

# Фізико-технічні проблеми видобування енергоносіїв

УДК 622.24.08:622.24.051.68

## ЕНЕРГЕТИЧНІ ВИТРАТИ, ПОВ'ЯЗАНІ З ВИКОРИСТАННЯМ БУРОВИХ ДОЛІТ

*І.І. Чудик*

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (03422) 45560;  
e-mail: chudoman@ukr.net*

*Запропоновано методику розрахунку енерговитрат для роботи шарошкових і лопатевих доліт при бурінні свердловини. Запропоновано підхід до вибору системи промивання доліт і їх конструкції за критерієм мінімальних енергетичних витрат*

Ключові слова: одношарошкове долото, енергозатрати, механічна швидкість буріння.

*Предлагается методика расчета энергетических потерь для работы шарошечных и лопатных долот при бурении скважины. Предложен подход к выбору системы промывки долот и их конструкции по критерию минимальных энергетических потерь*

Ключевые слова: одношарошечное долото, энергопотери, механическая скорость бурения.

*The article offers the method of calculation energy expenditures for working cone bits and fish tail bits while drilling the well. The approach has been suggested to choose the bit washing system and its construction on the minimum energy expenditure criteria*

Keywords: one-cutter drilling bit, energy demands, rate of penetration.

Проблеми паливно-енергетичного забезпечення світової економіки стають сьогодні все більш актуальними. Енергетична криза 70-х років минулого століття продемонструвала, що структура енергетичного споживання, яка опирається тільки на традиційні джерела енергії, не вирішує цієї проблеми. Понад 30 років активно ведеться робота над впровадженням ресурсозберігаючих технологій, освоєнням відновлювальних джерел енергії (сонячної, вітрової, геотермальної і т.д.), безпечним використанням атомної енергетики. Незважаючи на ці всі наміри і роботу, реальної альтернативи вуглеводням (нафті і газу) поки що не знайдено. Ця сировина ще домінуватиме в світовому енергетичному балансі в найближчі 30–50 років, а, можливо, зміниться тільки структура їх балансу.

У зв'язку із високими темпами росту попиту і ціни на природний газ, все більше уваги у всьому світі привернуто до пошуків його нетрадиційних джерел, якими є метан вугільних пластів. В основі технології їх видобування лежить вибір одного або декількох способів створення високопроникних дренажних каналів залежно від гірничо-геологічних умов. У світовій

практиці для стимуляції газовіддачі вугільних пластів використовують гідравлічний розрив пласта, а за сприятливих гірничо-геологічних умов – методи кавітації і розширення відкритого вибою в обох випадках похило-скерованих (ПСС) або горизонтальних свердловин (ГС).

Буріння ПСС і ГС характеризується багатьма особливостями, які, порівняно із спорудженням вертикальних свердловин, позначаються на умовах роботи бурильної колони і долота. Робота останнього на вибої під час руйнування гірської породи (ГП) відбувається за умови його навантаження осьовою силою та обертанні з певною кутовою швидкістю і крутним моментом. Викривлення стовбура ПСС чи ГС, деформація бурильної колони (БК) в ньому, сили опору осьовому її переміщенню та обертанню стають перешкодами для передавання на долото необхідної для руйнування ГП енергії, величина якої не перевищує 10% від загально-витраченої на процес буріння. Окрім цього, під час очищення вибою від шламу в залежності від конструкції промивної системи також витрачається багато енергії, що ставить долото в ранг енерговитратного бурового інструменту.

Зважаючи на необхідність буріння великої кількості свердловин для розробки метанових покладів газу, витрата доліт, а отже і енергії на їх роботу, характеризується колосальними грошовими показниками, а енергозатрати стануть одним із основних критеріїв їх вибору. Для цього необхідно:

– оцінити витрати енергії на роботу бурових доліт у певних режимах їх експлуатації для порівняння з іншими конструкціями, моделями чи типорозмірами;

– підібрати оптимальну конструкцію і тип бурового долота та систему його промивання з врахуванням максимально ефективного використання енергії та механічної швидкості;

– зменшити кількість бурових доліт, що використовуються в процесі буріння.

