

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТИ ПОВІТРЯ ТА ВИБОРУ РОЗМІРІВ ОТВОРІВ ПРОДУВАЛЬНИХ НАСАДОК ДОЛІТ ДЛЯ ГІРНИЧОРУДНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

І.В.Воєвідко, О.В.Калічак, І.І.Стеліга, Р.І.Воєвідко

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (03422) 42464;

e-mail: math@nung.edu.ua

Проведено короткий аналіз методів визначення раціональної витрати повітря у процесі буріння в умовах гірничорудних кар'єрів. На основі теорії транспортування частинок породи розроблено основні аспекти розрахунку необхідної витрати повітря. Розроблено методичні основи вибору необхідного розміру отвору насадки у взаємозв'язку із розмірами каналів в лапах долота. Зазначено етапи визначення витрати повітря і вибору розміру отворів насадок доліт, які складають основу розробленої методики.

Дан краткий анализ методов определения рационального расхода воздуха при бурении в условиях горнорудных карьеров. На основании теории транспортирования частиц породы разработаны основные аспекты расчета необходимого расхода воздуха. Разработаны методические основы выбора необходимого размера сопла насадки во взаимосвязи с размерами каналов в лапах долота. Отмечены этапы определения расхода воздуха и выбора размеров отверстий насадок долот, составляющие основу разработанной методики.

The short analysis in methods for definition the rational air expense during drilling in mining conditions has been done. The main aspects for calculation the necessary air expense on the base of theory of rock transportation have been worked out. The basic aspects for choice of sufficient size of planting aperture in connection with channel sizes of bit have been worked-out. The shown aspects for definition the air expense and choice of aperture sizes of bits form the body of worked-out methodize.

У процесі буріння вибухових свердловин основна увага приділяється такому режимному параметру, як витрата повітря, що обумовлює якість очищення вибою свердловини. Очевидно, що погіршення очищення вибою призводить не тільки до пониження механічної швидкості буріння, але й до зменшення стійкості долота.

Правильний підрахунок необхідної витрати повітря у процесі буріння з продуванням визначає не тільки ефективність, але, часто, й можливість буріння зазначеним способом. Перевищення витрати повітря призводить до невіправдано високих витрат на експлуатацію компресорів. У разі зменшення витрати можуть виникнути ускладнення та аварії в процесі буріння, усунення яких вимагає витрат часу та коштів.

Загалом, процес транспортування шламу затрубним простором свердловин досить складний. Успіх винесення вибуреної породи, окрім несучої здатності повітряного потоку, залежить як від геологічних і гідрогеологічних чинників: фізико-механічних властивостей порід, їх питомої ваги, водонасиченості, розмірів і форми частинок шламу, так і від технічних чинників: способу руйнування породи, величини площі перерізу затрубного простору та умов руху частинок породи.

Теорія процесу транспортування шламу затрубним простором була розроблена в 50-ті роки минулого століття. Значний вклад у вирішення цієї проблеми внесли такі зарубіжні вчені, як К.Нікольсон [1], Д. Морріс і Р. Рамсей [2], Ф. Мак Лауфлін [3], Д.Скотт [4] і Р. Енжел [5].

Виходячи із практичного досвіду, зарубіжні вчені задавалися так званою „еквівалентною швидкістю” потоку повітря за нормальних атмосферних умов. Підймальна сила потоку при заданій „еквівалентній швидкості” вважається достатньою для ефективного усунення шламу із свердловини. Розрахунок витрати повітря Q проводять таким чином, щоб підймальна сила над вибоєм свердловини була б не меншою за підймальну силу потоку у нормальних умовах і „еквівалентній швидкості”. Більшість зарубіжних вчених (Д. Скотт, Д. Морріс, Р. Рамсей, Р. Енжел та інші) приймають, що для буріння суцільним вибоєм в неускладнених умовах $v_{\text{екв}}=15,25$ м/сек або 915 м/хв. Виходячи із величини „еквівалентної швидкості”, розраховується необхідна витрата повітря.

