

УДК 622.243.054:004.18

ВПЛИВ ОКРЕМИХ ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ НА ЕНЕРГОЗАТРАТИ ПРИ РОТОРНОМУ СПОСОБІ БУРІННЯ

І.І. Чудик

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (03422) 45560;

e-mail: chudoman@ukr.net

Наводиться аналіз витрат механічної енергії при бурінні свердловин з метою визначення оптимальних співвідношень між параметрами режиму буріння, конструкції свердловини, потужністю приводу долота, а також насосів для подачі бурового розчину, що призведе до скорочення собівартості і енергоємності метра проходки. Заплановано в перспективі подальші дослідження в даному напрямі.

Приведен анализ расхода механической энергии при бурении скважин с целью определения оптимальных соотношений между параметрами режима бурения, конструкцией скважины, мощностью привода вращения долота, а также насосов для подачи бурового раствора, что приведет к сокращениям себестоимости и энергоёмкости метра проходки. Намечены перспективы дальнейших исследований в данном направлении.

The analysis of mechanical energy expense by different ways well drilling with the aim of optimum ratio determination between drilling technique parameters, well design, bit rotation drive power and mud pump power is advanced. It will reduce prime cost and power intensity of penetration per meter. Perspectives of further researches in this direction are planned.

Основна кількість енергії, спожитої під час буріння, поглинається процесами, які пов'язані із продуктивністю доліт і спуско-підймальними операціями (СПО). Загальна потужність, встановлена у глибокому бурінні, складає 1000-2000 кВт, сумарна витрата енергії на одну свердловину досягає кількох мільйонів кіловат-годин, вартість яких становить сотні тисяч доларів [1]. У процесі буріння свердловини ручна праця зведена до мінімуму і робота над поглибленням вибою виконується за допомогою бурових насосів і ротора. При СПО значне місце займає ручна праця. Кількість рейсів на свердловинах глибиною може досягнути 400 і більше, а протягом кожного необхідно виконувати більше 270 однакових, циклічно повторних, важких (у ручному плані), операцій зі скручування і розкручування бурильних труб і встановлення свічок за палець бурової вежі.

Зважаючи на актуальність проблеми енергозбереження у промисловості, доцільним є дослідження в даному напрямі. Це вимагає більш глибокого наукового вивчення проблеми енергозатрат у процесі буріння для визначення основних чинників та шляхів мінімізації.

Під час буріння свердловини роторним способом більша частина енергії споживається буровими насосами, ротором та лебідкою:

$$E = E_{БУР} + E_{СПО}, \quad (1)$$

де: $E_{БУР}$ і $E_{СПО}$ – відповідно енергозатрати при бурінні та спуско-підймальних операціях (СПО).

$$E_{СПО} = E_{П} + E_{К}, \quad (2)$$

де: $E_{П}$ і $E_{К}$ – відповідно потенціальна і кінетична енергії, витрачені при СПО.

Енергозатрати на підймання першої свічки бурильної колони (БК) описуються такою залежністю:

$$E_{СПО1} = G_{БК} \cdot \beta \cdot k \cdot \left[l_{СВ} + \frac{V^2}{2 \cdot g} \right], \quad (3)$$

де: $G_{БК}$ – вага БК (сумарна) в повітрі;
 $l_{СВ}$ – довжина однієї свічки БК, яка відповідає висоті підйому кронблока;
 β – коефіцієнт Архімеда;
 k – коефіцієнт врахування додаткових сил опору при осьовому переміщенні БК у свердловині. $k = 1 \div 2$;
 V – швидкість підйому БК із свердловини при СПО.

Сумарні затрати енергії при підйомі БК із свердловини визначаються:

$$E_{СПО} = \left[G_{БК} \cdot k - \frac{n-1}{2} \cdot l_{СВ} \cdot q_{БК} \right] \times \beta \cdot n \cdot \left[l_{СВ} + \frac{V^2}{2 \cdot g} \right], \quad (4)$$

де: n – кількість свічок БК, піднятих із свердловини;

$q_{БК}$ – вага погонного метра БК.

