

УДК 622.24

## ОПТИМАЛЬНЕ ВІДПРАЦЮВАННЯ ШАРОШКОВИХ ДОЛІТ ЗА СТАНОМ ОЗБРОЄННЯ В НЕОДНОРІДНИХ ПОРОДАХ

М.І.Горбійчук, Т.В.Гуменюк

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 504521;  
e-mail: public@nung.edu.ua

Актуальним для процесу бурення является момент его окончания, который зависит от состояния долота и его опоры. Отработка долота по вооружению определяет его потенциальные возможности. Вычисление времени бурения по выбранному критерию — одна из основных проблем в общей задаче оптимизационного управления процессом бурения. Рассмотрена методика определения оптимального времени бурения в неоднородных породах по критериям рейсовой скорости и стоимости метра проходки. Разработана математическая модель процесса углубления долота с целью определения времени бурения для достижения оптимального отработывания шарошковых долот по состоянию вооружения в неоднородных породах.

The actual task for the process of the boring drilling is a moment of his completion, which depends on the state of chisel and his support. Working off a chisel after an armament is determined his potential possibilities and calculations of time of the boring drilling after the chosen criterion are one of basic problems in the general task of optimization process control boring drilling. The method of determination of optimum time of the boring drilling is considered in heterogeneous breeds after the criteria of trip speed and cost of driving meter. The mathematical model of process of deepening of chisel is developed with the purpose of determination of time of the boring drilling for achieving the optimum working off sharoshkovikh chisels on the state an armament in heterogeneous breeds.

### Выводы

1. Рассмотрен комплекс вопросов, связанных с теоретическим описанием кинетики износа алмазного долота полусферической формы в процессе бурения скважины с учетом зависимости коэффициента износа от контактной температуры, специфических особенностей сверхтвердых композиционных алмазосодержащих материалов, сложных условий теплообмена вследствие совместного действия естественной и вынужденной конвекции в потоке охлаждающей жидкости.

2. Окончательные выражения получены в явном виде, что позволяет определить текущий износ или скорость износа в произвольный момент времени и проводить параметрический анализ кинетики данного процесса от широкого варьирования исходных данных.

3. Для иллюстрации полученных решений проведен анализ этих решений для конкретных ситуаций сверхтвердых композиционных алмазосодержащих материалов на основе твердо-сплавных матриц. Результаты анализа влияния свойств алмазосодержащего слоя композита, концентрации и зернистости алмазов, координат профиля и условий бурения является предметом следующей работы.

### Литература

1. Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Исследование износа алмазных буровых долот. 1. Свойства, классификация и особенности рассматриваемой проблемы // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — 2006. — № 1(18). — С. 49-55.

2. Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Исследование износа алмазных буровых долот. 2. Нестационарная задача теплопро-

водности для алмазного бурового долота в процессе его работы // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — 2006. — № 2(19). — С. 54-58.

3. Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Исследование износа алмазных буровых долот. 3. Анализ температурных полей // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — 2006. — № 3(20). — С. 87-91.

4. Бондаренко М.О., Мечник В.А. Визначення теплових потоків при руйнуванні породи алмазними буровими вставками // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. — 2006. — № 1(13). — С. 47-49.

5. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. — М.: Наука, 1970. — 252 с.

6. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. — М.: Наука, 1980. — 304 с.

7. Проников А.С. Надежность машин. — М.: Машиностроение, 1978. — 592 с.

8. Александров В.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Температурное поле, термоупругое состояние и износ алмазного круга при резании с охлаждением. Ч. 1 // Трение и износ. — 1991. — Т. 12, № 2. — С. 210 — 218.

Момент закінчення процесу буріння визначається станом озброєння долота або його опори.

Відпрацювання долота за озброєнням визначає його потенційні можливості, і обчислення часу буріння  $t_b$  за вибраним критерієм є однією із основних проблем в загальному питанні щодо оптимального керування процесом буріння [1].

