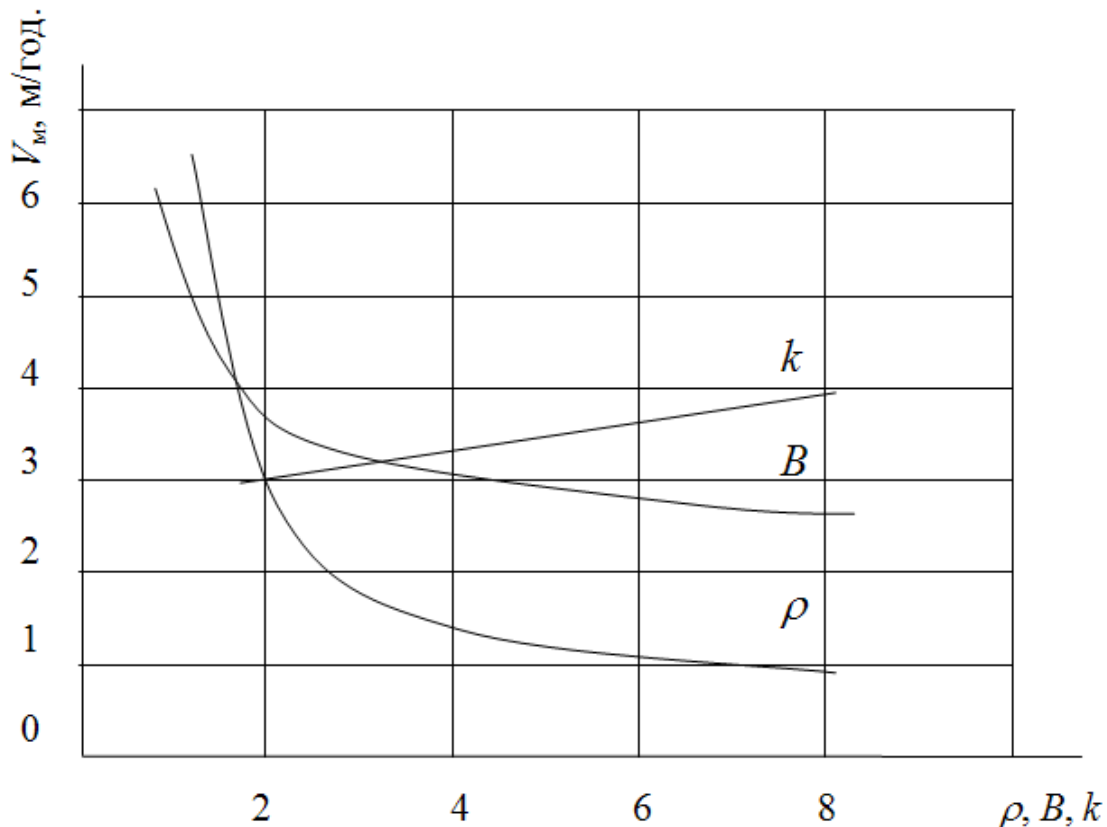


Рис. 2. Кількісні залежності механічної швидкості буріння від показників властивостей бурового розчину

Обґрунтовано встановлено, що із збільшенням гідростатичного тиску відбувається зменшення об'єму зруйнованої породи. Оскільки механічна швидкість буріння знаходиться в прямій залежності від об'єму зруйнованої породи, то найбільше зниження механічної швидкості буріння спостерігається в інтервалі тисків 30 - 50 МПа. При бурінні на стенді високого тиску в умовах гідростатичного

тиску 35 МПа швидкість буріння виявилася нижче, ніж при атмосферному тиску: в глинистих сланцях на 76 - 98%, у вапняку на 50%, для доломіту на 22%. Встановлено також, що при збільшенні тиску з атмосферного до 50 МПа об'єм лунки виколування зменшується, в порівнянні з атмосферним, приблизно у 8 разів. Досліджено наявність істотного впливу гідростатичного тиску на зусилля різання. Наприклад, при збільшенні гідростатичного тиску до 2 МПа, зусилля різання для глини зростають, залежно від товщини зрізу і кута різання, в 2,8 - 5,7 рази [8].

