

УДК 622.24.026

## НОВЕ У ВИРІШЕННІ ПРОБЛЕМ БУРИМОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

<sup>1</sup> Е.М.Барановський, <sup>2</sup> В.М.Мойсишин

<sup>1</sup> Комплексна лабораторія технології буріння та кріплення свердловин ПВ УкрДГРІ; 79018, м. Львів, вул. Тургенєва, 33; к. 45; тел. (032) 2373126; e-mail: pvukrdgri@mail.lviv.ua

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

*Рассмотрены основные направления оценки буримости горных пород, а также методики оптимизации режима роторного бурения разными типами долот. Предложены формулы для определения удельной энергии механического разрушения породы при бурении сплошным и кольцевым забоем. Установлен характер зависимости удельной энергии механического разрушения породы от механической энергии, подводимой к долоту. Предложена методика определения эффективности комбинированного разрушения породы в зависимости от соотношения удельной механической энергии разрушения породы и удельной потенциальной энергии изменения объема.*

*In the paper the reference directions of a rating of drillability of rocks and also technique of optimization of the mode of rotary drilling by different types of chisels are reviewed. The formulas for definition of specific energy of mechanical corrupting of breed are proposed at boring by a continuous and ring drift. The nature of dependence of specific energy of mechanical corrupting of breed from mechanical energy brought to a chisel is installed. The technique of definition of efficiency of combined corrupting of breed is proposed depending on a status of specific mechanical energy of corrupting of breed and specific potential energy of change of size.*

Одним із основних чинників, який визначає ефективність руйнування гірських порід при бурінні свердловин є їх буримість. Під буримістю розуміють ступінь труднощі руйнування тих чи інших гірських порід. В деяких випадках її визначають як здатність породи руйнуватися на вибої під дією зовнішніх сил, прикладених до породоруйнівного інструменту.

Буримість гірських порід є функцією багатьох змінних, залежних від природних, технологічних і технічних чинників. Правильна оцінка буримості необхідна для встановлення оптимальних параметрів режиму буріння, вибору типу доліт та нормування бурових робіт.

На сьогодні існують два напрямки в класифікації гірських порід за буримістю. Один напрямок базується на використанні виробничих показників, а другий — на механічних властивостях гірських порід. У першому випадку за одиницю виміру буримості приймається величина проходки або швидкість буріння, отримана при бурінні. В роботі [1] В.С.Федоров пропонує оцінювати буримість величиною поглиблення свердловини за одну годину чистого буріння, тобто величиною механічної швидкості проходки. Частіше буримість оцінюють за початковою швидкістю в початковий момент розбурювання породи. Якщо буріння проводиться в режимі, який забезпечує об'ємне руйнування породи, то ця величина буде обернено пропорційною до твердості. Фактична швидкість буріння залежить не тільки від параметрів режиму буріння, але й від розміру конструктивних особливостей і матеріалу долота, абразивних та інших властивостей порід.

Інакше до вирішення буримості гірських порід підходить М.Г.Бінгхем [2]. Він вважає, що вирішення її необхідно будувати на базі статистичної обробки великої кількості експе-

риментальних і фактичних даних буріння, пов'язаних з міцністю розбурюваних порід. Буримість порід М. Г. Бінгхем пропонує оцінювати за допомогою графіків залежності проходки за один оберт долота від питомого осьового навантаження.

Значення даної роботи полягає в тому, що в ній відображено порівняльні з промисловими даними результати стендових досліджень в умовах, які відтворюють вибірні. Результати цих досліджень і спостережень стали основою розроблених методик з оптимізації режиму роторного буріння різними типами доліт.