Значення  $t_b$  визначається, з одного боку, за типом долота, умовами буріння (фізико-механічними властивостями гірських порід, глибиною

свердловини), а з другого — за технологічними алгоритмів можна забезпечити оптимальний і

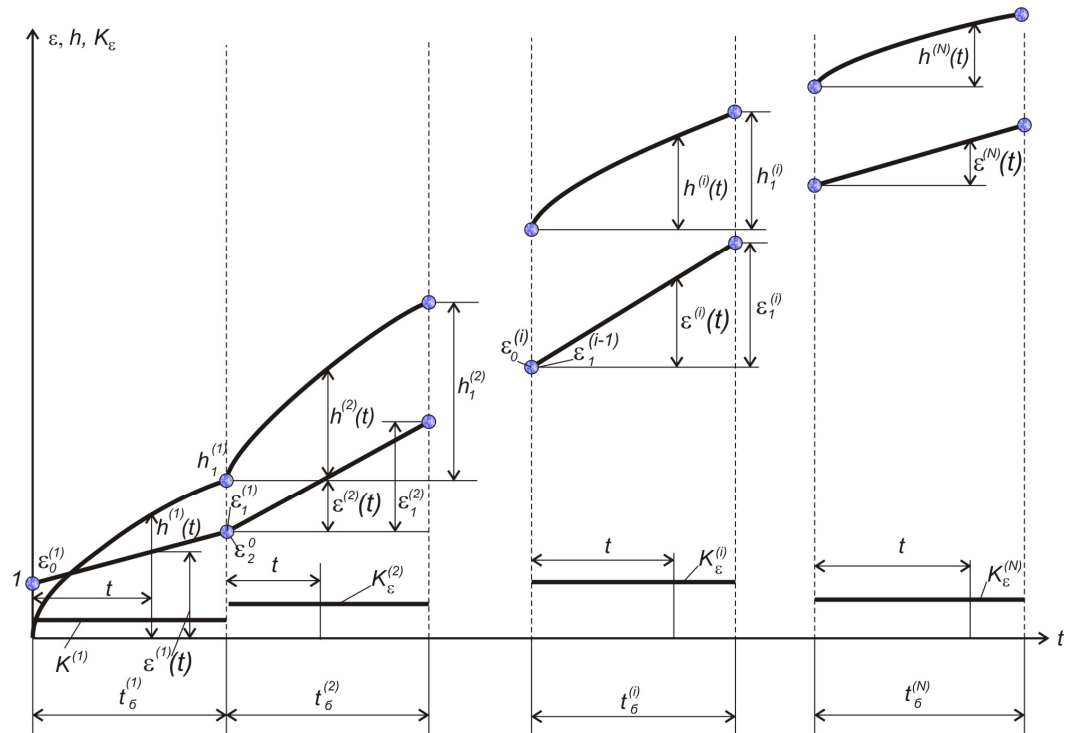


Рисунок 1 — Граничні умови при проходженні долотом  $N$  пластів

параметрами буріння.

Коли вибраний тип долота, компоновка бурильної колони, режим промивання і спосіб привода долота, режим промивання і спосіб осовим навантаженням на долото і швидкістю його обертання і вибирається так, щоб вибраний критерій оптимальності набув мінімального (максимального) значення.

Правило (алгоритм) визначення моменту закінчення рейсу за станом його опори є залежним від алгоритму визначення  $t_{\delta}$ , коли долото відпрацьовується за озброєнням. Ця залежність проявляється в тому, що ефективність процесу буріння забезпечує стан озброєння долота і механізм його взаємодії з вибоєм, а стан опори долота лише забезпечує функцію долота розбурувати породу. У випадку зносу опори долото необхідно підняти аварійно, тобто вимушено і безвідносно до того, чи досягне оптимального значення вибраний критерій оптимального керування процесом буріння. Це означає, що алгоритми визначення тривалості рейсу буріння як за озброєнням, так і за опорою повинні застосовуватись комплексно. Оскільки використання лише алгоритму визначення  $t_{\delta}$  за станом озброєння може призвести до підвищення аварійності в бурінні, як це траплялось на практиці [2]. Проте цьому факту давалась неправильна інтерпретація. Брався під сумнів сам метод визначення  $t_{\delta}$  за станом озброєння долота. Хоча аварії відбувалися з причини, що цей алгоритм не доповнювався алгоритмом визначення стану опори долота, призначення якого і полягає в тому, щоб попереджувати аварії з долотом. Тільки при одночасному використанні обох

безаварійний процес буріння свердловин.

Оптимальне керування процесом буріння передбачає, що керуючі впливи — осове навантаження на долото  $F$  і швидкість його обертання  $N_{\delta}$  — є функціями часу (програмне керування) або є постійними на протязі одного рейсу. Сучасний технічний стан бурового обладнання такий, що реалізувати програмне керування в більшості випадків неможливо.

