

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSIS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 620.9

DOI 10.20535/1813-5420.3.2022.271495

Н.І. Жукова, канд. техн. наук, доц. ORCID 0000-0002-4215-6981
А.І. Крючков, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-2234-0546
С.В. Зайченко, д-р техн. наук, проф, ORCID 0000-0002-8446-5408
В.Г. Смоляр, інженер ORCID 0000-0002-0355-0353
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЦІНКА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ БУРОВОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ БУРІННІ СВЕРДЛОВИН НА ЗАКАРСТОВАНИХ ПОРОДНИХ БЛОКАХ

Статтю присвячено аналізу витрат енергії у процесі буріння свердловин в закарстованих породних блоках. В роботі наведено результати експериментальних та аналітичних досліджень процесу буріння та витрат енергії на руйнування масивів гірських порід зі складною структурою, яка характеризується наявністю карстових порожнин. Проведено моніторинг роботи бурового станка в процесі буріння закарстованого блоку гірських порід. В статті для оцінки рівня енергоспоживання буровим станком запропоновано використання критерію енергоємності процесу буріння свердловин. На основі проведених досліджень встановлена залежність потужності обертача бурового станка від продуктивності буріння свердловин та визначена залежність питомої енергоємності буріння гірської породи від продуктивності буріння.

Результати проведених аналітичних і експериментальних досліджень з визначення геологічних структур колонок свердловин за енергоємністю процесу їх буріння дозволяють розробляти конструкції свердловинних зарядів для ефективного та безпечного руйнування складноструктурних масивів гірських порід.

Ключові слова: енергоспоживання, енергоємності буріння, потужність буріння, свердловина, карстові порожнини.

Вступ. Енергоспоживання при бурінні різноміцнісних масивів порід по глибині залежить від природних факторів, таких як міцність корінних порід (корисних копалин) та розміщених в них карстових порожнин тощо. Для оцінки рівня енергоспоживання буровим станком слід встановити критерій, за яким можна визначити цей рівень. Дані можливо отримати від моніторингу роботи бурового інструменту в процесі буріння свердловин.

Розв'язання задачі вибору критерію енергоємності технологічних процесів буріння свердловин на блоці можливе за умови оцінки витрат енергоспоживання в залежності від міцності і структури по глибині свердловини, яку проходить буровий інструмент. Єдиним кількісним показником, який в значній мірі може відображати як властивості пробурених порід, так і параметри процесу, є критерій енергоємності. В якості такого критерію для оцінки рівня енергоспоживання можливо прийняти питому енергоємність [1, 2, 3].

Мета та завдання. Метою дослідження є розробка критерію для оцінки рівня енергоспоживання бурового інструменту та дослідження фізичних процесів, які відбуваються при його взаємодії з корінними гірськими породами й шарами пустих порід.

Матеріал і результати досліджень. Для розв'язання поставленої задачі проведено дослідження процесу буріння свердловин буровим станком в масивів гірських порід зі складною структурою, яка характеризується наявністю карстових порожнин.

Відсутність структурно-геологічних даних щодо площі кар'єрного поля, а особливо – детальних по глибині блоку, що підривається, призводить до непрогнозованих витрат енергії на процес буріння та

небезпечних проявів вибуху, результатом чого є підвищений вихід негабариту та негативний вплив сейсмічних хвиль на навколишнє середовище [4, 5].

При відпрацюванні уступу його верхня частина порушена вибухом зарядів вище розташованого горизонту в області перебуру свердловин, тому властивості гірського масиву за висотою уступу нестабільні. За результатами вимірювань на кар'єрах встановлено, що відносна стабільність буріння порід спостерігалась з глибини 6–8 м [6, 7].

На рис. 1 показано зв'язок між енергоємністю та часом буріння порід з коефіцієнтом міцності від 8 до 18–20. Ця залежність апроксимується формулою лінійного вигляду: $e_6 = 30 t$ (де t – час буріння породи, год.).

Аналітичний опис процесу буріння базується на урахуванні основних кінематичних, силових і енергетичних параметрів для аналізу взаємозв'язку продуктивності і енергоємності буріння по всій глибині свердловини [5, 7, 8].