Найдосконалішою методикою розрахунку Q слід вважати методику, запропоновану Енжелом [5]. Хоча вона і базується на ряді припущень, все ж вона повніше враховує чинники, які впливають на величину витрати повітря. Однак, отримані Енжелом формули для розрахунку Q надзвичайно складні і користуватися ними практично неможливо.

Останнім часом, на основі практичного досвіду буріння свердловин з продуванням вибою повітрям сформувалася точка зору, що для ефективного очищення вибою свердловини у процесі буріння в твердих і міцних породах необхідно збільшити швидкість винесення шламу до 35 м/сек (2100 м/хв).

Практично всі типи тришарошкових доліт, що призначені для застосування в гірничорудній промисловості, мають центральні посадки

для подавання повітря на вибій свердловини і канали в лапах і цапфах лап для продування їх опор.

Однак, до останнього часу не проведені комплексні дослідження, спрямовані на виявлення раціонального співвідношення витрат повітря через центральну насадку і канали в лапах доліт. Існує точка зору [8], що в опори доліт повинно поступати від 5 до 35% загальної витрати повітря. Такий діапазон можна вважати раціональним, однак методичного підходу до вибору розмірів вихідних отворів насадок для його забезпечення в літературі не наведено.

Таким чином, на даний час відсутня єдина методика розрахунку раціональної витрати повітря, оскільки не існує чіткої думки щодо ефективної швидкості винесення шламу. Питання ж вибору розмірів вихідних отворів насадок для раціонального розподілу розходу повітря між ними і каналами в лапах доліт для продування опор шарошок в літературі взагалі не висвітлені.

У даній статті відображено методичні основи визначення витрати повітря та вибору розмірів вихідних отворів доліт для забезпечення ефективного транспортування шламу та раціонального розподілу потоку повітря між насадкою і каналами лап доліт.

Розглянемо процес транспортування шламу затрубним простором при використанні газоподібного циркулюючого агента у відповідності з існуючою теорією.

Кінетична енергія висхідного потоку повітря в затрубному просторі або, як її часто називають, виносна здатність висхідного потоку повітря може бути описана в загальному вигляді формулою:

$$A = C \rho_{\text{сер}} v^2, \quad (1)$$

де: C – коефіцієнт, що характеризує умови середовища; $\rho_{\text{сер}}$ – щільність повітряного потоку, $(\text{кг} \cdot \text{с}^{-2})/\text{м}^4$; v – швидкість повітря, м/с.

Знаючи, що швидкість потоку визначається рівнянням

$$v = \frac{Q}{F}, \quad (2)$$

(Q – розхід повітря, F – переріз затрубного простору), необхідно особливо ретельно підбирати відповідне співвідношення витрати повітря і площі затрубного простору.

Тверді частинки породи, що виносяться потоком повітря, не можуть мати швидкість, яка б дорівнювала швидкості повітря, оскільки на них діє сила земного тяжіння і вони ніби проковзують в цьому потоці. Однак, коли підймальна сила потоку стане рівною силі земного тяжіння, яка діє на цю частинку, остання стає в цьому середовищі невагомою і, продовжуючи ковзати в потоці, залишається практично в незмінному положенні відносно стінок свердловини і бурильних труб. Цю швидкість повітряного потоку в затрубному просторі називають критичною. Для винесення вибурених частинок на поверхню необхідно, щоб швидкість висхідного потоку була вищою за критичну.

Таким чином, повну швидкість потоку повітря в затрубному просторі можна записати у такому вигляді:

$$v = v_{\text{кр}} + v_{\text{над}}, \quad (3)$$

де: v – повна швидкість повітряного потоку; $v_{\text{кр}}$ – критична швидкість, яка забезпечує невагомість розрахункової частинки у висхідному потоці; $v_{\text{над}}$ – надлишкова швидкість потоку, яка забезпечує винесення частинки на поверхню.

Для визначення критичної швидкості висхідного потоку застосовують закон кількості руху [6]. За цим законом кількість руху дорівнює добутку маси частинки на швидкість. Виходячи із цього положення, розрахункова частинка може перебувати в стані рівноваги у тому випадку, коли кількість руху повітряного потоку в затрубному просторі, яка діє на поперечний переріз цієї частинки, буде дорівнювати кількості руху самої частинки.