На рис. 2 приведені залежності механічної швидкості буріння від показників властивостей бурового розчину. По осі абсцис відкладені відносні значення густини ( $\rho$ ), в'язкості ( $B$ ) і фільтрації ( $k$ ) в пропорційному відношенні.

Як випливає з графіка (рис. 2), наведені залежності далеко не рівнозначні. Найбільший вплив на механічну швидкість проходки чинить густина бурового розчину. Дія в'язкості помітна, але менш істотна. Збільшення коефіцієнта фільтрації призводить до пропорційного зростання механічної швидкості буріння.

Максимально досягнуто проходку за один елементарний акт руйнування можна отримати, якщо для очищення вибою застосовувати газоподібні агенти або промивальні розчини, що забезпечують мінімальний гідростатичний тиск у свердловині. Застосування продування або піноподібних агентів не набуло широкого розповсюдження, а їх застосування в основному диктується геологічними умовами буріння. В більшості випадків при бурінні свердловин як промивальний агент використовується розчин на водній основі. Саме тому фахівцями кафедри нафтогазової інженерії та буріння (НГІБ) Національного технічного університету (НТУ) «Дніпровська політехніка» запропоновано прогресивну конструкцію пневмомеханічного пристрою для буріння свердловин [19], схематичне зображення якого представлено на рис. 3.

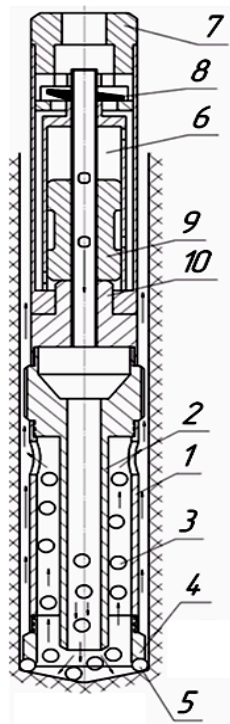


Рис. 3. Пристрій для кулеструминного буріння

Розглядуваний пристрій складається з корпусу 1, струминного апарату 2, породоруйнівних куль 3. Корпус у нижній частині оснащений коронкою 4, яка має в привибійній частині орієнтовані зубки з відповідними, виконаними на зовнішній поверхні коронки, глухими пазами 5, призначенням яких є надійне розташування та утримання породоруйнівних куль. Верхня частина корпусу 1 з'єднана з пневмоударником 6; функцією останнього є створення ударних імпульсів, які через корпус 1 передаються на коронку. Обертання пристрою, яке має лише підпорядковане значення, передається через перевідник 7, що з'єднується із колоною бурильних труб. Привод пневмоударника 6, який складається з основних конструктивних елементів: клапана 8, поршня 9, ковадла 10, здійснюється за допомогою стисненого повітря, що циркулює по колоні бурильних труб.

Надійність і стійкість роботи снарядів ударної дії повністю залежить від дотримання усіх технологічних характеристик як струминних апаратів, так і приводних двигунів. Тому всі гідравлічно-пневматичні й руйнівні процеси, що протікають у відповідних пристроях мають бути повністю узгоджені [20]. Коефіцієнт перетворення кінетичної енергії поршня-ударника можна записати у виді:

$$E_0 = \frac{A_2}{A_k} \leq 1, \quad (4)$$

де  $A_2$  – енергія головної частини ударного імпульсу, яка дорівнює

$$A_2 = \frac{F_m}{\rho c} \int_0^{t_1} \sigma_m^2(t) dt; \quad (5)$$

$A_k$  – кінетична енергія поршня-ударника, визначувана за рівнянням

$$A_k = \frac{mv_y^2}{2g}; \quad (6)$$

$\sigma_m$  – амплітудне значення напруги в головній частині ударного імпульсу

$$\sigma_m = \frac{\rho c \mathcal{G}_y F_m}{g(F_y + F_m)}; \quad (7)$$

$t_1$  – тривалість головної частини ударного імпульсу в часі

$$t_1 = \frac{2l_y}{c}, \quad (8)$$

де  $l_y$  – довжина ударника (обважнювача);  $\rho$  – щільність матеріалу елементів ударної системи;  $c$  – швидкість звуку в елементах ударної системи;  $F_\delta$  – площа поперечного перерізу ударника (обважнювача);  $F_m$  – площа поперечного перерізу тіла приєднувальної труби;  $\mathcal{G}_y$  – швидкість зіткнення поршня-ударника з ковадлом (хвостовиком);  $m$  – маса поршня-ударника;  $g$  – прискорення сили тяжіння.

Тиск на вибої свердловини (рис. 4) залежить від густини промивальної рідини і може значно перевищувати значення гідростатичного тиску. Таким чином видно, що значну роль в ефективності процесу руйнування грає характер промивання. Крім того, приблизний підрахунок показує, що тиск на вибої свердловини досягає десятків МПа, а це суттєво позначається на енергоємності руйнування гірської породи [8].