Згідно з гіпотезою Кірпічова-Кіка енергія, витрачена для однакової зміни форми геометрично подібних і однорідних тіл, змінюється пропорційно об'ємам або масі цих тіл.

Вираз для визначення потужності буріння (кВт) має вигляд

$$N_{\Gamma} = N_x \exp(e_p \Pi_{\Gamma} / N_x), \quad (1)$$

де N_x – потужність холостого ходу обертача бурового станка, кВт; e_p – питома енергоємність руйнування гірської породи шарошковым долотом, Дж/м³; Π_{Γ} – продуктивність бурового станка, м³/с.

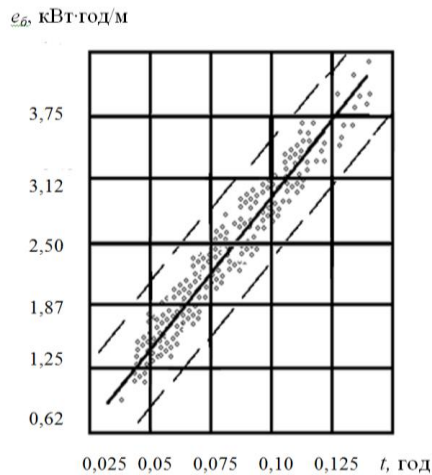


Рисунок 1 - Залежність між питомою енергоємністю e_6 та часом t буріння 1 м свердловини

Порівняння експериментальних значень потужності, яка споживається обертачем бурового станка, з розрахунковими показує їх достатню збіжність (рис.2). Із аналізу рис. 2 видно, що залежність $N_{\Gamma} = f(\Pi_{\Gamma})$ має криволінійний характер. Зі збільшенням Π_{Γ} величина N_{Γ} , що витрачається обертачем бурового станка, також зростає. Максимальна потужність досягається при бурінні свердловин в міцних породах (габро) і дорівнює 68 кВт (при $\Pi_{\Gamma} = 0,210^{-3}$ м³/с), а мінімальна – у гіпсах, але при $\Pi_{\Gamma} = 1,110^{-3}$ м³/с вона досягає практично таких самих значень як і при бурінні, наприклад, в габро при $\Pi_{\Gamma} = 0,210^{-3}$ м³/с, тобто 68 кВт.

Потужність буріння, яка витрачається обертачем при проходці свердловин в гранітах і аргілітах, займає проміжне положення (рис. 2). При бурінні свердловин в гранітах зі збільшенням Π_{Γ} від $0,110^{-3}$ до $0,410^{-3}$ м³/с величина N_{Γ} зростає від 15 до 68 кВт, а в аргілітах при збільшенні Π_{Γ} від $0,110^{-3}$ до $0,810^{-3}$ м³/с – від 12 до 68 кВт.

Енергоємність процесу буріння (Дж/м³) свердловин визначають діленням виразу (1) на продуктивність бурового станка [7]. Тоді

$$e_6 = \frac{N_x}{\Pi_{\Gamma}} \exp\left(\frac{e_p \rho \Pi_{\Gamma}}{N_x}\right) \rightarrow \min, \quad (2)$$

де ρ – щільність гірської породи, кг/м³.

З рис. 3 видно, що залежність енергоємності буріння має екстремальний характер і показує, що для кожної гірської породи з енергоємністю руйнування e_p , існує оптимальне значення продуктивності буріння Π_{Γ} , для якого енергоємність мінімальна [7].

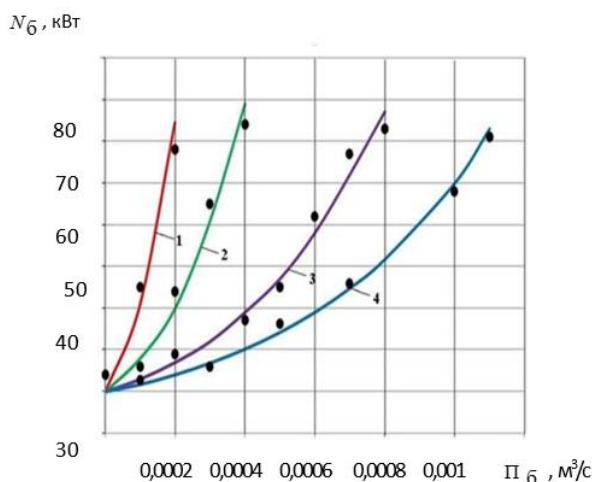


Рисунок 2 - Залежність потужності, що споживається обертачем бурового станка від його продуктивності при бурінні свердловин в суцільних гірських породах: 1 – габро середньозернисті; 2 – вивітрілі граніти; 3 – аргіліти; 4 – гіпси