Виходячи із вищезазначеного, було отримано спрощену формулу для розрахунку повної швидкості потоку повітря:

$$v = C \cdot \sqrt{d_c \frac{\gamma_c}{\gamma_n}} + v_{\text{над}}, \quad (4)$$

де: C – коефіцієнт форми частинки; d_c – умовний діаметр частинки – половина суми довжини і ширини; γ_c, γ_n – відповідно питома вага частинки і повітря.

Як видно з формули (4), критична швидкість висхідного потоку повітря в затрубному просторі (перша складова) залежить, в основному, від коефіцієнта форми C , тобто від форми самої частинки. Критична швидкість також залежить від умовного діаметра d_c частинки породи, питомої ваги гірської породи γ_c , в якій протікає процес буріння, і питомої ваги циркулюючого агента γ_n (в даному випадку повітря). Однак ці величини менше впливають на величину критичної швидкості, оскільки вони входять в формулу у степені 1/2.

Під час вибору форми розрахункової частинки слід враховувати, що породи по-різному руйнуються, мають неоднакову твердість і по-різному змінюють свою форму в результаті тєртя при підніманні на поверхню.

Частинки в'язких порід в процесі транспортування в затрубному просторі округлюються до форми кулі і при наближенні до гирла свердловини можуть утворювати сальники, тому процес буріння в таких породах пов'язаний із значним збільшенням витрати повітря.

Тверді частинки порід, як правило, зберігають форму призми. Часто у процесі буріння твердих порід на поверхні з'являються частинки у вигляді пластинок продовгуватої форми.

За формулою (4), на величину необхідної швидкості повітряного потоку має вплив також розмір розрахункової частинки породи. В практиці буріння ці частинки бувають різними, і для того, щоб долото не здійснювало зайвої роботи

на повторне подрібнення зруйнованої породи, потік повітря коло вибою повинен забезпечувати винесення зруйнованої породи первинної форми і розміру. Оскільки частинки породи при первинному руйнуванні бувають неправильної форми, але значними за розмірами, а в процесі піднімання в затрубному просторі вони зменшуються в розмірах і набувають більш обтічного вигляду, тому під час розрахунків буде правильно брати їх середні параметри.

В таблиці 1 наведені значення коефіцієнта С для різних форм частинок шламу, які визначені експериментальним шляхом [6].

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта С для різних форм частинок породи

| Форма частинок | Коефіцієнт С |
|----------------|--------------|
| Куля | 5,11 |
| Заокруглена | 3,20÷4,00 |
| Призма | 3,0 |
| Продовгувата | 2,65 |
| Пластинчаста | 2,35 |

Як видно із таблиці 1, всі частинки з точки зору їх форми можна узагальнити в дві основні групи:

1) м'які (пластичні), які під час винесення отримують заокруглену форму, що може наближатися до форми кулі;

2) міцні, які в процесі транспортування мало видозмінюють свою первинну форму і залишаються близькими до продовгуватої або призматичної форми.

Нами були проведені дослідження режимів роботи доліт 250,8 ОК-ПВ-Д115 на кар'єрі ВАТ "Південний ГЗК" Криворізького гірничорудного родовища, а також був проведений аналіз розмірів частинок шламу, які були винесені на поверхню.

Буріння проводилось в твердих і міцних породах (роговики, кварцити і магнетити, коефіцієнт міцності $f=15-18$ за шкалою Протод'яконова), питома вага яких складала 3-4,5 г/см³.

Візуальний огляд частинок вибуреної породи показав, що вони мають форму призми

або продовгуватих пластин, причому їх середнє значення довжини і ширини (умовний діаметр) не перевищувало 10 мм. Тобто, в даному випадку коефіцієнт форми частинок породи С знаходився в діапазоні 2,4-3,0.

За формулою (4) були розраховані критичні величини швидкості повітря в затрубному просторі для $C=2,4$ і $3,0$ і витрати повітря, які повинні забезпечувати ці значення швидкості.