Тому на протязі всього рейсу проходки  $F$  і  $N_{\delta}$  підтримують постійними. За таких умов, коли вибрані оптимальні значення  $F^*$  і  $N_{\delta}^*$ , критерій оптимальності залежить лише від  $t_{\delta}$ .

Нехай процес заглиблення долота описується математичною моделлю [3]

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{v_0(\bar{u})}{\varepsilon(t)}, \tag{1}$$

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = K_{\varepsilon}(\bar{u}). \tag{2}$$

3 початковими умовами

$$h(0)=0 \text{ і } \varepsilon(0)=1, \tag{3}$$

де:  $\bar{u}^T = (F, N_{\delta})$ ;  $v_0(\bar{u})$  — початкова швидкість проходки;  $\varepsilon$  — оцінка стану озброєння долота;  $K_{\varepsilon}(\bar{u})$  — швидкість її зміни.

Оскільки  $\bar{u} = const$ , то й

$$v_0(\bar{u}) = v_0 = const \text{ і } K_{\varepsilon}(\bar{u}) = K_{\varepsilon} = const. \tag{4}$$

Відпрацювання долота за станом озброєння, коли на протязі рейсу проходки воно знаходиться в однорідному пласті, розглянуто і проаналізовано в [4]. Показано, що для критерію оптимальності — максимуму рейсової швидко-

сті ( $max:v_p$ ) та мінімуму вартості метра проходки ( $min:q$ ) існують необхідні і достатні умови, які визначають момент закінчення чергового рейсу буріння. Якщо керування процесом буріння ведеться за критерієм максимальної проходки на долото ( $max: h(t_\sigma)$ ), то функція  $h(\varepsilon)$  монотонно зростає зі збільшенням  $\varepsilon$  і відпрацювання долота необхідно здійснювати за опорою.

Тепер розглянемо методику визначення часу  $t_\sigma$  в черговому рейсі, коли долото послідовно проходить  $N-1$  пластів і буріння закінчується в  $N$  пласті.

Отже, ставиться завдання визначити оптимальне значення  $t_\sigma$ . В межах пласта порода, що розбурюється, є однорідною для кожного із пластів; осьове навантаження на долото і його швидкість обертання залишаються постійними.

В межах кожного  $i$ -того ( $i = \overline{1, N}$ ) пласта процес заглиблення долота підпорядковується системі диференціальних рівнянь (1) і (2), тобто

$$\frac{dh^{(i)}(t)}{dt} = \frac{v_0^{(i)}}{\varepsilon^{(i)}(t)}, \quad (5)$$

$$\frac{d\varepsilon^{(i)}}{dt} = K_\varepsilon^{(i)},$$

$$v_0^{(i)} = const, K_\varepsilon^{(i)} = const, i = \overline{1, N}. \quad (6)$$

Граничні умови відповідно до рис. 1 набудуть такого вигляду:

$$h_0^{(i)} = 0, \forall i = \overline{1, N};$$

$$\varepsilon_0^{(1)} = 1; \varepsilon_0^{(2)} = \varepsilon_1^{(1)}; \dots; \varepsilon_0^{(i)} = \varepsilon_1^{(i-1)}. \quad (7)$$

Коли долото знаходиться в першому пласті, то для отриманих значень  $v_0^{(1)}$  і  $K_\varepsilon^{(1)}$  очікуваний час буріння  $t_\sigma^{(1)}$  визначається шляхом мінімізації вибраного критерію оптимальності  $R(t_\sigma)$  за змінною  $t_\sigma$ . При переході долота в другий пласт з іншими фізико-механічними властивостями зміняться  $v_0$  і  $K_\varepsilon$  і набудуть значення  $v_0^{(2)}$  і  $K_\varepsilon^{(2)}$ . Інтегруючи систему рівнянь (5), (6) при  $i=2$  з граничними умовами (7), отримуємо

$$h^{(2)}(t) = \frac{v_0^{(2)}}{K_\varepsilon^{(2)}} \ln \frac{\varepsilon^{(2)}}{\varepsilon_1^{(1)}}, \quad (8)$$

$$\varepsilon^{(2)}(t) = K_\varepsilon^{(2)}t + \varepsilon_1^{(1)}, \quad (9)$$

де біжучий час  $t$  відраховується від моменту  $t_\sigma^{(1)}$ , а  $\varepsilon_1^{(1)} = K_\varepsilon^{(1)}t_\sigma^{(1)} + 1$ ;  $t_\sigma^{(1)}$  – час, коли долото перейшло із першого в другий пласт.