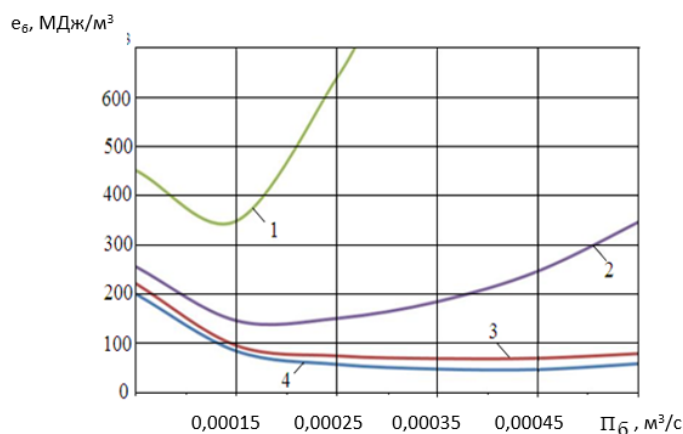


Рисунок 3 - Залежність енергоємності буріння від продуктивності буріння свердловин для різних типів гірських порід: 1 – габро середньозернисті; 2 – вивітріні граніти; 3 – аргіліти середньої щільності; 4 – гіпси

Встановлена функціональна залежність $e_b = f(P_b)$ для різних гірських порід дозволяє виявити взаємозв'язок кінематичних і силових параметрів, а також мінімум питомої енергоємності даного процесу.

Для умов, що розглядаються, $e_b = f(P_b)$ аналогічна $N_b = f(P_b)$. Стосовно габро і гранітів величина e_b змінюється криволінійно і зростає зі збільшенням P_b , набуваючи при цьому екстремального значення. При бурінні свердловин в аргілітах і гіпсах e_b зі збільшенням P_b має практично сталі значення (рис.3). В закарстованих масивах гірських порід (як правило карбонатних – гіпси, вапняки, доломіти) не виключається можливість перетину карстової порожнини свердловиною. При цьому карст може мати різну форму і відрізнятися геометричними розмірами за його висотою і довжиною (рис. 4).

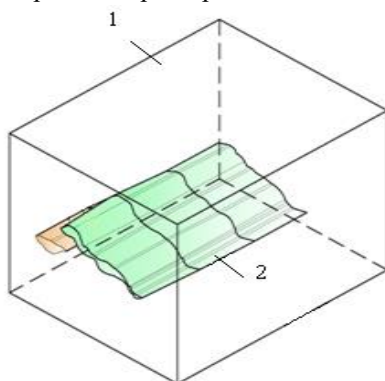


Рисунок 4 - Елемент гірського масиву (1) з карстовою порожниною (2)

На рис 5 показано загальний вигляд закарстованого блоку порід з розрізами по рядах свердловинних зарядів.

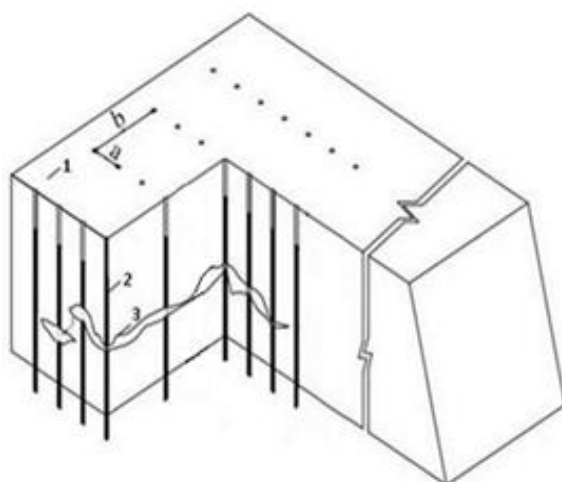


Рисунок 5 - Схема закарстованого блоку порід з перерізами по рядах свердловин:

1 – блок, що підривається; 2 – свердловина; 3 – карст

На рис. 6 наведено розрізи по кожному ряду зарядів ВР окремо (4 ряди по 7 свердловин у ряді). При цьому для кожної свердловини по рядах наведено потужності карстової порожнини, яка коливається в межах від 0,3 до 1,0 м (табл. 1). Глибина залягання карстової порожнини наведена в табл. 2.