На наступному етапі проводились дослідження впливу величини надлишкової швидкості повітря на механічну швидкість буріння, результати яких показали, що зі зростанням її понад 5 м/с ріст механічної швидкості буріння різко зменшувався.

В таблиці 2 наведені значення критичної і повної швидкості руху повітря в затрубному просторі для умов Криворізького гірничорудного кар'єру, які були розраховані за формулою (4) на основі отриманих в промислових умовах даних.

Як видно із таблиці, значення повної швидкості руху повітря в затрубному просторі змінюється в діапазоні 804-1932 м/хв залежно від форми, розміру і питомої ваги частинок. Для $d_ч=10$ мм діапазон значень повної швидкості повітря складає 1006 – 1932 м/хв.

На основі зазначеного діапазону повної швидкості руху повітря в затрубному просторі було проведено розрахунок об'ємної витрати повітря для різних співвідношень діаметра свердловини (250,8 мм) і бурильної колони, що мають місце в процесі її абразивного зношування. Зроблено висновок, що об'ємна витрата повітря повинна знаходитись в діапазоні 15-32 м³/с, який можна рахувати раціональним.

Відомо, що при адиабатичному витоку газу через сопло, коли відношення абсолютного тиску після витоку p_0 до абсолютного тиску до витоку p_1 буде рівне або менше величини

$$\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (k - \text{показник адиабати}), \text{ швидкість}$$

руху газу в мінімальному перерізі сопла ω_0 буде рівною швидкості звуку [7]. Для повітря цей процес протікає за співвідношенням $p_0/p_1 \leq 0,53$.

Таблиця 2 – Значення критичної і повної швидкостей руху повітря

| Коефіцієнт форми частинок породи С | Умовний діаметр частинок, мм | Питома вага, г/см ³ | Критична швидкість потоку, м/хв | Повна швидкість потоку, м/с | |
|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | | | Надлишкова швидкість, 300 м/хв | Надлишкова швидкість, 600 м/хв |
| 2,4 | 5 | 3,0 | 504 | 804 | 1100 |
| 3,0 | | | 630 | 930 | 1230 |
| 2,4 | 5 | 4,5 | 620 | 920 | 1220 |
| 3,0 | | | 774 | 1074 | 1374 |
| 2,4 | 10 | 3,0 | 706 | 1006 | 1306 |
| 3,0 | | | 882 | 1182 | 1482 |
| 2,4 | 10 | 4,5 | 1065 | 1365 | 1665 |
| 3,0 | | | 1332 | 1662 | 1932 |

Оскільки в умовах буріння вибухових свердловин величина опору руху повітря в затрубному просторі настільки мала, що нею можна знехтувати, то можна вважати, що $\rho_0 \approx 1 \text{ кгс/см}^2$ і швидкість звуку досягається при $\rho_1 \approx 1,9 \text{ кгс/см}^2$.

При $\rho_1 \geq 1,9 \text{ кгс/см}^2$, коли в мінімальному перерізі сопла швидкість витоку повітря буде рівна швидкості звуку, і, якщо знехтувати втратами на тертя, теоретична вагова витрата повітря буде визначатися тільки параметрами його стану до витоку [7], а саме

$$G_T = F_0 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2}{k+1}} g v_1 p_1, \quad (5)$$

де: F_0 – площа сопла в мінімальному перерізі;
 g – прискорення вільного падіння;

v_1 – питома вага газу при тиску p_1 і температурі T_1 ;

p_1 – тиск газу перед витоком із сопла.

Після нескладних перетворень отримуємо наступну кінцеву формулу для визначення об'ємної витрати газу при $\rho_0/\rho_1 \leq 0,53$:

$$Q_T = 20 \frac{F_0 p_1}{\sqrt{T_1}} \left[\frac{\text{м}^3}{\text{хв}} \right], \quad (6)$$

де T_1 – абсолютна температура повітря до витоку, К.

Із формули видно, що, оскільки швидкість витоку повітря залишається сталою, витрата повітря зростає із збільшенням p_1 за рахунок збільшення питомої ваги повітря у вузькому перерізі сопла F_0 .