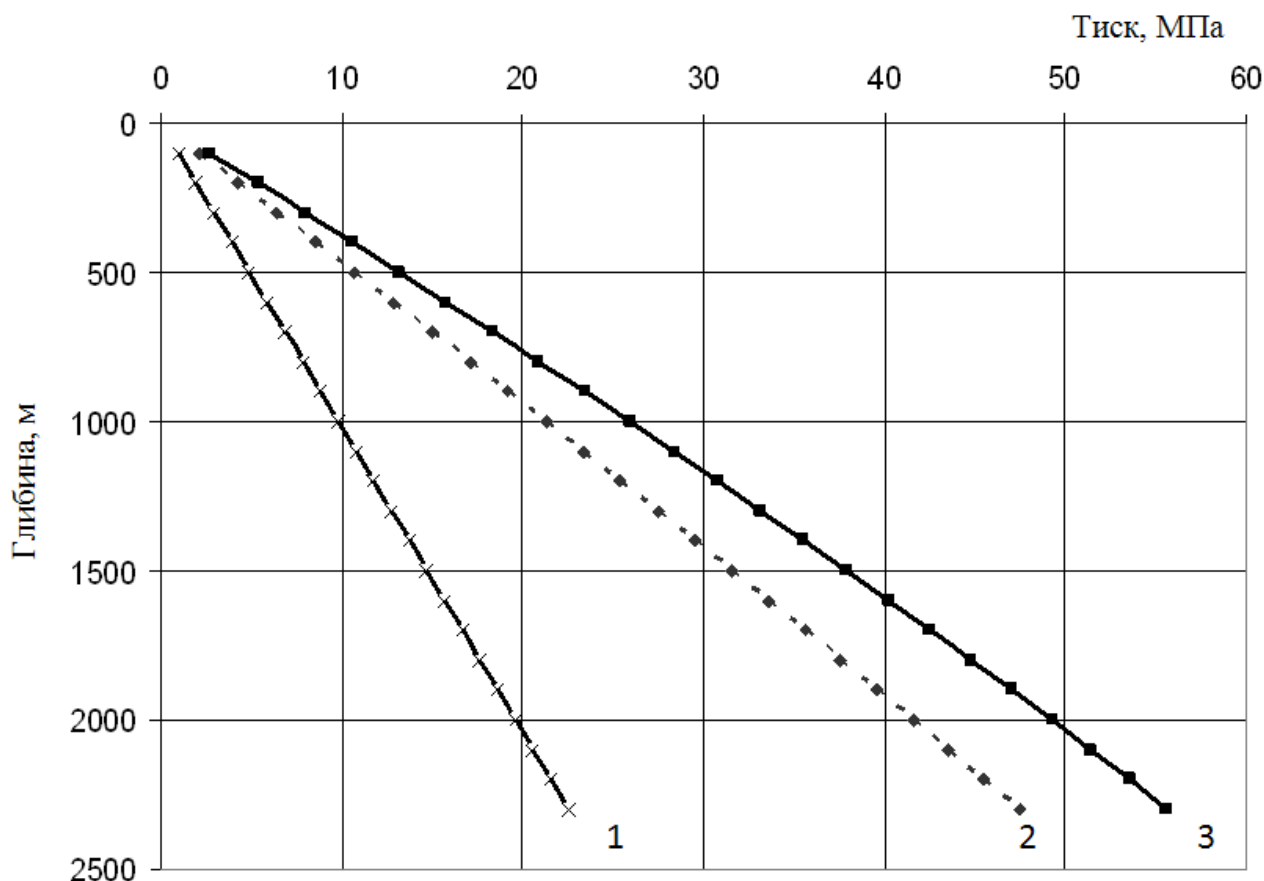


Рис. 4. Залежність тиску промивальної рідини, при її циркуляції, від глибини свердловини та густини промивальної рідини: 1 – гідростатичний тиск; 2 – сумарний тиск на вибої, в процесі циркуляції промивальної рідини (густина промивальної рідини  $1000 \text{ кг/м}^3$ ); 3 – сумарний тиск на вибої, в процесі циркуляції промивальної рідини (густина промивальної рідини  $1500 \text{ кг/м}^3$ )

Серія дослідів з вивчення механізму руйнування відривом елементу породи від масиву проводилася на вапняку, мрамурі і граніті. При відриві елементу від зразка породи утворюється конусоподібне поглиблення, відповідне розмірам відірваного елементу. Його діаметр по поверхні зразка, є діаметром більшої основи відірваного елементу  $D$ . На рис. 4 показані перерізи відірваного елементу у вертикальній площині для випробовуваних матеріалів [7].