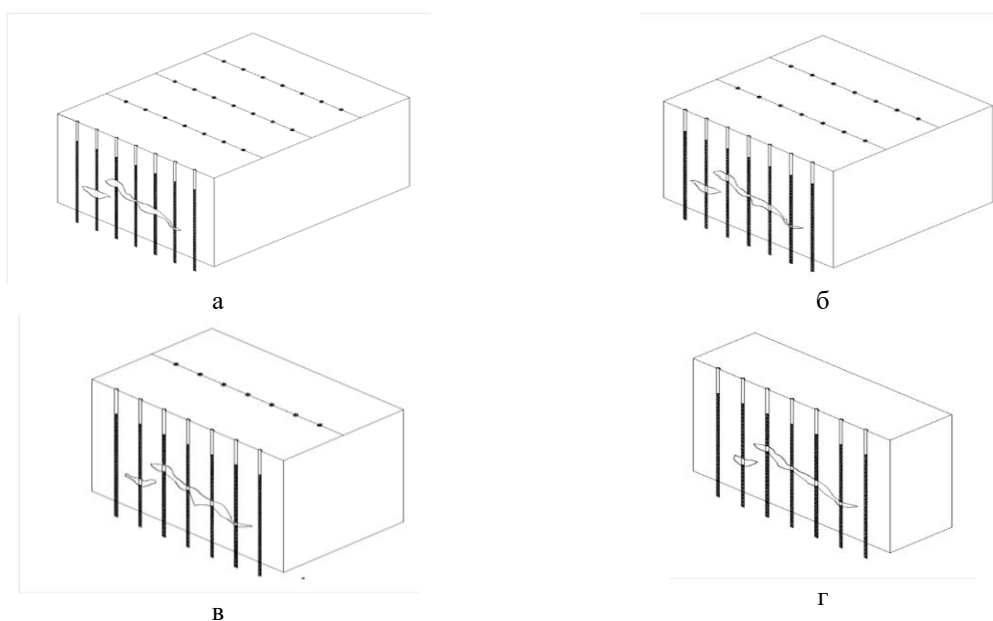


Рисунок 6 - Розрізи по рядах свердловин при їх бурінні на блоці: а – по 1-му ряду; б – по 2-му ряду; в – по 3-му ряду; г – по 4-му ряду

Наявність карсту в гірському масиві значною мірою впливає на стабільність буріння свердловин зі збільшенням їх глибини.

При перетині карсту свердловиною, у місці його розташування відбувається різка втрата потужності буріння, яка за висотою карсту дорівнює потужності холостого ходу обертача бурового станка.

Таблиця 1- Потужності карстових порожнин, одержані за величиною потужності обертача бурового станка при бурінні свердловин

№ ряду свердловин	Свердловина та потужність карстової порожнини, м						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1,0	0,9	0,28	0,7	0,3	0
2	0	0,85	0,83	0,4	0,74	0,27	0
3	0	0,7	0,75	0,5	0,6	0,34	0
4	0	0,74	0,6	0,45	0,62	0,4	0

Таблиця 2 - Глибина залягання карстової порожнини, м

№ ряду свердловин	№ свердловини у ряді						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	<u>7,24</u> 8,24	<u>5,26</u> 6,16	<u>6,9</u> 7,18	<u>6,91</u> 7,61	<u>8,39</u> 8,69	0
2	0	<u>7,37</u> 8,22	<u>5,43</u> 6,26	<u>6,9</u> 7,3	<u>6,93</u> 7,67	<u>8,25</u> 8,52	0
3	0	<u>7,92</u> 8,62	<u>5,61</u> 6,36	<u>6,6</u> 7,1	<u>6,93</u> 7,53	<u>8,25</u> 8,59	0
4	0	<u>7,92</u> 8,66	<u>5,61</u> 6,21	<u>6,6</u> 7,05	<u>6,93</u> 7,55	<u>8,25</u> 8,65	0