Прийнявши $n = \frac{H_{СВ}}{l_{СВ}}$, а $G_{БК} = H_{СВ} \cdot q_{БК}$,

отримуємо:

$$E_{СПО} = \left[H_{СВ} \cdot (2 \cdot k - 1) + l_{СВ} \right] \times \beta \cdot \frac{q_{БК} \cdot H_{СВ}}{2 \cdot l_{СВ}} \cdot \left[l_{СВ} + \frac{V^2}{2 \cdot g} \right], \quad (5)$$

де: $H_{СВ}$ – глибина свердловини.

На механічне буріння свердловини витрачається енергія, яка описується залежністю:

$$E_{БУР} = E_{ПР} + E_{Х.О} + E_{Г.П}, \quad (6)$$

де: $E_{ПР}$, $E_{Х.О}$, $E_{Г.П}$ – частки енергії, витрачені під час промивання свердловини, при обертанні БК у стовбурі виробки та руйнуванні гірської породи (ГП) долотом.

$$E_{ПР} = \frac{Q_{БР} \cdot P_{СУМ} \cdot h_{БУР}}{V_{МЕХ}}, \quad (7)$$

де: $Q_{БР}$, $P_{СУМ}$ – подача БР та сумарні втрати тиску під час промивання свердловини;

$h_{БУР}$ – довжина інтервалу буріння при $V_{МЕХ} = idem$.

$$E_{Х.О} = \frac{\omega \cdot M_{ОП}^{ОБ} \cdot h_{БУР}}{V_{МЕХ}}, \quad (8)$$

де: $M_{ОП}^{ОБ}$ – момент опору тертя під час обертання БК у стовбурі свердловини з кутовою швидкістю ω ;

$$E_{Г.П} = \frac{\omega \cdot M_{ОП}^P \cdot h_{БУР}}{V_{МЕХ}}, \quad (9)$$

де: $M_{ОП}^P$ – момент опору при руйнуванні ГП долотом.

З існуючих наукових досліджень відомо, що величини $Q_{БР}$, $P_{СУМ}$, $M_{ОП}^{ОБ}$, $M_{ОП}^P$ мають змінний характер і залежать від цілого ряду режимно-технологічних параметрів і конструктивного виконання обладнання для буріння:

$$Q_{БР} = f(V_{МЕХ}, \rho_{ГП}, \rho_{БР}, C, D_{ДОЛ}, d_{БТ} \dots); \quad (10)$$

$$P_{СУМ} = f(Q_{БР}, \rho_{ГП}, \rho_{БР}, l_{БК}, D_{ДОЛ}, d_{БТ}, H_{СВ} \dots); \quad (11)$$

$$M_{ОП}^{ОБ} = f(G_{ДОЛ}, \omega, \alpha, \mu, l_{БК}, D_{ДОЛ}, H_{СВ}, d_{БТ}, \rho_{БР} \dots); \quad (12)$$

$$M_{ОП}^P = f(G_{ДОЛ}, \omega, Q_{БР}, H_{СВ}, D_{ДОЛ}, d_{БТ}, b, h, t \dots); \quad (13)$$

де: $\rho_{ГП}$, C – густина ГП та концентрація шламу в БР КП;

$D_{ДОЛ}$, $d_{БТ}$ – діаметри долота і БК;

$l_{БК}$ – довжина БК;

$G_{ДОЛ}$ – осьове навантаження на долото;

α – зенітний кут нахилу осі свердловини;

μ – коефіцієнт тертя БК об стінки свердловини;

b , h , t – параметри оснащення долота.