Для визначення величини витрат енергії на руйнування ГП **шарошковим долотом** шляхом вдосконалення наукових основ [1] було розроблено відповідну методику, за якою визначається:

• енергія руйнування ГП при перекочуванні шарошок долота вибоєм свердловини:

$$E_1 = 4,66 \cdot 10^{-2} P \pi \sqrt{\eta_Z D_{CB} \delta}, \quad (1)$$

де:  $P$  – осьове навантаження на долото;  
 $\eta_Z$  – коефіцієнти перекриття зубів шарошок  $\eta_Z = 0,86 \div 2,0$ , [1];

$D_{CB}$  – діаметр свердловини;

$\delta \leq 5/6 \cdot h_z$ ;

$h_z$  – висота периферійних зубів шарошок.

• енергія на руйнування ГП при ковзанні шарошок долота:

$$E_2 = 7,06 \cdot 10^{-2} \eta_Z D_{CB} \delta \sigma_{CT} \pi k \cos(\alpha_Z), \quad (2)$$

де:  $\sigma_{CT}$  – границя міцності ГП на стискання;  
 $k$  – коефіцієнти ковзання зубів шарошок,  $k = 0,2 \div 0,5$  [1];

$\alpha_Z$  – півкут при вершині шарошок.

• енергія на вертикальне переміщення долота відносно площини вибою свердловини:

$$E_3 = 0,244 P \pi Z (d_{ш} - 2\delta) \sin^2(2\pi/Z), \quad (3)$$

де:  $Z$  – максимальна кількість зубів шарошок;  
 $d_{ш}$  – діаметр шарошки долота  
 $d_{ш} \approx 0,65 \cdot D_D$ ;

$D_D$  – діаметр долота.

• енергія на подолання тертя зубів шарошок із ГП вибою при їх проковзуванні:

$$E_4 = 6,12 \cdot 10^{-3} \mu [\eta_Z D_D]^2 \pi k b_t \sigma_{CT}, \quad (4)$$

де:  $\mu$  – коефіцієнт тертя металу об ГП;

$b_t$  – затупленість зубів шарошки.

• енергія на подолання сил тертя корпусу долота до стінки свердловини:

$$E_5 = 1,6 \frac{\pi}{\omega} \mu e_{ш} D_{CB} Q, \quad (5)$$

де:  $e_{ш}$  – кількість шарошок долота, які контактують із стінкою свердловини;

$Q$  – поперечна сила на долоті.

• енергія на подолання сил опору під час обертання шарошок долота в буровому розчині:

$$E_6 = 0,4 \pi \rho_{БР} D_{CB}^5 \omega^2, \quad (6)$$

де:  $\rho_{БР}$  – густина бурового розчину;

$\omega$  – кутова швидкість обертання долота.

• енергія фрезкування стінки свердловини за один оберт долота:

$$E_7 = D_D \pi F_{ОП}, \quad (7)$$

де:  $F_{ОП}$  – сила опору при фрезуванні лапою долота стінки свердловини.

$$F_{ОП} = \tau_{ЗС} l_k h_k, \quad (8)$$

де:  $\tau_{ЗС}$  – границя міцності ГП на зсув;

$l_k$  – довжина зони контакту долота з ГП;

$h_k$  – глибина продавлювання долота в ГП:

$$h_k = \frac{Q}{K b_k l_k}, \quad (9)$$

де:  $b_k$  – ширина зони контакту долота з ГП;

$K$  – піддатливість стінки свердловини [5].

• енергія на подолання тертя в опорах долота:

$$E_8 = \frac{2 \Delta \pi D_D}{\eta_{ДОЛ}}, \quad (10)$$

де:  $\Delta$  – емпіричний коефіцієнт, який враховує тертя в опорах долота [1];

$\eta_{ДОЛ}$  – ККД шарошкового долота, який враховує втрати енергії на нагрівання, зношування, залишкові деформації і в опорах  $\eta_{ДОЛ} = 0,95 \div 0,98$  [1];

Для визначення величини витрат енергії на руйнування ГП **лопатеvim долотом** шляхом вдосконалення наукових основ [1] також запропоновано відповідну методику, за якою визначається:

• енергія для зрізання стружки ГП з вибою свердловини лопаттю долота:

$$E_1 = 1,91 \cdot 10^{-3 \varphi} D_{CB} h^\varphi \tau_{СК} \pi \sin(\alpha_p), \quad (11)$$

де:  $h$  – висота стружки, яку знімає лопать при різанні ГП.