Примітка. Цифра у чисельнику означає глибину залягання покрівлі карстової порожнини, у знаменнику – підшви карстової порожнини

Подальше буріння свердловин відбувається зі збільшенням потужності обертача. У табл. 3 наведено результати моніторингу потужності обертача бурового станка при бурінні 7-ми свердловин глибиною 12,5 м для 1-го ряду блоку порід.

Як приклад на рис. 7 наведено діаграму зміни потужності при бурінні свердловини №2, а на рис 8 – її графічну залежність $P_G = f(l_{cv})$ у закарстованих гіпсах.

З діаграми і графіка видно, що при бурінні свердловини №2 максимальна потужність обертача 68 кВт досягається на глибині 6 м, потім відбувається спад потужності до 9,8 кВт (потужність холостого ходу) з подальшим її підвищенням до значення 67 кВт на глибині 12,5 м.

Таблиця 3 - Результати моніторингу витрат потужності обертача бурового станка при бурінні свердловин у закарстованих гіпсах

Св.1		Св.2		Св.3		Св.4		Св.5		Св.6		Св.7	
l_{cv} , м	N_b , кВт	l_{cv} , м	N_b , кВт	l_{cv} , м	N_b , кВт	l_{cv} , м	N_b , кВт	l_{cv} , м	N_b , кВт	l_{cv} , м	N_b , кВт	l_{cv} , м	N_b , кВт
1	55	1	55	1	56	1	57	1	54	1	55	1	57
2	61	2	62	2	61	2	62	2	61	2	63	2	63
3	65	3	64	3	63	3	64	3	65	3	64	3	64
4	67	4	66	4	66	4	67	4	66	4	66	4	66
5	68	5	67	5	67	5	68	5	67	5	67	5	68
6	65	6	68	5,26	9,8	6	67	6	68	6	68	6	65
7	68	7,24	9,8	6,16	9,8	6,9	9,8	6,91	9,8	7	67	7	68
8	67	8,24	9,8	8	49	7,18	9,8	7,61	9,8	8,39	9,8	8	66
9	65	9	50	9	60	9	61	9	59	8,68	9,8	9	64
10	67	10	64	10	65	10	64	10	62	10	60	10	67
11	65	11	67	11	67	11	67	11	66	11	65	11	65
12	68	12	68	12	68	12	68	12	67	12	67	12	68
12,5	68	12,5	67	12,5	68	12,5	67	12,5	68	12,5	66	12,5	68

Залежність $N_G = f(l_{cv})$ апроксимується рівнянням

$$N_G = -\frac{N_{\max} - N_{xx}}{l_n^2} l_{cv}^2 + 2\frac{N_{\max} - N_{xx}}{l_n} l_{cv} + N_{xx}, \quad (3)$$

де N_{\max} – максимальна потужність буріння, кВт; N_{xx} – потужність холостого ходу обертача, кВт; l_{cv} – глибина свердловини при N_{\max} , м.