Із рівняння (9) визначасмо очікуваний час буріння  $t_{\sigma,0}^{(2)}$  за умови, що  $t = t_{\sigma,0}^{(2)}$   $\varepsilon^{(2)}(t_{\sigma,0}^{(2)}) = \varepsilon_1^{(2)}$ , а долото до кінця буріння знаходиться в другому пласті

$$t_{\sigma,0}^{(2)} = \frac{1}{K_\varepsilon^{(2)}}(\varepsilon_1^{(2)} - \varepsilon_1^{(1)}). \quad (10)$$

Тепер загальний час буріння і проходка на долото будуть

$$t_\sigma = t_\sigma^{(1)} + t_{\sigma,0}^{(2)},$$

$$h(t_\sigma) = h_1^{(1)} + h^{(2)}(t_{\sigma,0}^{(2)}).$$

З врахуванням значень  $h^{(2)}$  і  $t_{\sigma,0}^{(2)}$ , що визначаються формулами (10) і (12), будемо мати

$$t_{\sigma,0} = t_\sigma^{(1)} + \frac{1}{K_\varepsilon^{(2)}}(\varepsilon_1^{(2)} - \varepsilon_1^{(1)}),$$

$$h(t_{\sigma,0}) = \frac{v_0^{(2)}}{K_\varepsilon^{(2)}} \ln \frac{\varepsilon_1^{(2)}}{\varepsilon_1^{(1)}} + h_1^{(1)},$$

де  $\varepsilon_1^{(2)} = K_\varepsilon^{(2)}t_{\sigma,0}^{(2)} + \varepsilon_1^{(1)}$ .

Підставляючи значення  $t_\sigma$  і  $h(t_\sigma)$  в критерій оптимальності  $R$ , приходимо до висновку, що  $R = R(\varepsilon_{1,0}^{(2)})$ .

Мінімізуючи функцію  $R(\varepsilon_1^{(2)})$  за змінною  $\varepsilon_1^{(2)}$ , обчислимо значення  $\varepsilon_*^{(2)}$  і відповідно

$$t_{\sigma,*}^{(2)} = \frac{1}{K_\varepsilon^{(2)}}(\varepsilon_*^{(2)} - \varepsilon_1^{(1)}). \quad (11)$$

Аналогічні міркування для випадку, коли долото переходить із другого пласта в третій, приводять до таких результатів:

$$t_{\sigma,0} = t_\sigma^{(1)} + t_\sigma^{(2)} + \frac{1}{K_\varepsilon^{(3)}}(\varepsilon_1^{(3)} - \varepsilon_1^{(2)}),$$

$$h(t_{\sigma,0}) = h_1^{(1)} + h_1^{(2)} + \frac{v_0^{(3)}}{K_\varepsilon^{(3)}} \ln \frac{\varepsilon_1^{(3)}}{\varepsilon_1^{(2)}},$$

$$\varepsilon_{1,0}^{(3)} = K_\varepsilon^{(3)}t_{\sigma,0}^{(3)} + \varepsilon_1^{(2)},$$

де

$$h_1^{(2)} = \frac{v_0^{(2)}}{K_\varepsilon^{(2)}} \ln \frac{\varepsilon_1^{(2)}}{\varepsilon_1^{(1)}}; \rightarrow \varepsilon_1^{(2)} = K_\varepsilon^{(2)}t_\sigma^{(2)} + \varepsilon_1^{(1)}; t_\sigma^{(2)} -$$

момент часу (див. рис. 1), коли долото перейшло із другого в третій пласт;  $t_{\sigma,0}^{(3)}$  – очікуваний час закінчення рейсу за умови, що долото до кінця буріння буде знаходитись в третьому пласті.