За залежностями (10) – (13), затрати енергії у процесі буріння свердловини визначаються:

$$E_{БУР} = \frac{h_{БУР}}{V_{МЕХ}} \times \left[Q_{БР} \cdot P_{СУМ} + \omega \cdot \left(M_{ОП}^{ОБ} + M_{ОП}^P \right) \right]. \quad (14)$$

Виразивши окремі складові функціоналів (6) і (15) залежностями (10) – (14), отримуємо:

$$E = \left[H_{СВ} \cdot (2 \cdot k - 1) + l_{СВ} \right] \cdot \beta \cdot \frac{q_{БК} \cdot H_{СВ}}{2 \cdot l_{СВ}} \times \left[l_{СВ} + \frac{V^2}{2 \cdot g} \right] + \frac{h_{БУР}}{V_{МЕХ}} \times \left\{ Q_{БР}^3 \cdot \rho_{БР} \times \left[H_{СВ} \cdot (a_{КП} + a_{БТ}) + a_{ДОЛ} + a_{ОБВ} \right] + \omega \cdot \left[b \cdot \rho_{БР} \cdot \left[\frac{30 \cdot \omega}{\pi} \right]^{1.7} \cdot H_{СВ} \cdot d_{БТ}^2 + a_0 \cdot \left(\frac{2.9}{\omega} + 0.4 \right) \cdot D_{ДОЛ}^2 \cdot G_{ДОЛ} + k_{\delta} \cdot D_{ДОЛ} \right] \right\}, \quad (15)$$

де: $a_{КП}$, $a_{БТ}$, $a_{ДОЛ}$, $a_{ОБВ}$ – коефіцієнти гідравлічних втрат тиску в елементах циркуляційної системи;

a_0 – коефіцієнт твердості ГП для доліт типів ОК – М ($a_0 = 0.5 \div 1$);

b – коефіцієнт опору обертання БК у свердловині, [7];

k_{δ} – коефіцієнт опору обертання навантаженого долота залежно від типу його опори ($k_{\delta} = 1500$ – проста опора в долота, $k_{\delta} = (3000 \div 4500)$ – ущільнена опора в долота).

Для встановлення впливу $Q_{БР}$, $V_{МЕХ}$, $G_{ДОЛ}$, ω , $\rho_{БР}$, $H_{СВ}$ на енергозатрати у процесі буріння заданого інтервалу, довжиною $h_{БУР}$, механічну швидкість буріння $V_{МЕХ}$ виражають через залежність [1]:

$$V_{МЕХ} = V_0 \times e^{-a_3 \cdot \left[(\rho_{БР} + \Delta\rho) \cdot g \cdot h_{БУР} + Q_{БР}^2 \cdot a_{КП} - P_{ПЛ} \right]}, \quad (16)$$

де: V_0 – початкова механічна швидкість буріння, яка не залежить від режимно-технологічних параметрів;

a_3 – емпіричний коефіцієнт;

$\Delta\rho$ – збільшення густини БР за рахунок насичення його шламом у КП;

$P_{ПЛ}$ – пластовий тиск на глибині $H_{СВ}$.

За даними досліджень Бревдо [2] для визначення V_0 можна використовувати такі залежності:

$$1) \quad V_0 = A_I \cdot G_{ДОЛ}^{\alpha}, \quad (17)$$

де: A_I , α – емпіричні коефіцієнти

$$A_I = (1.8 \div 9) \cdot 10^{-9}; \quad \alpha = 1.19.$$

$$2) \quad V_0 = \frac{G_{ДОЛ}^{\alpha} \cdot \omega^{\beta}}{b_2 \cdot \left[\frac{P_{Ш}}{P_{Ш1}} \right]^{k_{П}}}, \quad (18)$$

де β і b_2 – емпіричні коефіцієнти [2];

Таблиця 1 – Вихідні дані для аналітичних розрахунків

Вихідний параметр	Рис. 1	Рис. 2	Рис. 3	Рис. 4	Рис. 5	Рис. 6	Рис. 7
Довжина свічки (бурильної колони) $l_{CB}, (l_{БК}), м$	36 (360)						
Швидкість підйому свічки при СПО, м/с	0.3						
Коефіцієнти a_3, b, a_0	1.5·10 ⁻⁷ 0.99·10 ⁻² 0.75						
Збільшення густини БР в КП, кг/м ³	20						
$q_{БК}, (d_{БТ}), Н/м (м)$	250 (0.1143)						
Діаметр і кільк. насадок долота, м (шт)	0.01 (3)						
$V_{МЕХ}, м/год$	36 -						
Густина БР проектна, кг/м ³	1100	1000-1400	1200				
Пластовий тиск, МПа	3.2					2.5-4	4
Кутова швидкість обертання БК, с ⁻¹	6.28				-		2-14
Подача насоса, л/с	-				5-11	15	-
Діаметр свердловини, см	19.05			19-27	19.05		
Концентрація шламу в БР КП, %	1-5	3					2
Осьове навантаження на долото, кН	200		50-250	50	200		150

$P_{шл}$ – твердість за штампом ГП, в якій рівень початкових механічних швидкостей для всіх типів доліт є однаковим.