Зазвичай, фактична витрата визначається за формулою [8]:

$$Q = \mu \cdot Q_T = \mu \cdot 20 \frac{F_0 \cdot p_1}{\sqrt{T_1}}, \quad (7)$$

де μ – коефіцієнт витрати, що залежить від конструктивного виконання насадки.

Під час розрахунку витрати повітря через насадки з плавним входженням повітря $\mu=1$, а для його розрахунку при проходженні через опори долота $\mu=0,5-0,6$.

Існує точка зору, що в опори долота повинно надходити не більше 35% від загальної витрати повітря, яке надходить в породоруйнуючий інструмент [8].

Спочатку необхідно розрахувати витрату повітря через опори долота Q_2 за певного діапазону зміни P_1 , які в більшості випадків знаходяться в межах $2,5-5 \text{ кгс/см}^2$ (перепад тиску $2-4 \text{ кгс/см}^2$), а потім визначити витрату повітря через насадку: $Q_1=Q-Q_2$, де Q – загальна витрата повітря.

Такі розрахунки були проведені з допомогою формули (7) для долота 250,80К-ПВ, конструкцію якого можна вважати базовою, при $\mu=0,5$, $T_1=293\text{К}$ і сумарній площі поперечного перерізу каналів в цапфах $F_0=4,5\text{см}^2$. Різні значення загальної витрати повітря в даному випадку відображали реальні величини продуктивності компресорів, що застосовуються у процесі буріння. Результати розрахунку представлені

у вигляді графічних залежностей витрати повітря через канали цапфи в % від його загальної витрати за різних значень P_1 , які зображені на рис. 1.

Оскільки в опори долота повинно надходити не більше 35% від загальної витрати повітря, то із загального графічного поля можна виділити його раціональну частину, яка відповідає вищезазначеному критерію.

На графічних залежностях, що відповідають певним значенням P_1 , парами точок 1-1', 2-2', 3-3' і 4-4' окреслені діапазони значень загальної продуктивності повітря, а також його частки, яка потрапляє в опори долота.

На наступному етапі для реально існуючого діапазону значень витрати повітря, яке надходить в насадку, розраховуються мінімальні площі перерізу її сопла за формулою (7) і будується графічна залежність $F_0=f(Q_1)$ при різних значеннях p_1 .

Такі графічні залежності у вигляді прямих, що засвідчують пропорційний зв'язок між F_0 і Q_1 , показані на рис. 2. Парами точок 1-1', 2-2', 3-3' і 4-4', які відповідають аналогічним точкам на рис. 1, відокремлені діапазони значень Q_1 при витраті повітря в каналах цапфи, що не перевищує 35% загальної витрати.

Якщо точки сполучити, то отримаємо криву, яка окреслює поле раціональних співвідношень Q_1 і P_1 , що відповідає певним значенням F_0 і задовольняє прийнятому критерію. Як видно з рис. 2, раціональний діапазон для долота 250,8 ОК-ПВ охоплює діапазон значень Q_1 в межах $13-26 \text{ м}^3/\text{хв}$.