Підстановка значень  $t_{\sigma,0}$  і  $h(t_{\sigma,0})$  в критерій оптимальності  $R$  з подальшою його мінімізацією за змінною  $\varepsilon^{(3)}$  дає можливість визначити

$$t_{\sigma,*}^{(3)} = \frac{1}{K_\varepsilon^{(3)}}(\varepsilon_*^{(3)} - \varepsilon_1^{(2)}).$$

Узагальнюючи отриманні результати на випадок, коли долото переходить із  $(i-1)$ -го пласта в  $i$ -тий, отримуємо

$$t_{\sigma,0} = \sum_{K=1}^{i-1} t_\sigma^{(K)} + \frac{1}{K_\varepsilon^{(i)}}(\varepsilon_1^{(i)} - \varepsilon_1^{(i-1)}), \quad (12)$$

$$h(t_{\sigma,0}) = \sum_{K=1}^{i-1} h_1^{(K)} + \frac{v_0^{(i)}}{K_\varepsilon^{(i)}} \ln \frac{\varepsilon_1^{(i)}}{\varepsilon_1^{(i-1)}}, \quad (13)$$

$$\varepsilon_{1,0}^{(i)} = K_{\varepsilon}^{(i)} t_{\sigma,0}^{(i)} + \varepsilon_1^{(i-1)}, \quad (14)$$

де

$$h_1^{(K)} = \frac{v_0^{(K)}}{K_{\varepsilon}^{(K)}} \ln \frac{\varepsilon_1^{(K)}}{\varepsilon_1^{(K-1)}};$$

$$\varepsilon_1^{(i-1)} = K_{\varepsilon}^{(i-1)} t_{\sigma}^{(i-1)} + \varepsilon_1^{(i-2)}.$$

Отриманні результати дають можливість записати критерій оптимальності  $R$  в такому вигляді:

а) вартість метра проходки свердловини

$$R_q(\varepsilon_1^{(i)}) = \left\{ C_{\sigma} \left( \frac{1}{K_{\varepsilon}^{(i)}} (\varepsilon_1^{(i)} - \varepsilon_1^{(i-1)}) + \sum_{K=1}^{i-1} t_{\sigma}^{(K)} + t_{СП} \right) + d \right\} \times$$

$$\times \left\{ \sum_{K=1}^{i-1} h_1^{(K)} + \frac{v_0^{(i)}}{K_{\varepsilon}^{(i)}} \ln \frac{\varepsilon_1^{(i)}}{\varepsilon_1^{(i-1)}} \right\}^{-1}, \quad i = \overline{1, N}; \quad (15)$$

б) рейсова швидкість буріння

$$R_v(\varepsilon_1^{(i)}) = \left\{ \sum_{K=1}^{i-1} h_1^{(K)} + \frac{v_0^{(i)}}{K_{\varepsilon}^{(i)}} \ln \frac{\varepsilon_1^{(i)}}{\varepsilon_1^{(i-1)}} \right\} \times$$

$$\left\{ \frac{1}{K_{\varepsilon}^{(i)}} (\varepsilon_1^{(i)} - \varepsilon_1^{(i-1)}) + \sum_{K=1}^{i-1} t_{\sigma}^{(K)} + t_{СП} \right\}, \quad i = \overline{1, N}. \quad (16)$$

Задачі оптимізації (15) і (16) є нелінійними відносно змінної  $\varepsilon_1^{(i)}$  і для його розв'язку необхідно застосувати один із числових методів. В результаті визначимо  $\varepsilon_*^{(i)}$  і відповідно

$$t_{\sigma,*}^{(i)} = \frac{1}{K_{\varepsilon}^{(i)}} (\varepsilon_*^{(i)} - \varepsilon_1^{(i-1)}). \quad (17)$$

Таким чином, при черговому переході долота із одного пласта в інший для визначення оптимального часу буріння необхідно розв'язати задачу (15) або (16) відносно змінної  $\varepsilon_*^{(i)}$ , а із співвідношення (17) визначити  $t_{\sigma,*}^{(i)}$ . Якщо в  $N$ -ому пласті закінчується черговий рейс буріння, то загальний час буріння буде  $t_{\sigma}^* = t_{\Sigma}^{(N-1)} + t_{\sigma,*}^{(N)}$ .

Для показників процесу буріння, які є характерними для регіону Західної України, був побудований графік залежності  $R_q(\varepsilon_1^{(i)})$  (рис. 2). Зроблено припущення, що долото послідовно проходить два пласти з різними фізико-механічними властивостями.

Для першого пласта показники процесу буріння були такими: проходка на долото – 7,2 м; час буріння першого інтервалу – 4 год; оцінка стану озброєння долота – 1,4.

Після того, як долото перейшло в другий пласт, вони набули такого значення: початкова швидкість буріння – 1,5 м/год; швидкість зміни оцінки стану озброєння долота – 0,23 1/год.