Окрім (16), $V_{МЕХ}$ виражається такою формулою [1, 4-6 і ін.]:

$$V_{МЕХ} = \frac{Q_{БР} \cdot (\rho_{КП} - \rho_{БР})}{S_{ВИБ} \cdot (\rho_{ГП} - \rho_{БР})} = \frac{Q_{БР} \cdot C}{S_{ВИБ}}, \quad (19)$$

де: $\rho_{КП}$ – густина БР у кільцевому просторі;

$S_{ВИБ}$ – площа вибою стовбура свердловини зі врахуванням його кавернозності.

Визначення мінімуму функціоналу (15) окремо для кожного техніко-технологічного параметра виконується класичним методом, а саме:

$$\frac{dE}{dV_{МЕХ}} = 0 \Rightarrow V_{МЕХ}; \quad (20)$$

$$\frac{dE}{d\omega} = 0 \Rightarrow \omega; \quad (21)$$

$$\frac{dE}{dQ_{БР}} = 0 \Rightarrow Q_{БР}. \quad (22)$$

За залежностями (22)-(22) визначаються величини $Q_{БР}, V_{МЕХ}, G_{ДОЛ}, \omega$ при всіх інших сталих, що забезпечують встановлення окремо техніко-технологічних параметрів буріння, у яких енергозатрати процесу буріння будуть мінімальними.

У результаті було отримано залежності для вивчення $Q_{БР}$ та $V_{МЕХ}$, при яких $E \rightarrow \min$:

$$Q_{БР}^{ОПТ} = \left\{ \left(\omega \cdot \left[\rho_{БР} \cdot \omega^{0.7} \cdot H_{СВ} \cdot d_{БТ}^2 + \right. \right. \right. \quad (23)$$

$$\left. \left. \left. + a_0 \cdot \left(\frac{2.9}{\omega} + 0.4 \right) \cdot D_{ДОЛ}^2 \cdot G_{ДОЛ} + k_d \cdot D_{ДОЛ} \right] \right) \times \right.$$

$$\left. \left(2 \cdot \rho_{БР} \cdot \left[H_{СВ} \cdot (a_{КП} + a_{БТ}) + a_{ДОЛ} + a_{ОБВ} \right] \right)^{-1} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$V_{МЕХ} = \frac{C}{S_{ВИБ}} \cdot \left\{ \left(\omega \cdot \left[b \cdot \rho_{БР} \cdot \omega^{0.7} \cdot H_{СВ} \times \right. \right. \right. \quad (24)$$

$$\left. \left. \left. \times d_{БТ}^2 + a_0 \cdot \left(\frac{2.9}{\omega} + 0.4 \right) \cdot D_{ДОЛ}^2 \cdot G_{ДОЛ} + k_d \cdot D_{ДОЛ} \right] \right) \times \right.$$

$$\left. \left(2 \cdot \rho_{БР} \cdot \left[H_{СВ} \cdot (a_{КП} + a_{БТ}) + a_{ДОЛ} + a_{ОБВ} \right] \right)^{-1} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

Розв'язок рівняння відносно $\omega_{ОПТ}$ дає мінімум енергозатрат процесу буріння.