Розглянемо декілька із них, що заслуговують уваги. У методиці, викладеній у роботі [3], автор виходить з того, що при виборі раціонального типу долота для конкретної породи необхідно мати такі показники:

- вартість 1 м проходки;
- питому енергію руйнування породи;
- зношення долота;

– результати роботи доліт і геологічні дані сусідньої свердловини. Для визначення вартості 1 м проходки запропоновано формулу

$$C_m = \frac{C_d + (t_{cn} + t_\delta)C_2}{L_i}, \quad (1)$$

де:  $C_d$  – вартість долота;

$t_{cn}$  – час спуско-підйому;

$t_\delta$  – час буріння;

$C_2$  – вартість 1 години роботи бурової установки;

$L_i$  – довжина пробуреного інтервалу.

Аналіз даної формули свідчить, що вибір долота на основі мінімальної вартості 1 м проходки забезпечує найнижче значення  $C_m$  в

конкретних відкладах чи інтервалі буріння свердловини.

Простий практичний спосіб вибору раціонального типу долота пропонується за величиною питомої енергії, затраченої на механічне руйнування породи, яка визначається із залежності

$$u_p = 2,35 \frac{G \cdot n}{DV_m}, \quad (2)$$

де:  $G$  – осьове навантаження на долото;  
 $n$  – частота обертів долота;  
 $D$  – діаметр долота;  
 $V_m$  – механічна швидкість буріння.

Із залежності (2) видно, що для конкретного типу долота питома енергія може бути постійною при будь-якій комбінації величин  $G$  і  $n$ . Це відбувається внаслідок того, що зміни в добуток  $G \cdot n$  ведуть до збільшення механічної швидкості буріння. Для доліт конкретного типу існує певне раціональне співвідношення величин  $V_m$  і  $G \cdot n$ . Отже, питома енергія є мірою ефективності роботи долота в конкретних відкладах. Оскільки питома енергія порівняно з механічною швидкістю буріння менш чутлива до змін в  $G \cdot n$ , це дає змогу використовувати цю величину при виборі типу долота на практиці.

У другій методиці [4] для аналізу роботи долота вибрано три основних параметри — навантаження ( $G$ ), частоту обертання ( $n$ ) і гідравліку долота. Добуток навантаження і частоти обертання ( $G \cdot n$ ) є механічним чинником, який визначає механічну енергію для руйнування порід на вибої. Гідравліка долота — це гідравлічна енергія для руйнування порід на вибої, яка забезпечує видалення вибуреної породи з-під долота та підйом її на поверхню. Отже, якщо один із цих основних чинників змінюється, то ця зміна впливає на швидкість проходки. Всі інші чинники при аналізі приймаються незмінними. Кожному значенню  $G \cdot n$  відповідає визначене значення гідравлічної потужності, необхідної для очищення вибою. При недостатній потужності вибурана порода повторно перемелюється долотом, на що витрачається додаткова механічна енергія. Недостатня промивка також створює умови для затримки вибуреної породи у привибійній зоні, її ущільнення та утворення сальників, які знижують механічну швидкість [5].

Встановлено, що при заданому режимі буріння перемелювання порід починається тоді, коли збільшення  $G \cdot n$  не призводить до лінійного збільшення механічної швидкості буріння, а подальше збільшення параметра  $G \cdot n$  навіть зменшує швидкість проходки через значне перемелювання породи. Тому для вибору оптимального режиму буріння за даною методикою реєструються всі чинники і використовуються при бурінні глибоких свердловин. Чисельні теоретичні, лабораторні і промислові дослідження присвячені пошуку правильних відповідей на вирішення вказаних завдань. Однак в більшості з них розглядаються лише розділь-

ний вплив одного якогось чинника на показники роботи доліт.