$\varphi$  – показник ступеня:

при  $\delta > 1 \Rightarrow \varphi = 0,5$ ;

при  $0,5 < \delta < 1 \Rightarrow \varphi = 0,25$ ;

при  $\delta < 0,5 \Rightarrow \varphi = 0,16$ ;

$\alpha_p$  – кут різання ГП лопатями долота;

• енергія для зрізання стружки ГП зі стінки свердловини лопаттю долота:

$$E_2 = 24,46 \cdot 10^{-3} \mu e_L b_k \pi \tau_{СК} D_{CB}^2, \quad (12)$$

де  $e_L$  – число повнорозмірних лопатей долота.

• енергія на подолання сил тертя долота до стінки свердловини:

$$E_3 = D_{CB} F_{ОПД} \pi / \omega, \quad (13)$$

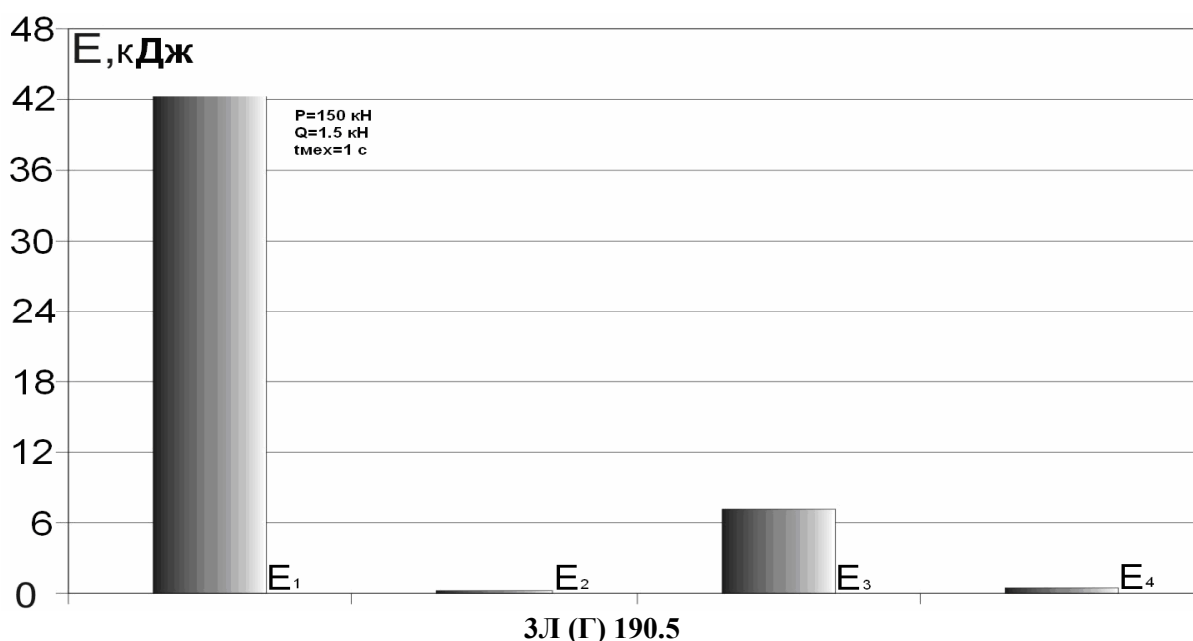
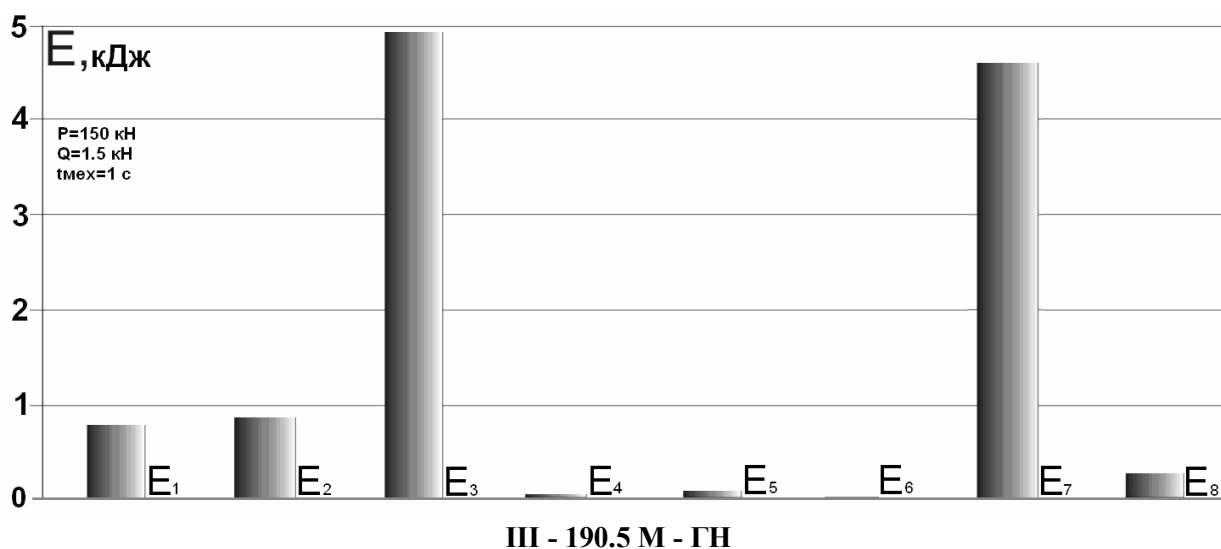