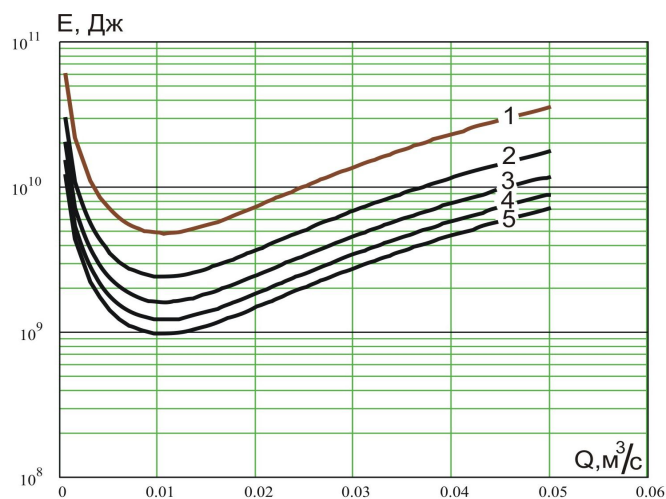
$$-Q_{БР}^3 \cdot \frac{\rho_{БР} \cdot \beta}{\omega} \cdot \left[H_{СВ} \cdot (a_{КП} + a_{БТ}) + a_{ДОЛ} + a_{ОБВ} \right] +$$

$$+ (1 - \beta) \cdot \left[b \cdot \rho_{БР} \cdot \omega^{0.7} \cdot H_{СВ} \cdot d_{БТ}^2 + \right. \quad (25)$$

$$\left. + a_0 \cdot \left(\frac{2.9}{\omega} + 0.4 \right) \cdot D_{ДОЛ}^2 \cdot G_{ДОЛ} + k_d \cdot D_{ДОЛ} \right] +$$

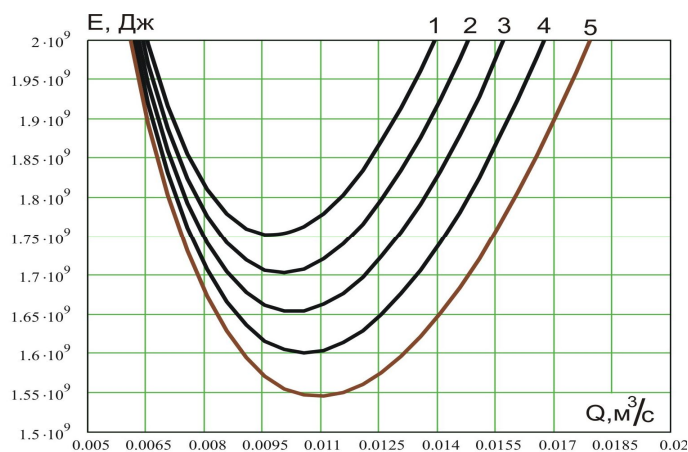
$$+ \omega_{ОПТ} \cdot \left[0.7 \cdot \frac{\rho_{БР} \cdot b}{\omega_{ОПТ}^{0.3}} \cdot H_{СВ} \cdot d^2 - \right.$$

$$\left. - 2.9 \cdot a_0 \cdot \frac{D_{ДОЛ}^2}{\omega_{ОПТ}^2} \cdot G_{ДОЛ} \right] = 0.$$



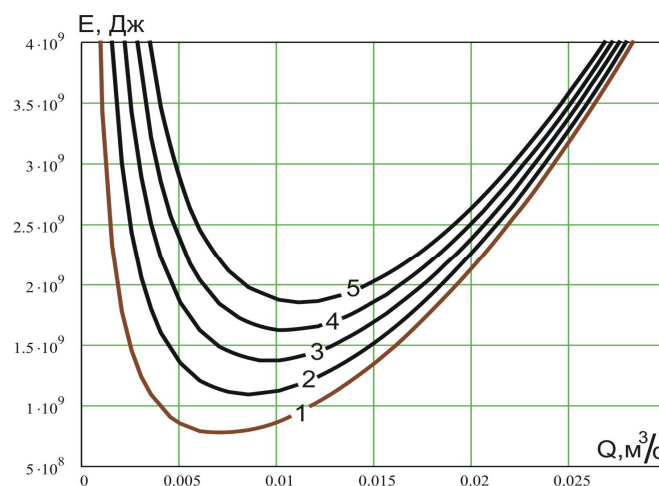
1 – $C=0.01$; 2 – $C=0.02$; 3 – $C=0.03$; 4 – $C=0.04$; 5 – $C=0.05$