В Україні, як і в інших республіках колишнього Радянського Союзу, не було діючих стелів, на яких можна було б випробувати долота в умовах, близьких до тих, що мають місце на вибої глибокої свердловини. Через це використання більшості висновків проведених робіт в повсякденній буровій практиці, як правило, не давало відчутних результатів. Окрім цього, переважна більшість свердловин бурилась турбінним способом, де єдиними реєстраційними параметрами режиму буріння були навантаження на долото і тиск на викиді насосів, що утруднювало узагальнення промислового досвіду буріння. Відсутність бази для порівняння промислових і стендових експериментів призвела до того, що довгий час в турбінному бурінні домінував чисто енергетичний підхід до встановлення оптимальних параметрів режимів, а також до вибору параметрів характеристик вибійних двигунів. Натомість сам механізм руйнування вибою свердловини вивчено недостатньо.

Слід відзначити, що існуючі методи вирішення проблеми буримості породи, які реалізуються в сучасній практиці буріння, не є достатніми. В перспективі для кращого розуміння явищ, які проходять при бурінні свердловин, М.Г.Бінгхем вважає можливим удосконалення даного процесу. Для цього необхідно отримати можливість передбачити результати буріння та знайти рівняння, які описують явища, що проходять при бурінні в промислових умовах. Ці рівняння повинні також віддзеркалювати взаємозв'язок між промивальною рідиною і породою через механічну швидкість проходки і зношення долота. Вирішення цього питання зможе значною мірою удосконалити процес буріння.

Розглядаючи проходку за один оберт долота, як показник ефективності буріння, він вважає, що з його допомогою можна знайти бажаний мінімум витрат енергії на буріння. Однак це не зовсім так, що підтверджується проведеними нами дослідженнями. На основі стендових випробувань в табл. 1 наведено дані зміни проходки за один оберт долота та питомої енергії механічного руйнування породи для різних типів доліт діаметром 140 мм в крейдяних відкладах [6]. Оскільки формула (2) не враховує фізико-механічні властивості породи, тип і конструкцію долота, в неї внесено відповідні зміни, в результаті чого вона має вигляд

$$u_p = 4 \frac{G \cdot n}{\kappa DV_m}, \quad (3)$$

де  $\kappa$  – коефіцієнт, який залежить від властивостей породи, типу і конструкції долота.

При бурінні кільцевим вибоєм формула набуває вигляду

$$u_p = 4 \frac{G \cdot n}{\kappa(D+d)V_m}, \quad (4)$$

де  $d$  – діаметр ядра.

Таблиця 1 — Проходка за один оберт долота та питома енергія механічного руйнування породи різними типами доліт

Швидкість обертання, хв. <sup>-1</sup>	Навантаження на долото, кН	Механічна енергія $G \cdot n$ , кН · хв	Тип долота											
			тришарошкове 4В-140С			алмазне АД6аС-140			одношарошкове ОДГ-140			фрезерне ДФТ-140		
			$V_m$ , м/ч	$V_m/n$ , см/об	$u_p$ , $10^3 \times \text{Дж/м}^3$	$V_m$ , м/ч	$V_m/n$ , см/об	$u_p$ , $10^3 \times \text{Дж/м}^3$	$V_m$ , м/ч	$V_m/n$ , см/об	$u_p$ , $10^3 \times \text{Дж/м}^3$	$V_m$ , м/ч	$V_m/n$ , см/об	$u_p$ , $10^3 \times \text{Дж/м}^3$
67	30	2010	3	0,08	32	0,6	0,02	169	5,5	0,14	18	5,0	0,12	19
	60	4020	8	0,20	98	1,3	0,03	602	11,0	0,27	70	10,0	0,25	77
128	30	3840	4,5	0,06	39	1,3	0,02	143	10,5	0,14	17,7	10,0	0,13	18
	60	7680	12	0,16	124	2,5	0,03	597	21,0	0,27	71	20,0	0,26	75
346	30	10380	9,5	0,05	53	5,0	0,02	99	15,5	0,07	32,5	16,0	0,08	31
	60	20760	28	0,14	145	10,0	0,05	398	31,0	0,15	129	40,0	0,19	102
720	30	21600	18	0,04	58	11,0	0,03	93	30,5	0,07	34,5	36,0	0,08	29
	60	43200	54	0,13	154	22,0	0,05	380	60,0	0,14	137	60,0	0,14	137

Отримані результати розрахунків представлено графіками (рис. 1-4) залежності питомої енергії руйнування породи від механічної енергії.