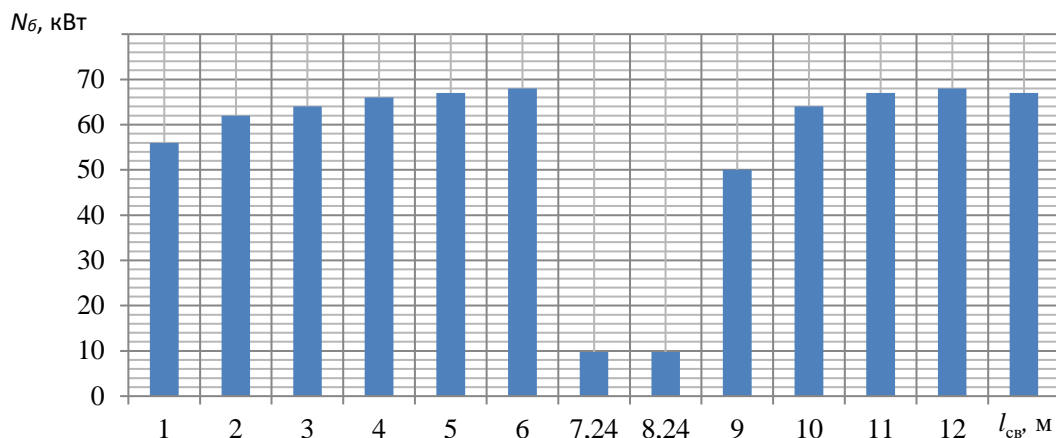


Рисунок 7 - Характерна діаграма зміни потужності, витраченої обертачем за глибиною, при бурінні свердловини №2 в закарстованих гіпсах

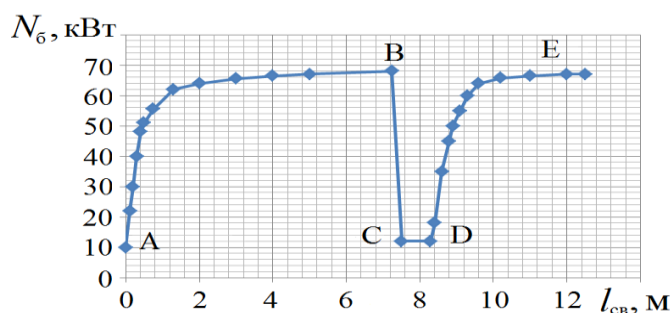


Рисунок 8 - Характерний графік зміни N_6 від l_{cb} в гіпсі з карстовою порожниною: AB – початок буріння; BC – вихід на стелю карстової порожнини; CD – проходження карстової порожнини (холостий хід обертача); DE – продовження буріння свердловини до кінцевої глибини

Висновки

На основі результатів аналітичних і експериментальних досліджень встановлено:

- потужність обертача бурового станка експоненціально залежить від продуктивності буріння;
- питома енергоємність буріння конкретної гірської породи екстремально залежить від його продуктивності;
- оптимальному значенню продуктивності буріння відповідають мінімальні значення енергоємності процесу;
- обґрунтована залежність $N_6 = f(l_{cb})$ стосовно до процесу буріння вибухових свердловин у закарстованих породах необхідна для встановлення взаємозв'язку енергоємностей буріння і підривання з подальшим розробленням нових, удосконалених конструкцій зарядів.

Список використаної літератури

1. Тангаев И.А. Буримость и взрываемость горных пород / И.А. Тангаев. – М.: Недра, 1978. – М.: Недра, 1978.- 184 с.
2. Крючков А.И. Энергетические характеристики горных пород при разрушении / А.И. Крючков // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». Зб. наук. праць. – К.: НТУУ «КПІ», 2001. – Вип. 6. – С. 13 – 17.
3. Оценка буримости пород по удельной энергоёмкости шарошечного бурения / И.А. Тангаев, Я.М. Додис, И.Е Шумсков, К.Ш. Шауханов // Горн. журнал. – 1974. – №4. – С. 56–59.
4. Бойко В.В. Проблеми сейсмічної безпеки вибухової справи у кар'єрах України / В.В. Бойко. – К.: ТОВ «Видавництво Сталь», 2012. – 235 с.
5. Крючков А.І. Визначення параметрів міцності гірських порід у кінетичній теорії руйнування аналітичним методом / А.І. Крючков, Н.І. Жукова // Проблеми охорони праці в Україні. Зб. наук. праць. – К.: ННДІОП, 2000. – Вип. 3. – С. 78–82.

6. Соболевський Р.В. Управління якістю бурових робіт для підвищення ефективності алмазно-канатного різання / Р.В. Соболевський, В.О. Шлапак, О.В. Камських // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук, 2015. – № 5. – С. 106 – 111.

7. Жукова Н.І. Обґрунтування енергозберігаючої технології бурових робіт на каре́рах будівельних матеріалів / Н.І. Жукова // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». Зб. наук. праць. – К.: НТУУ «КПІ». – 2003. – Вип. 8. – С. 49–54.