Рисунок 1 – Графік зміни енергії, витраченої на одне довбання роторним способом з різними концентраціями шламу в буровому розчині кільцевого простору



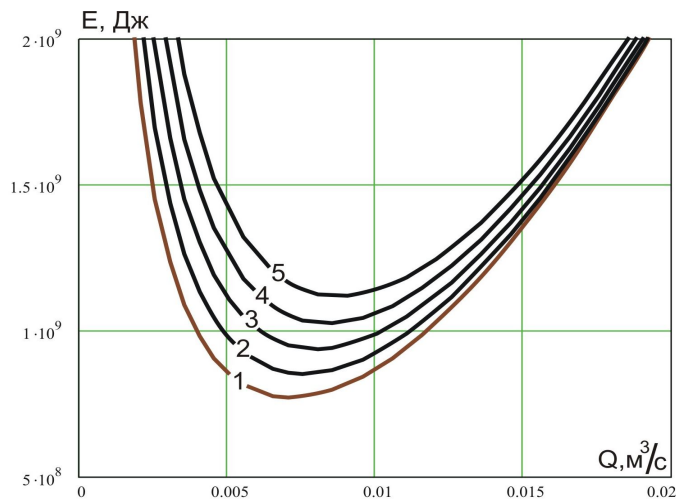
1 – $\rho_{БР}=1400 \text{ кг/м}^3$; 2 – $\rho_{БР}=1300 \text{ кг/м}^3$; 3 – $\rho_{БР}=1200 \text{ кг/м}^3$; 4 – $\rho_{БР}=1100 \text{ кг/м}^3$; 5 – $\rho_{БР}=1000 \text{ кг/м}^3$

Рисунок 2 – Графік зміни енергії, витраченої на одне довбання роторним способом буріння з різними густинами БР



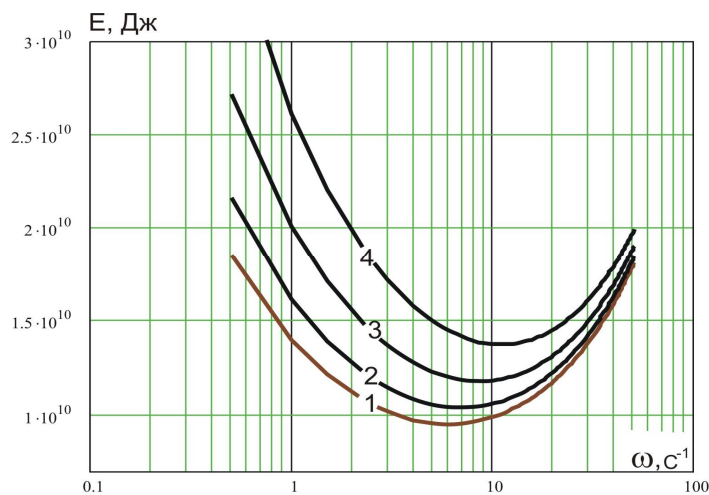
1 – $G_{\text{дол}}=5 \text{ т}$; 2 – $G_{\text{дол}}=10 \text{ т}$; 3 – $G_{\text{дол}}=15 \text{ т}$; 4 – $G_{\text{дол}}=20 \text{ т}$; 5 – $G_{\text{дол}}=25 \text{ т}$

Рисунок 3 – Графік зміни енергії, витраченої на одне довбання роторним способом буріння з різним осьовим навантаженням на долото



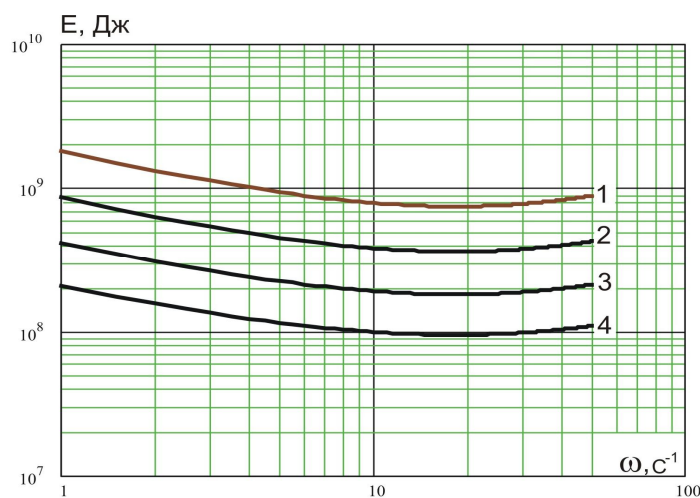
1 – D=0.1905 мм; 2 – D=0.2105 мм; 3 – D=0.2305 мм; 4 – D=0.2505 мм; 5 – D=0.2705 мм