Із графіка, наведеного на рис. 1 видно, що для тришарошкового долота збільшення механічної енергії, яка підводиться до долота ( $G = \text{const}$ ,  $n \neq \text{const}$ ), призводить до збільшення питомої енергії, яка витрачена на механічне руйнування породи. При цьому відбувається зниження проходки за один оберт (див. табл. 1). При збільшенні механічної енергії  $G \cdot n$  ( $G \neq \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ ) збільшується як питома енергія механічного руйнування породи, так і проходка за один оберт долота.

Подивимось, чи узгоджуються результати стендових випробувань алмазних доліт з результатами випробувань тришарошкових доліт. За даними, наведеними в табл. 1, видно, що між результатами буріння алмазним і тришарошковим долотами існує чітка різниця. На графіку (рис. 2), який являє собою характер залежності питомої енергії механічного руйнування породи від механічної енергії, крива має зовсім іншу форму. Збільшення механічної енергії ( $G = \text{const}$ ,  $n \neq \text{const}$ ) призводить до зменшення питомої механічної енергії руйнування, а проходка за один оберт залишається постійною. При збільшенні механічної енергії за умов ( $G \neq \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ ) збільшується як питома механічна енергія руйнування, так і проходка за один оберт долота. Мабуть основна різниця між двома типами доліт (тришарошковими і алмазними), яка призвела до таких результатів, пояснюється різницею в геометрії доліт.

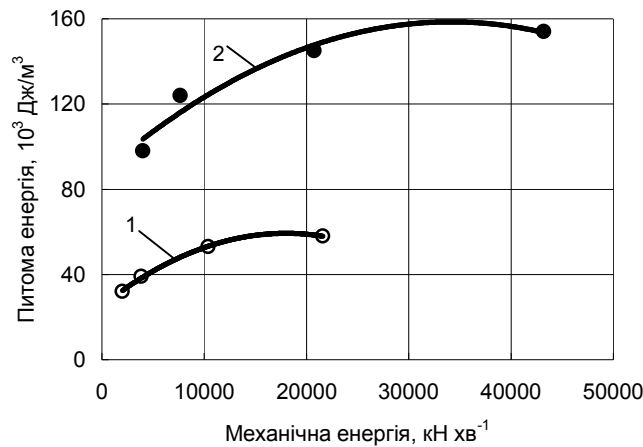
При бурінні одношарошковими долотами результати отримані такі ж, як і при бурінні тришарошковими долотами. Це видно з графіка

(рис. 3), на якому наведена крива, форма якої аналогічна кривій, представлених графіком на рис. 1. Аналогічна картина має місце при бурінні фрезерними долотами. На графіку (рис. 4) підтверджено встановлені закономірності для доліт даного типу. Таким чином, результати досліджень можуть бути подані кривими певної характерної форми. Ця сталість дає підстави зробити висновок про можливість знайти способи прогнозування результатів буріння. Крім цього, завдяки їм доведено, що проходка за один оберт долота аж ніяк не є тим показником, за яким можна знайти мінімальні витрати енергії на буріння.

Донедавна в галузі буріння гірські породи розглядалися з точки зору опірності руйнуванню як інертний матеріал, що ставало джерелом і причиною активації сил гірського тиску. Така характеристика порід давала можливість швидкого проходження конкретного інтервалу свердловини, незважаючи на очевидну роль ступеня стійкості її стінок.