8. Войтенко Ю.І. Про енергоємність руйнування гірських порід та шляхи її зменшення / Ю.І.Войтенко, А.М.Шукуров // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». Зб. наук. праць. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – Вип. 31. – С. 11 – 25.

N. Zhukova, Ph.D., Assoc. Prof. **ORCID** 0000-0002-4215-6981

A. Kryuchkov, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof. **ORCID** 0000-0002-2234-0546

S. Zaichenko, Dr. Eng. Sc., Prof. **ORCID** 0000-0002-8446-5408

V. Smoliar, Eng. **ORCID** 0000-0002-0355-0353

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

EVALUATION OF ENERGY CONSUMPTION OF DRILLING TOOLS WHEN DRILLING WELLS ON KARSTED ROCK BLOCKS

The article is devoted to the analysis of energy consumption in the process of drilling wells in karst rock blocks. The paper presents the results of experimental and analytical studies of the drilling process and energy consumption for the destruction of rock massifs with a complex structure characterized by the presence of karst cavities. The operation of the drilling machine during the drilling of the karst rock block was monitored. In the article, the use of the criterion of energy intensity of the well drilling process is proposed to assess the level of energy consumption by the drilling rig. On the basis of the conducted research, the dependence of the rotary power of the drilling machine on the productivity of drilling wells was established, and the dependence of the specific energy intensity of rock drilling on the drilling productivity was determined.

The results of the conducted analytical and experimental studies on the determination of the geological structures of well columns by the energy intensity of their drilling process allow the development of designs of well charges for effective and safe destruction of complex rock massifs.

Key words: *energy consumption, energy consumption of drilling, drilling capacity, well, karst cavities.*

References

1. Tangaev I.A. Byrimost i vzryvaemost gornyx porod / I.A.Tangaev. – M.: Nedra, 1978.– 184 p.
2. Krychkov A.I. Energeticheskie harakteristiki gornyx porod pri razrusheniy / A.I. Krychkov // Visnyk NTUU «KPI». Serya «Girnichtvo». Zb. nauk. prac.– K.: NTUU «KPI», 2001. – Vip. 6. – P. 13 – 17.
3. Ocenka burimosti porod po udelnoy energoemkosti sharoshechnogo burenia / I.A. Tangaev, Y.M. Dodis, I.E. Shumskov, K.S. Shauhanov // Gorn. zhurnal. – 1974. – №4. – P. 56–59.
4. Boiko V.V. Problemu seismichnoi bezpeku vybuhovoy spravy y karierah Ukrainy / V.V. Boiko. – K.: TOV «Vydavnistvo Stal», 2012. – 235 p.
5. Krychkov A.I. Vuznachenny parametriv micnosti girskih pored u kinetichnyy teorii ruynuvanny analitichnum metodom/ A.I. Krychkov, N.I. Zhukova // Problemu ohoronu praci v Ukraini. Zb. nauk. prac. – K.: NNDIOP, 2000. – Vyp. 3. – P. 78–82.
6. Sobolevskiy R.V. Upravlinny yakistu byrovuh robit dlya pidvyshchennya efektyvnostialmazno-kanatnogo rizannya/ R.V. Sobolevskiy, V.O. Shlapak, O.V. K Kamskih// Visnyk Kremenchuckogo nacionalnogo universitetu imeni Muhaila Ostrogradskogo. – Kremenchuk, 2015. – № 5. – P. 106 – 111.
7. Zhukova N.I. Obgruntuvannya energozberigauchoy tehnologii burovih robit na karierah budivelnih materialiv/ N.I. Zhukova // Visnyk NTUU «KPI». Serya «Girnichtvo». Zb. nauk. prac.– K.: NTUU «KPI», – 2003. – Вип. 8. – P. 49–54.
8. Voitenko Yu.I. Pro energoemnist ruynuvannya girskih pored ta shlyahi ii zmenshennya/ Yu.I.Voitenko, A.M.Shakurov // Visnyk NTUU «KPI». Serya «Girnichtvo». Zb. nauk. prac.– K.: NTUU «KPI», 2016. – Vyp. 31. – P. 11 – 25.

Надійшла 21.07.2022

Received 21.07.2022