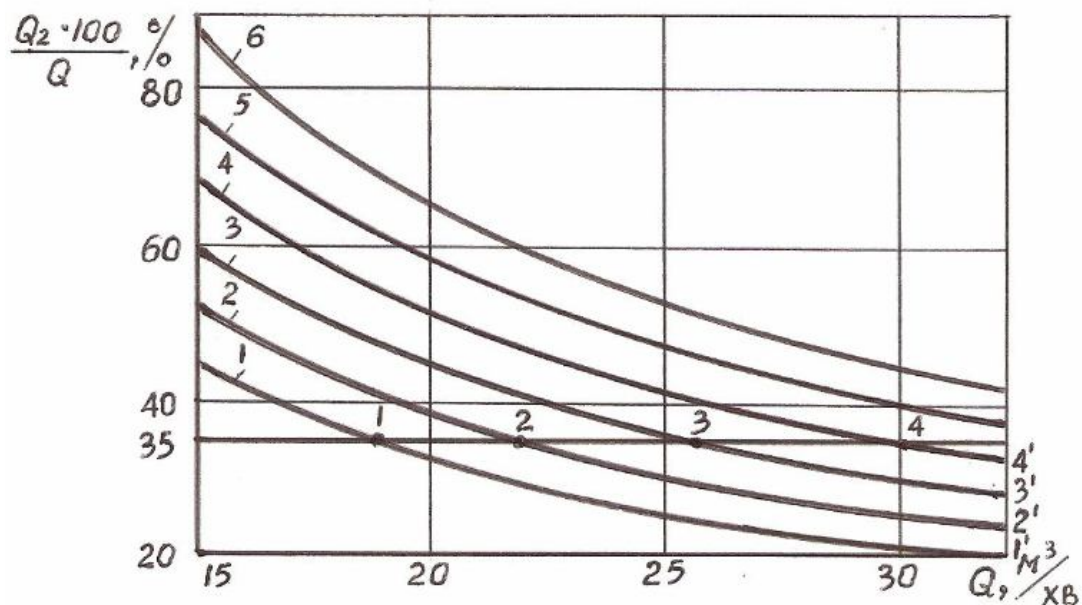
Оптимальними розмірами насадок слід вважати такі, мінімальна площа перерізу сопла яких знаходиться в межах $4,2-5 \text{ см}^2$, оскільки, в даному випадку, він охоплює максимальний діапазон величин загальної витрати повітря Q ($19-32 \text{ м}^3/\text{хв}$) при максимальному діапазоні значень тиску ($2,5-4,25 \text{ кгс/см}^2$).

Насадка долота 250,8 ОК-ПВ, площа мінімального перерізу якої складає $4,15 \text{ см}^2$, практично відповідає вищезазначеному критерію, оскільки співвідношення Q_1 і P_1 (за винятком $P_1=2,5\text{кгс/см}^2$) знаходяться в межах раціонального поля.

При зменшенні мінімальної площі поперечного перерізу насадки долота 250,8 ОК-ПВ, через неї буде проходити недостатня для ефективного очищення вибою кількість повітря. У разі збільшення зазначеного розміру до $5,5-6 \text{ см}^2$, звужується діапазон режимного параметра Q_1 і, як наслідок, Q , що, з рештою обмежує можливості використання таких доліт.

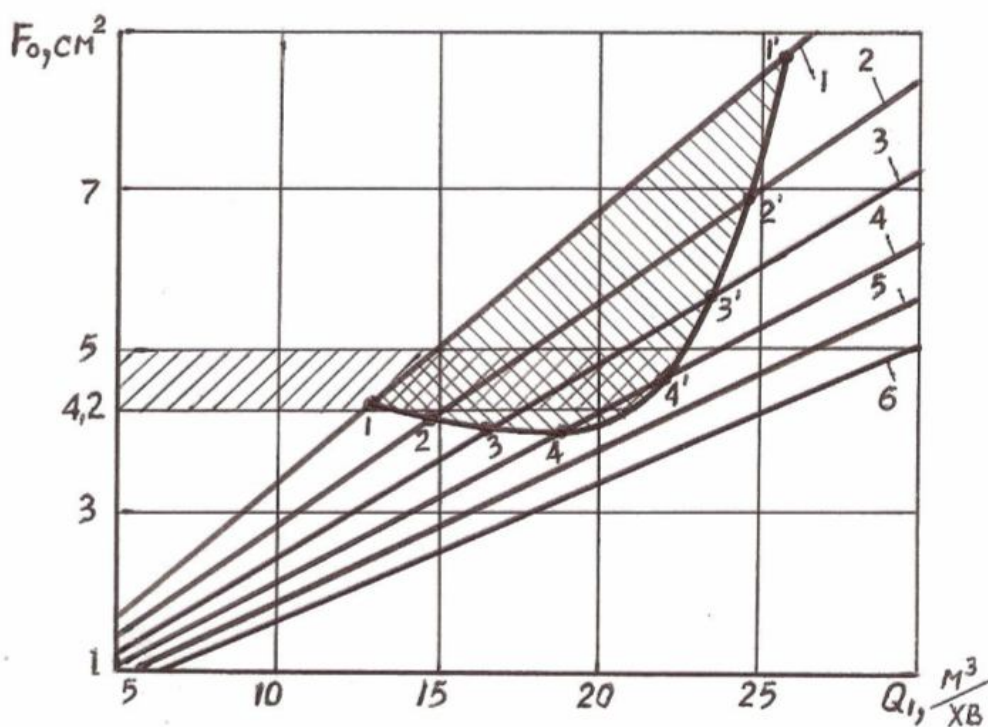
Отже, основні етапи визначення витрати повітря та вибору розмірів вихідних отворів насадок доліт для гірничорудної промисловості, які складають суть методики, полягають в наступному.