Рисунок 4 – Графік зміни енергії, витраченої на одне довбання роторним способом буріння з різними діаметрами доліт



1 – Q_{БР}=25 МПа; 2 – Q_{БР}=30 МПа; 3 – Q_{БР}=35 МПа; 4 – Q_{БР}=40 МПа

Рисунок 5 – Графік зміни енергії, витраченої на одне довбання роторним способом буріння з різними подачами БР на вибій



1 – P_{пл}=2.5 МПа; 2 – P_{пл}=3.0 МПа; 3 – P_{пл}=3.5 МПа; 4 – P_{пл}=4.0 МПа

Рисунок 6 – Графік зміни енергії, витраченої на одне довбання роторним способом буріння з різними пластовими тисками на вибої свердловини

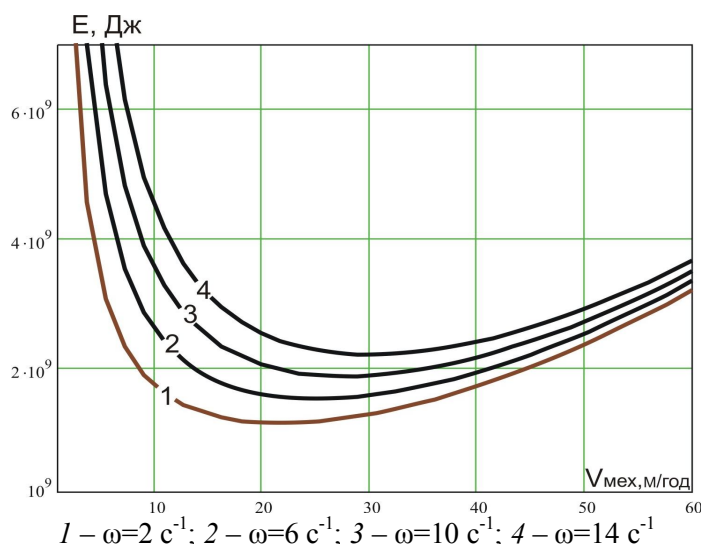


Рисунок 7 – Графік зміни енергії, витраченої на одне довбання роторним способом буріння з різними швидкостями обертання БК

У результаті проведених розрахунків за даними табл. 1 та аналізу отриманих результатів було встановлено, що запропонований підхід дозволяє визначити оптимальні значення окремих параметрів режиму буріння, при яких сумарні енергозатрати процесу обертального (роторного) буріння є мінімальними, а саме:

1. У разі збільшення механічної швидкості буріння свердловини (при $Q_{БР} = const$) в буровому розчині кільцевого простору зростає концентрація шламу C , яку з метою недопущення прихоплення БК необхідно контролювати і не допускати її підвищення більше 5% шляхом збільшення подачі БР на вибій свердловини. Згідно з рис. 1 при певних техніко-технологічних параметрах буріння функціонал (16) набуває мінімуму при витраті 10 л/с в діапазоні зміни концентрації шламу БР від 1 до 5% по об'єму. Причому збільшення C в БР зумовлює зменшення енергозатрат приблизно на 40% при встановлених вихідних параметрах (табл. 1), при умові $V_{МЕХ} = const$.