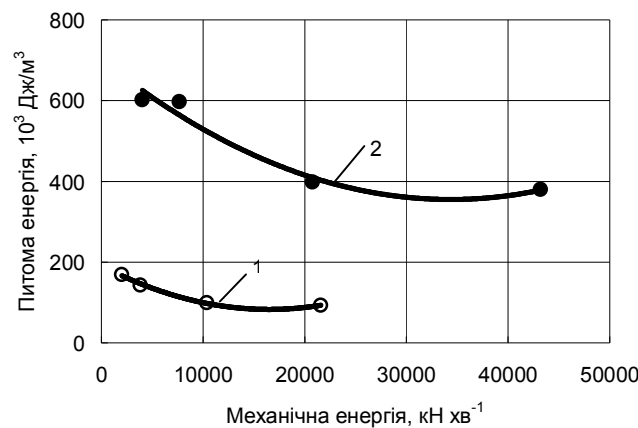
Однак проблема полягає в тому, щоб знати і бути здатним прогнозувати реакцію породи на механічне навантаження — руйнування під долотом і руйнування на стінці свердловини. Це класична задача геомеханіки, але розв'язати її не так просто. Теоретично вона розглядалась в багатьох публікаціях, але тільки в деяких із них йдеться про застосування теоретичних моделей в конкретних ситуаціях. Через це дана проблема досліджена з врахуванням невирішених питань, при цьому малось на увазі таке:

– аналіз енергетичної оцінки стану гірничого масиву [7] засвідчив, що він володіє енергією, яка активно проявляється у вигляді деформації і руйнувань в зонах, де породи перебувають в граничному стані;



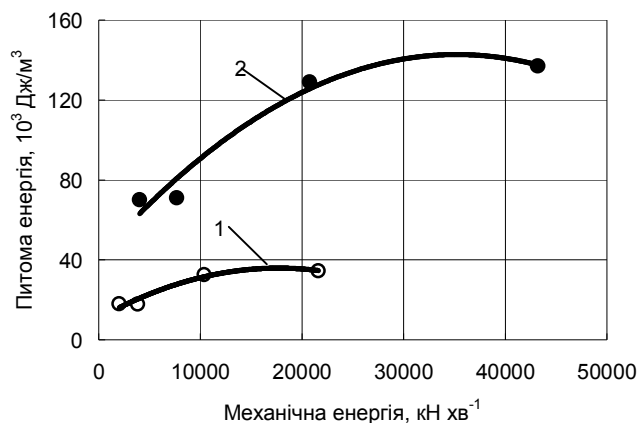
1 – для механічної енергії при  $G=30$  кН;  $n = 67, 128, 346, 720$  хв<sup>-1</sup>;  
 2 – для механічної енергії при  $G=60$  кН;  $n = 67, 128, 346, 720$  хв<sup>-1</sup>

**Рисунок 1** — Залежність питомої енергії руйнування гірської породи від механічної енергії, прикладеної до тришарошкового долота



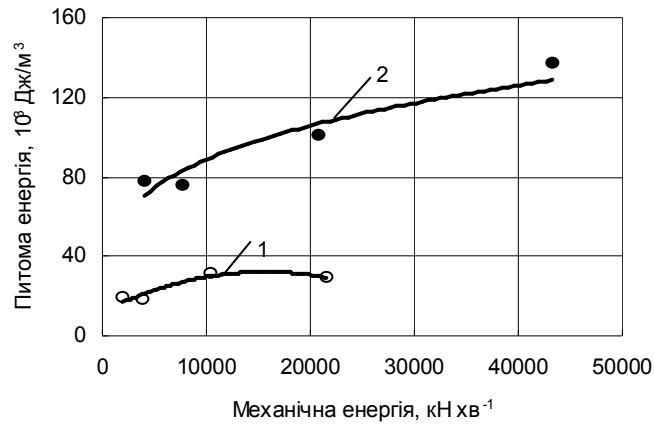
1 – для механічної енергії при  $G=30$  кН;  $n = 67, 128, 346, 720$  хв<sup>-1</sup>;  
 2 – для механічної енергії при  $G=60$  кН;  $n = 67, 128, 346, 720$  хв<sup>-1</sup>