Рисунок 1 – Розподіл витрат енергії за один оберт бурових доліт

де  $F_{ОП}^*$  – сила опору при фрезуванні лопаттю долота стінки свердловини, яка визначається аналогічно (8):

$$F_{ОП}^* = \tau_{СК} h_{Л} l_{Л}, \quad (14)$$

де:  $l_{Л}$  – довжина контакту лопаті із стінкою свердловини;

$h_{Л}$  – глибина вдавлювання лопаті долота в стінку свердловини, визначена аналогічно (9).

• енергія на тертя долота до стінки свердловини:

$$E_4 = 1.6 \pi \mu e D_{СВ} Q / \omega. \quad (15)$$

За наведеними методиками було проведено розрахунки, отримано результати і побудовано дві гістограми (рис. 1, а і б), за якими встановлено, що для шарошkových доліт основна частина енергії у процесі буріння свердловини витрачається на його вертикальне переміщення відносно вибою і тертя до стінки, що переважає

інші складові від 4 до 15 разів (рис. 1, а). Це є свідченням того, що основна частина енергії, яка підводиться до шарошкового долота, спрямована на формування вибою і стінки свердловини та залежить, відповідно, від осьової і поперечної сил, що діють на нього.

Для лопатевого долота за однакових осьової ( $P$ ) і бокової ( $Q$ ) сил встановлено майже в 5 разів більшу потребу в енергії на руйнування ГП (рис. 1, б), ніж для шарошкового. Причому на поглиблення вибою витрачається в 6 разів більше енергії, ніж на фрезування стінки свердловини. Як і для шарошкового долота, основними чинниками при цьому є осьове навантаження та бокове (відхиляюче) зусилля. Тому, зважаючи на значно більші потреби енергії на роботу лопатевого долота, для його ефективного використання постає необхідна умова кратного збільшення механічної швидкості буріння.

### Витрати енергії на промивання вибою свердловини

Загальновитрачена на буровому долоті енергія визначається за формулами [2]:

$$E = (Q_{БР} P_{ДОЛ} + M_{ДОЛ} \omega) t_{МЕХ}, \quad (16)$$

де:  $Q_{БР}$  – подача насоса в процесі промивання свердловини;

$P_{ДОЛ}$  і  $M_{ДОЛ}$  – втрати тиску на долоті і моменту опору на його обертання;

$t_{МЕХ}$  – час механічного буріння.