2. У разі збільшення густини БР зменшується вага БК і зростають гідравлічні втрати тиску в елементах циркуляційної системи, гідростатичний та гідродинамічний тиски на вибої, момент опору обертання БК у свердловині. Згідно рис. 2 встановлено, що мінімум енергії зі збільшенням густини БР можливий при малих подачах насоса $Q_{БР}$. Зміна густини БР від 1000 до 1400 кг/м³ (на 40%) викликає зростання енергозатрат процесу приблизно на 14% і мінімум енергії при цьому є характерним при $Q_{БР} = 9 \div 11 л/с$, (рис. 2).

3. При різних значеннях осьового навантаження на долото та подачі БР було встановлено мінімум енергозатрат, а також виявлено, що збільшення $G_{ДОЛ}$ від 50 до 250 кН (в 5 разів) викликає зростання E від 800 до 1800 МДж (в 2.2 рази), (рис. 3). Збільшення діаметра свердловини, тим самим і площі кільцевого

простору, технологічно обумовлює зростання подачі БР. Тому для наведених вихідних даних (табл. 1) зміна діаметра свердловини від 0.1905 м до 0.2705 м (в 1.4 рази) зумовлює зростання енергії на процес буріння свердловини в 1.5 рази і для наведених вихідних даних величина $Q_{БР}$, за якої $E \rightarrow \min$ змінюється від 0.007 до 0.009 м³/с, (рис. 4). У разі збільшення швидкості обертання БК у стовбурі свердловини (рис. 5) для досягнення мінімуму енергозатрат необхідно збільшувати подачу БР. Тому, при зміні $Q_{БР}$ від 0.025 м³/с до 0.04 м³/с для E характерним є збільшення ω від 5 до 11 с⁻¹ та енергозатрат на 60% від (9000 до 14000 МДж).

4. Залежність (16), для якої $V_{МЕХ}$ визначається за формулою (17), описує енергозатрати у процесі буріння свердловини роторним способом за пластивим тиском $P_{ПЛ}$ (рис. 6). При рівновазі тисків та депресії енергоспоживання процесу буріння є мінімальним. Згідно з наведеними вихідними даними (табл. 1), мінімум енергії для встановлених $P_{ПЛ}$ є характерним для діапазону зміни ω від 15 до 25 с⁻¹, що відповідає бурінню з використанням вибійних двигунів. Згідно рис. 7 збільшення ω викликає зростання величини мінімуму енергозатрат (в точці мінімуму) на 80% з підвищенням $V_{МЕХ}$ в 1.5 рази.

5. На основі проведених досліджень встановлено, що за певних техніко-технологічних і гірничо-геологічних умов буріння характерним є мінімум енергозатрат. Досягнути його у процесі буріння свердловини можна шляхом регулювання $Q_{БР}$, ω , C , $V_{МЕХ}$, $\rho_{БР}$, $G_{ДОЛ}$, $D_{ДОЛ}$ у певному поєднанні з іншими техніко-технологічними параметрами.

Література

- 1 Маковей Н. Гидравлика бурения / Перевод с румынского / Н. Маковей. – М.: Недра, 1986. – 537 с.
- 2 Бревдо Г.Д. Проектирование режимов бурения / Г. Бревдо. – М.: Недра, 1988. – 200 с.
- 3 Кирия Т.А. Совершенствование проходки глубоких скважин. – М.: Недра, 1971. – 167 с.
- 4 Хакімов Л. З. Оптимальні витрати промивальної рідини для буріння свердловини діаметром 215,9 мм / Л. З. Хакімов, В. П. Дверій // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – №4. – С. 24 – 25.
- 5 Лігоцький М. В. Оптимальні швидкості у кільцевому просторі для винесення вибуреної породи / М. Лігоцький // Нафтова і газова промисловість. – 2002. – №4. – С. 24 – 25.
- 6 Чудик І. І. Оптимальна подача на вибій при бурінні свердловини / І.І.Чудик, Р.Б.Бабій // Нафтова енергетика. – 2007. – №3(4). – С. 71 – 75.
- 7 Практические расчеты в бурении / В. С. Федоров, В. Г. Беликов, Ф. Д. Зенков и др. – М.: Недра, 1966. – 600 с.

*Стаття постуила в редакційну колегію
27.05.09*

*Рекомендована до друку професором
Семенцовим Г.Н.*