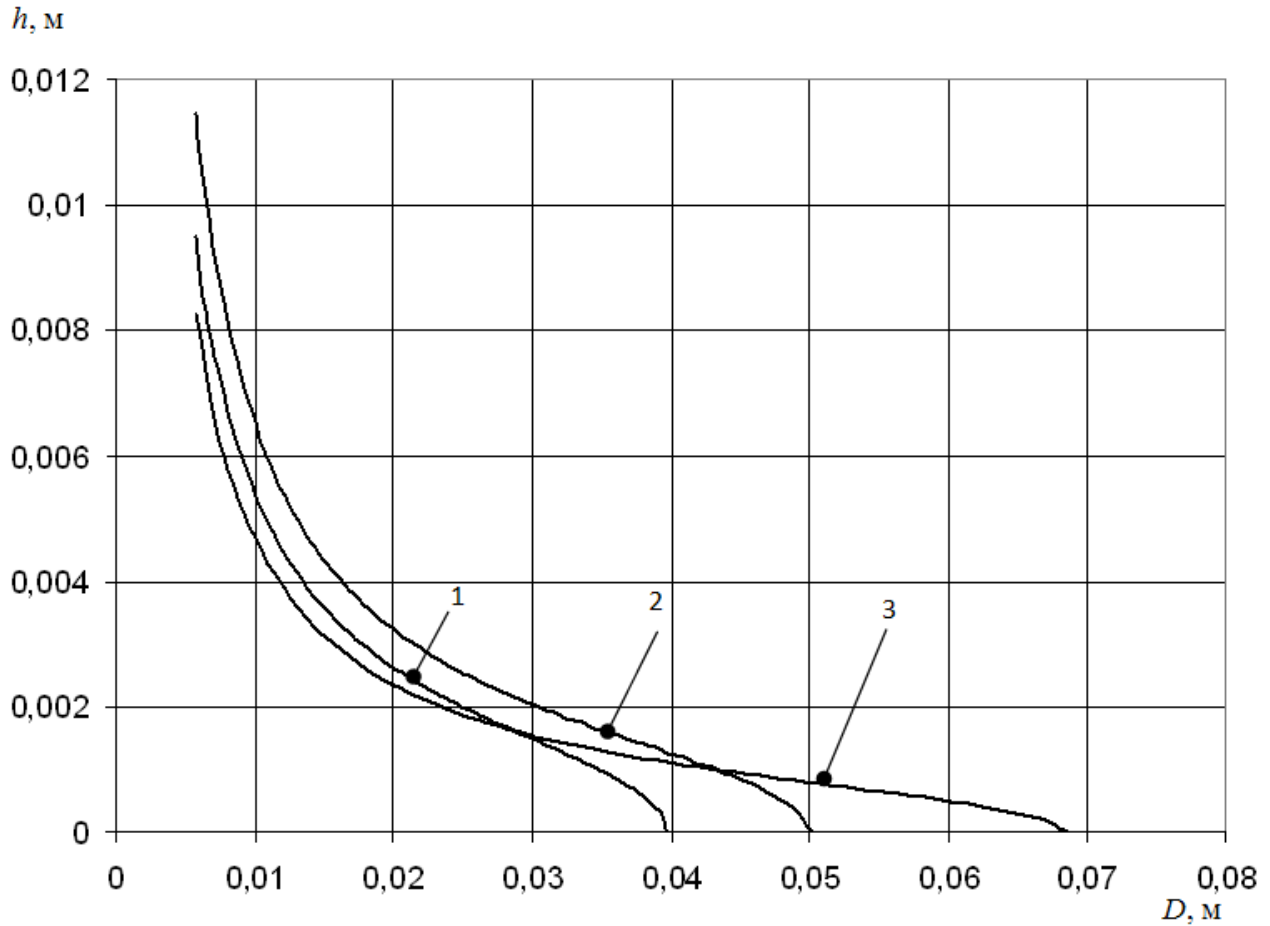


Рис. 5. Профіль елемента, що знову утворюється, при відриві його від масиву (повітряне середовище): 1 – вапняк; 2 – мармур; 3 – граніт

Як показали проведені дослідження, знову утворювана поверхня руйнування під впливом зосередженого навантаження  $P_y$  має неоднорідний вигляд, що пов'язано з анізотропією матеріалу, наявністю мікроскопічних тріщин і інших дефектів (рис. 6).

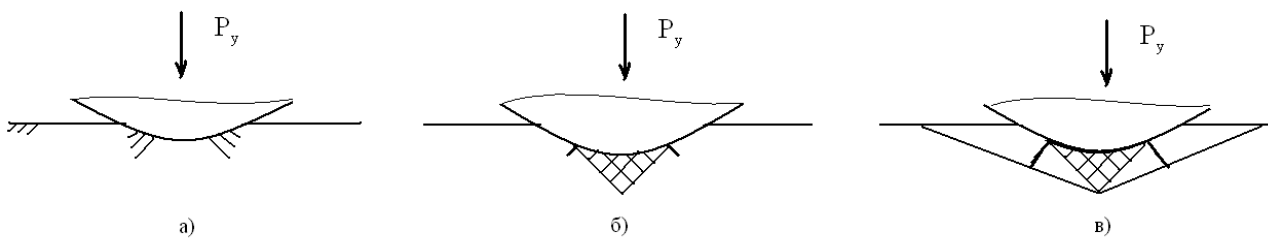


Рис. 6. Схема розвитку процесу руйнування поверхні одиничною кулькою

Очевидно, що при збільшенні швидкості буріння збільшується швидкість відділення часток породи від масиву [5]. При цьому росте різниця тисків між тиском на вільну поверхню відокремленого елемента і знову утвореною.

**Висновки.** У роботі розглянуті техніко-технологічні питання абразивно-механічного ударного способу буріння з урахуванням впливу зовнішніх чинників.