1. На підприємствах гірничої промисловості, які є споживачами доліт, уточнюються питома вага порід, форми та розміри шламу, що виноситься на поверхню, а також діаметр буриньових штанг.



1, 2, 3, 4, 5, 6 – P_1 рівне відповідно 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 і 5.0 кг/см²

Рисунок 1 – Залежність процентної витрати повітря через канали цапфи долота 250,8 ОК-ПВ



1, 2, 3, 4, 5, 6 – P_1 рівне відповідно 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 і 5.0 кг/см²

Рисунок 2 – Залежність площі мінімального перерізу насадки від витрати повітря через неї

2. За формулою (4) при різних співвідношеннях її складових визначається діапазон повної швидкості висхідного потоку повітря для забезпечення нормального винесення шламу на поверхню.

3. На основі зазначеного діапазону повної швидкості потоку за формулою (2) розраховуються значення об'ємної витрати повітря при різних робочих тисках компресорів.

4. За формулою (7) розраховуються витрати повітря через опори долота Q_2 при певному (робочому) діапазоні зміни тиску P_1 в бурильній колоні.

5. Розраховуються значення процентної витрати повітря через канали цапфи і графічно будується її залежність від загальної витрати $\frac{Q_2 \cdot 100}{Q} = f(Q)$ при різних значеннях тиску P_1

в бурильній колоні. На графічній залежності виділяється її раціональна частина (35%), яка окреслює діапазон значень загальної витрати повітря.

6. Використовуючи формулу (7) для реально існуючого діапазону значень витрати повітря, яке надходить в насадку, будується графічна залежність $F_0=f(Q_1)$ при різних значеннях P_1 .

7. На зазначеній графічній залежності окреслюється раціональне поле за допомогою пар точок 1-1', 2-2', 3-3', і 4-4', які отримані на попередній графічній залежності

$$\frac{Q_2 \cdot 100}{Q} = f(Q).$$

8. Визначається раціональний діапазон значень мінімальної площі сопла насадки, виходячи із максимальних діапазонів величин загальної витрати повітря Q і значень тиску P_1 .

Література

1 Nicolson K. Air and gas drilling / K. Nicolson // Petrol Eng. – 1954. – Vol 26, №6. – P. 107-112.

2 Morris J. Air pressure and volume for air drilling / J. Morris, R. Ramsey // - World Oil. – 1955. – Vol 141, №7. – P.156 - 158.

3 McLaughlin P. Here are the questions most often asked about air and gas drilling / P. McLaughlin // Oil and Gas. – 1955. – Vol 34, №8. – P. 84-89.

4 Scott J. How much air to put down the hole in air drilling / J. Scott // Oil and Gas. – 1957. – Vol. 55, №50, – P. 104-107.

5 Angel R. Volume requirements for air or gas drilling / R. Angel // Petrol Techn. – 1957. – Vol. 9, №12. – P. 325-330.

6 Лактионов А.Т. Основы теории и техники бурения скважин с очисткой забоя воздухом или газом / А.Т. Лактионов. – М. : Гостоптехиздат, 1961. – 215 с.

7 Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1960. – 406 с.

8 Лопатин Ю. С. Исследование характера истечения сжатого воздуха из насадок и каналов долота / Ю. С. Лопатин, Н.Г. Дюков, Г.Г. Карлов // Труды ВНИИБТ. – 1969. – Вып. 21. – С. 34-41.

Стаття поступила в редакційну колегію
27.05.09

Рекомендована до друку професором
Петриною Ю.Д.