**Рисунок 2** — Залежність питомої енергії руйнування гірської породи від механічної енергії, прикладеної до алмазного долота



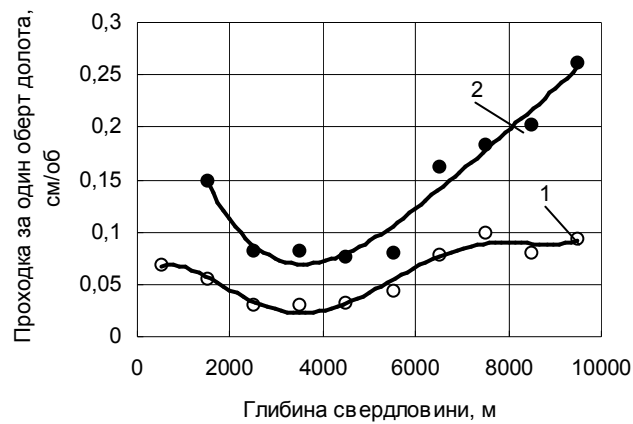
1 – для механічної енергії при  $G=30$  кН;  $n = 67, 128, 346, 720$  хв<sup>-1</sup>;  
 2 – для механічної енергії при  $G=60$  кН;  $n = 67, 128, 346, 720$  хв<sup>-1</sup>

**Рисунок 3** — Залежність питомої енергії руйнування гірської породи від механічної енергії, прикладеної до одношарошкового долота



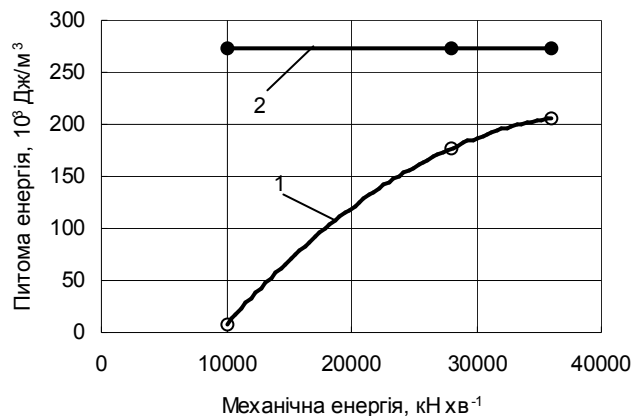
1 – для механічної енергії при  $G=30$  кН;  $n=67, 128, 346, 720$  хв<sup>-1</sup>;  
 2 – для механічної енергії при  $G=60$  кН;  $n=67, 128, 346, 720$  хв<sup>-1</sup>

**Рисунок 4** — Залежність питомої енергії руйнування гірської породи від механічної енергії, прикладеної до фрезерного долота



1 – навантаження 20 кН, частота обертання 500-700 хв<sup>-1</sup>;  
 2 – навантаження 80 кН, частота обертання 350- 500 хв<sup>-1</sup>

**Рисунок 5** — Залежність проходки за один оберт долота від глибини свердловини



1 – питома механічна енергія руйнування породи;  
 2 – питома потенціальна енергія зміни об'єму

**Рисунок 6** — Залежність проходки за один оберт долота

– за наявності відповідної кількості енергії можна отримати принципово новий спосіб комбінованого руйнування [8], в якому проходять два процеси — саморуйнування породи, що викликане накопиченою енергією в гірському масиві, і механічне руйнування, яке направлене на подрібнення породи.

Для одного типу долота при постійному навантаженні і незмінній твердості порід проходка за один його оберт змінюватись не повинна. Однак практика буріння Кольської надглибокої свердловини (СГ-3) цього не підтвердила. На основі експериментальних даних, отриманих на свердловині СГ-3, побудовано графік (рис. 5) на якому показано характер зміни проходки за один оберт долота із зростанням глибини свердловини. В інтервалі буріння від 0 до 5000 м спостерігається зниження її. При переході в зону архею (понад 6000 м) проходка за один оберт долота зростає. Це вказує на те, що з певної глибини на вибої свердловини відбувається процес ефективного комбінованого руйнування породи.