Як пріоритетні напрямки вдосконалення гідромеханічного способу буріння вибрані мінімізація енергоємності процесу руйнування і скорочення витрат на допоміжні операції. Наявність тісного зв'язку між відміченими обставинами, що визначають ефективність процесів руйнування порід, робить неможливим подальше удосконалення процесів буріння без досить повного і послідовного вивчення усіх явищ, що відбуваються на вибої. Досліджувані конструкції моделей снарядів абразивно-механічного ударного буріння є повністю оригінальними роботами авторів. Основою проведення усіх конструкторсько-дослідницьких робіт було вивчення значного числа джерел, в тій чи іншій мірі присвячених питанням руйнування гірських порід і іншим суміжним напрямкам.

#### Перелік посилань

1. Vaddadi, N. (2015). *Introduction to oil well drilling*. Bathos publishing.
2. Hossain, M.E., & Al-Majed, A.A. (2015). *Fundamentals of sustainable drilling engineering*. Scrivener publishing.
3. Войтенко, В., & Вітрик, В. (2012). *Технологія і техніка буріння*. Центр Європи.
4. Hossain, M.E. (2016). *Fundamentals of drilling engineering*. Scrivener publishing.
5. Давиденко А.Н., & Игнатов А.А. (2013) *Абразивно-механическое ударное бурение скважин*. Держ. вищ. навч. закл. «Нац. гірн. ун-т».
6. Калинин, А.Г. (2008). *Бурение нефтяных и газовых скважин*. ЦентрЛитНефтеГаз.
7. Давиденко, А.Н, Ратов, Б.Т, & Пащенко, А.А.(2018). *Влияние гидростатического давления на ударное абразивно-механическое бурение скважин*. Каспийский общественный университет.
8. Давиденко, А.Н, Дудля, Н.А., & Хоменко, В.Л. (2010). *Разрушение горных пород планетарными долотами в условиях действия гидростатического давления*. вищ. навч. закл. «Нац. гірн. ун-т».
9. Curry, G.L. & Feldman, R.M. (2012). *Manufacturing systems. Modeling and analysis*. Springer.
10. Білецький, В.С., Орловський, В.М., & Вітрик, В.Г. (2018). *Основи нафтогазової інженерії*. АСМІ.
11. Коровяка, Є.А., & Игнатов, А.О. (2020). *Прогресивні технології спорудження свердловин*. НТУ «ДП».
12. Калинин, А.Г., Ошкордин, О.В, & Питерский, В.М. (2000). *Разведочное бурение*. Недра.
13. Коровяка, Є.А., Хоменко, В.Л., Винников, Ю.Л., Харченко, М.О., & Расцветаев, В.О. (2021). *Буріння свердловин*. Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка».
14. Давиденко, А.Н., Игнатов, А.А., & Полищук, П.П. (2016). *Транспортировка продуктов разрушения при бурении скважин*. Держ. вищ. навч. закл. «Нац. гірн. ун-т».
15. Штеренлихт, Д.В. (1984). *Гидравлика*. Энергоатомиздат.
16. Черепанов, Г.П. (1987). *Механика разрушения горных пород в процессе бурения*. Недра.
17. Гукасов, Н.А., & Кочиев, А.М. (1991). *Гидравлика в разведочном бурении*. Недра.
18. Чугаев, Р.Р. (1982). *Гидравлика*. Энергоиздат.
19. Игнатов, А.О. (2015). *Пристрій для буріння*. (Патент № 109274)
20. 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>

#### АННОТАЦИЯ

**Цель.** Разработка теоретических основ, конструктивной схемы и методики расчета режимно-технологического сопровождения процессов сооружения скважин в условиях использования модернизируемых устройств абразивно-механического ударного способа разрушения горного массива.

**Методика дослідження.** Теоретическіе і лабораторніе дослідження особеностей функціонування пристроїв абразивно-механіческогo ударногo способу руйнування горногo масива, виконано с применением современных методов аналитического анализа и экспериментальных исследований, в частности путем использования общих принципов математического и физического моделирования, методик обработки результатов исследований в среде EXCEL, MATHCAD, контрольно-измерительных приборов и материалов. Протекание скважинных забойных буровых процессов моделировалось на экспериментальных скважинах учебного бурового полигона Национального технического университета «Днепровская политехника» с применением бурового станка ЗИФ-650М и буровой установки УКБ-4П, а также соответствующего бурового и вспомогательного инструмента.