З рівності енергетичних витрат для двох доліт із різними промивальними системами (гідромоніторна – «2» і бокова або центральна – «1») при  $E = const$  і  $h_{ДОЛ} = const$  отримуємо

залежність для визначення  $V_{МЕХ}$ , за якої в процесі буріння долотом з гідромоніторними насадками «2» витрачається співмірна енергія із затраченою в долоті з центральною чи боковою системою промивання – «1».

$$V_{МЕХ2} = \frac{(Q_{БР} P_{ДОЛ2} + M_{ДОЛ} \omega) V_{МЕХ1}}{(Q_{БР} P_{ДОЛ1} + M_{ДОЛ} \omega)}. \quad (17)$$

Для кількісної оцінки розподілу витрат енергії в промивальній системі долота проведено аналітичні дослідження для двох різних систем промивання [2]. В результаті розрахунків було встановлено, що:

- реалізація гідромоніторного ефекту поглинає (30-35)% енерговитрат процесу промивання свердловини, особливо у випадку збільшення подачі насоса та зменшення діаметрів насадок [3];

- центральне промивання доліт є в десятки разів енергоекономнішою, ніж промивання з гідромоніторними насадками [3];

- енергетична ефективність використання гідромоніторних доліт відносно центральної чи бокової систем проявляється при можливому кількаразовому збільшенні механічної швидкості буріння свердловини [3].

Буріння ПСС і ГС на завершальній стадії пов'язане з використанням доліт діаметрами до 215,9 мм. В тришарошкових конструкціях пропорційно до розміру корпусу зменшено геометричні параметри шарошок, їх опор та робочі навантаження на них [5]. Цим знижується тривалість їх роботи на вибої свердловини зі зменшенням швидкості руйнування ГП. На відміну від попередніх, одношарошкові долота володіють такими перевагами, [4]:

- мають значно більші геометричні розміри, шарошки та опори;

- можуть сприймати більші осьові і радіальні навантаження;

- володіють більшою механічною швидкістю буріння;

- оснащені асиметричною схемою промивання вибою;

- менш енерговитратні.

Опираючись на дослідження [2-4] та отримані результати, встановлено низку обов'язкових вимог до вибору і використання доліт у процесі буріння ПСС і ГС, зокрема:

- 1) енергоефективність використання бурових доліт визначається осьовим навантаженням і боковою силами як основними чинниками формування вибою і стінки свердловини, що діють на нього;

- 2) енергоефективне використання лопатевих доліт порівняно із шарошковими можливе при збільшенні механічної швидкості проходки більше ніж в 5 разів;

- 3) гідромоніторну систему промивання доліт можна вважати енергоефективною, якщо у разі її використанні зростає в 2 і більше разів механічна швидкість буріння свердловини;

- 4) недовантаження бурового долота осьовою силою внаслідок опору осьовому переміщенню БК обумовленого тертям і адгезійним її прилипанням до стінок свердловини стає причиною зменшення подачі енергії для руйнування гірської породи вибою і тим самим зниження показників буріння;

- 5) показник мінімальної енерговитратності бурового долота можна використати як один із техніко-економічних показників буріння поряд із собівартістю метра проходки і рейсовою швидкістю буріння.

### Література

- 1 Федоров В. Научные основы режимов бурения [Текст] / В. С. Федоров. – Гостоптехиздат, 1951. – 185 с.

- 2 Чудик І. Енергозатрати в процесі буріння свердловин долотами різних конструкцій [Текст] / [І. І. Чудик, В. Р. Процюк, І. В. Підберезький] // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2009. – № 4(22). – С. 110-113.

- 3 Чудик І. Про затрати гідравлічної потужності на промивання свердловини [Текст] / І. І. Чудик // Нафтогазова енергетика. – 2007. – № 4(5). – С. 54-59.

- 4 Одношарошкові долота [Текст] / [А. В. Зубарев, Г. И. Матвеев, Ю. В. Рыжиков та ін.]. – М.: Недра, 1971. – 176 с.

- 5 Мислюк М.А. Довідник [Текст] // М. А. Мислюк, І. Й. Рибчич, Р. С. Яремійчук. – Київ: Інтерпрес, 2005. – 304 с. – Т. 5. Промивання свердловини. Відробка доліт.

- 6 Kryzhanivsky Y. One of cases of inefficient energy expenditure during well drilling operations. The international symposium. Kryzhanivsky Y., Chudyk I., Karpuk R. – Baia Mare, Romania. – 2008. – С. 47.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
28.09.10

Рекомендована до друку професором  
Я.С. Коцкуличем