Інші показники були такими: вартість долота – 1200 грн; вартість години роботи бурової установки – 860 грн/год; тривалість спуско-піднімальних операцій – 8 год.

Аналіз графіка (див. рис. 2) свідчить, що як недотримка, так і перетримка долота на вибій свердловини призводить до помітного зростання вартості метра проходки на долото. Такий же висновок можна зробити і стосовно критерію  $max: v_p$ . З тією лише різницею, що неоптимальне відпрацювання доліт за критерієм  $max: v_p$  призводить до помітного зменшення рейсової швидкості долота.

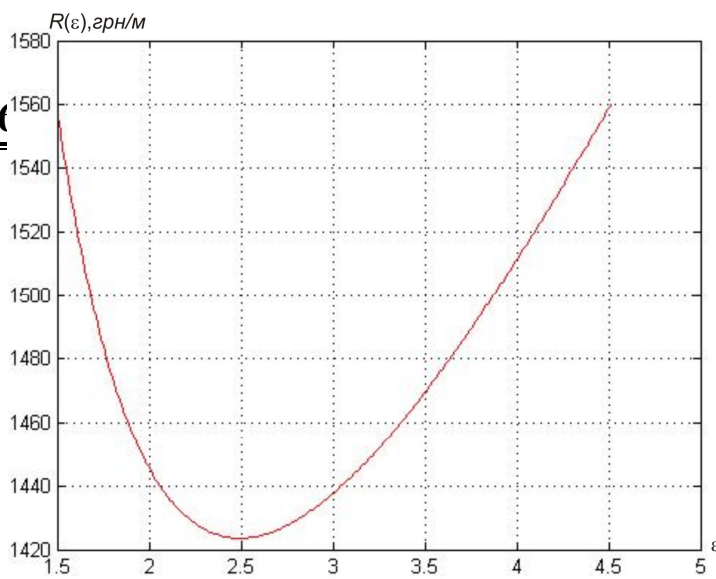


Рисунок 2 — Залежність вартості метра проходки на долото від оцінки стану його озброєння

Таблиця 1 — Порівняльний аналіз оптимального відпрацювання доліт за критеріями  $min:q$  та  $max:v_p$ .

Показники	Позначення	Критерії відпрацювання доліт	
		$min:q$	$max:v_p$
Оптимальне значення оцінки стану долота	$\varepsilon_*^{(N)} \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$	2,48	2,29
Час буріння інтервалу, год	$t_{\delta}^{(N)}$	8,71	3,86
Загальний час буріння, год	$t_{\delta}$	8,71	7,86
Загальна проходка на долото, м	$h(t_{\delta})$	10,94	10,40
Значення вартості метра проходки, грн/м	$R_q(\varepsilon_*^{(N)})$	1423,6	1426,5
Значення рейсової швидкості долота, м/год	$R_v(\varepsilon_*^{(N)})$	0,654	0,656

Таблиця 1 містить порівняльний аналіз оптимального відпрацювання доліт за станом озброєння за двома критеріями —  $min:q$  та  $max:v_p$ .

Із наведеної таблиці можна зробити висновки, що отримано приблизно однакові показники (вартість метра проходки і рейсову швидкість долота), які характеризують ефективність відпрацювання доліт за станом опори. Спостерігається незначне збільшення вартості метра проходки на 0,21 % при відпрацюванні долота за критерієм  $max:v_p$  порівняно з критерієм  $min:q$ .

2. Бражников В.А., Фурнэ А.А. Информационное обеспечение оптимального управления бурением скважин. — М.: Недра, 1989. — 208 с.

3. Горбійчук М.І. Ідентифікація параметрів математичної моделі процесу поглиблення свердловин // Розвідка і розробка нафтових та газових родовищ. Серія: Методи і засоби технічної діагностики. — Івано-Франківськ: Факел, 2000. — Вип. 37 (том 8). — С. 186–207.

4. Семенцов Г.Н., Горбійчук М.І. Чигур І.І. Математичний аналіз критеріїв відпрацювання доліт // Нафтова і газова промисловість. — 2001. — № 6. — С. 25–28.

### Література

1. Семенцов Г.Н., Горбійчук М.І. Концепція адаптивного керування процесом буріння глибоких свердловин // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електрифікація об'єктів паливно-енергетичного комплексу. — 1997. — Вип. 34 (5). — С. 3-14.