**Результаты исследования.** Детальным анализом конкретных работ и исследований показана перспективность разработки методов гидромеханического бурения, эффективных как с позиций механики разрушения, так и энергоемкости процесса. Установлена необходимость определения физической сущности явлений, происходящих при отделении элемента горной породы от массива в условиях внешнего давления, что в свою очередь позволит определять наиболее рациональные параметры разрушения горной породы на забое скважины, то есть максимальную производительность при минимальных затратах энергии. Изучены основополагающие принципы механизма разрушения горных пород ударами шаров с выводом важнейших аналитических зависимостей характеризующих забойные процессы формирования скважины.

**Научная новизна.** Обозначен основной критерий, определяющий эффективность разрушения горных пород – энергоемкость отделения элемента от массива, которая является собственной характеристикой материала и отражает затраты энергии на отделение некоторого объема от массива.

**Практическое значение.** Показан механизм взаимодействия основных деталей и узлов разработанных буровых снарядов, обеспечивающий достижение рациональных показателей процесса сооружения скважин в соответствующих горно-геологических условиях. Сформулированы теоретические и практические основы работы механического породоразрушающего органа разрабатываемых устройств. Выявлены основные параметры процесса разрушения горных пород в воздушной и водной средах. Выделены принципы и методы установления влияния гидростатического давления на эффективность разрушения горных пород при абразивно-механическом ударном бурении.

**Ключевые слова:** бурение скважин, гидромеханическое бурение, промывочная жидкость, горная порода, шар, механическая скорость углубки, пневмомеханический снаряд, забой, горный массив, ствол скважины.

#### ABSTRACT

**Purpose.** Development of theoretical foundations, constructive schemes and methods for calculating the regime and technological support of well construction processes in the conditions of using the modernized devices of the abrasive-mechanical shock method of destruction of the rock mass.

**Research methodology.** Theoretical and laboratory studies of the features of the functioning of devices of the abrasive-mechanical shock method of destruction of a rock mass, carried out using modern methods of analytical analysis and experimental research, in particular by using the general principles of mathematical and physical modeling, methods of processing research results in the EXCEL, MATHCAD, control and measuring instruments and materials. The flow of downhole drilling processes was simulated on the experimental wells of the training drilling area of the Dnipro University

of Technology using the ZIF-650M drilling rig and the UKB-4P drilling rig, as well as the corresponding drilling and auxiliary tools.

**Research results.** A detailed analysis of specific works and research shows the prospects for the development of hydromechanical drilling methods that are effective both from the standpoint of fracture mechanics and the energy intensity of the process. The necessity of determining the physical essence of the phenomena occurring during the separation of a rock element from a massif under external pressure conditions has been established, which in turn will make it possible to determine the most rational parameters of rock destruction at the bottom of a well, that is, maximum productivity with minimum energy consumption. The fundamental principles of the mechanism of destruction of rocks by impacts of balls have been studied with the derivation of the most important analytical dependences characterizing the downhole processes of well formation.

**Originality.** The main criterion that determines the efficiency of destruction of rocks is indicated - the energy intensity of separating an element from the massif, which is an intrinsic characteristic of the material and reflects the energy consumption for separating a certain volume from the massif.

**Practical implications.** The mechanism of interaction of the main parts and assemblies of the developed drilling equipment is shown, which ensures the achievement of rational indicators of the process of well construction in the corresponding mining and geological conditions. The theoretical and practical foundations of the operation of the mechanical rock-cutting body of the devices being developed are formulated. The main parameters of the process of destruction of rocks in air and water environments have been clarified. The principles and methods of establishing the influence of hydrostatic pressure on the efficiency of destruction of rocks during abrasive-mechanical percussion drilling are highlighted.

**Keywords:** *well drilling, hydromechanical drilling, flushing fluid, rock, ball, mechanical speed of the deepening, pneumatic mechanical tool, bottomhole, rock mass, wellbore.*