Розглянемо процес руйнування гірських порід, який проходить в гірничій виробці, більш детально. Встановлено, що частина енергії, яка накопичується в гірській породі під час буріння, витрачається на зміну об'єму, а частина на зміну форми. Таким чином, повна питома потенціальна енергія деформації дорівнює

$$u = u_{об} + u_{ф}, \quad (5)$$

де:  $u_{об}$  – питома потенціальна енергія, яка накопичується за рахунок зміни об'єму;

$u_{ф}$  – питома потенціальна енергія, яка накопичується за рахунок зміни форми елемента.

Для розрахунків стійкості вибою свердловини до саморуйнування взято вираз, який є умовою міцності породи до саморуйнування при дії питомої потенціальної енергії зміни об'єму [7]

$$u_{об} = \frac{1-2\mu}{6E} g^2 H^2 (9\rho_n^2 + 12\rho_n\rho_p + 4\rho_p^2) \leq \frac{1-2\mu}{6E} \sigma^2, \quad (6)$$

де:  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;

$E$  – модуль Юнга;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$H$  – глибина свердловини;

$\rho_n, \rho_p$  – густина породи і рідини відповідно;

дно;

$\sigma$  – допустиме значення нормального напруження, прийняте для лінійного розтягу або стиснення.

На підставі наведених формул зроблено відповідні розрахунки для свердловини СГ-3 в інтервалі буріння 6000-7000 м. Результати їх представлено графіком (рис. 6) залежності ефективності комбінованого руйнування породи від співвідношення питомої механічної енергії руйнування породи і питомої потенціальної енергії зміни об'єму. Механічна енергія підво-

дилась до долота за умов  $G \neq const, n \neq const$ . За умови, що в інтервалі буріння  $u_{об} = const$ , збільшення механічної енергії, яка підводиться до долота, веде до збільшення питомої енергії затраченої на механічне руйнування породи. В результаті падіння величини  $\Delta u = u_{об} - u_p$  відбувається зниження ефективності комбінованого руйнування породи. Таким чином, для отримання даного процесу в оптимальному режимі величина питомої потенціальної енергії зміни об'єму повинна бути регульованою.

Отримані результати досліджень суттєво змінили рівень наукового пізнання механізму руйнування вибою свердловини на великих глибинах. Практичне значення їх полягає не тільки в можливості визначення енергетичних витрат при різних способах руйнування гірських порід, але й у вдосконаленні способів проведення гірничих виробок з урахуванням закономірностей руйнування гірських порід.

### Література

1. Спивак А.И. Механика горных пород. – М.: Недра, 1967. – 192 с.
2. Проблемы буримости горных пород (Обзор зарубежной литературы). – М.: ВНИИОЭНГ, 1966. – 125 с.
3. Рабиа Х. Технология бурения нефтяных скважин: Пер. с англ. – М.: Недра, 1989. – 413 с.
4. Увеличение механической скорости проходки за счет оптимизации режимов бурения // Нефтяная промышленность. Сер.: Бурение. Экспресс-информация. Зарубежный опыт. – М.: ВНИИОЭНГ, 1967. – Вып. 8. – С.11-12.
5. Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей): Пер. с англ. – М.: Недра, 1985. – 509 с.
6. Симонянц Л.Е. Разрушение горных пород и рациональная характеристика двигателей для бурения. – М.: Недра, 1966. – 226 с.
7. Барановський Е.М. Енергетична оцінка стану гірського масиву при бурінні глибоких свердловин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ, 2005. – Вип. 1(14). – С.34-39.
8. Зорин А.Н., Халимендик Ю.М., Колесников В.Г. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых. – М.: Недра, 2001. – 413 с.