

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ПОДАЧІ НАСОСА ДЛЯ ПРОМИВАННЯ СКЕРОВАНИХ СВЕРДЛОВИН

І.І. Чудик

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 717967,
e-mail: chudoman@ukr.net

Розроблено методику проектування і вибору подачі насоса для промивання вибою свердловини і винесення вибуреної породи кільцевим простором на устя. Особливістю запропонованої методики є можливість врахування на етапі проектування налипання шлама на фільтраційній кірці на стінці свердловини, механічної швидкості буріння проходки та геометричних розмірів частинок шлама.

Ключові слова: концентрація шлама

Разработана методика проектирования и выбора подачи насоса для промывания забоя скважины и выноса горной породы по кольцевому пространству на ее устье. Особенностью предложенной методики является возможность учета на этапе проектирования налипания шлама на фильтрационной корке на стенке скважины, механической скорости бурения и геометрических размеров частичек шлама.

Ключевые слова: концентрация шлама

The method for the design and the selection of pumping drilling mud taking away cuttings above mouth annular space has been provided. The peculiarity of the method offered is to consider the design level slime stick on wellbore wall filter cake both with mechanical driving speed and the geometrical slime size.

Keywords: mud concentration

Національною енергетичною програмою України розроблено шляхи ефективного забезпечення країни енергетичними ресурсами за рахунок активізації розвитку власного паливно-енергетичного комплексу. При цьому вугілля залишається і на перспективу головним вітчизняним енергоносієм. Водночас, лише 14% нафти і 30% газу від загальних потреб України планується покрити за рахунок внутрішніх ресурсів. Тому важливе місце в “Програмі...” приділяється альтернативним видам енергії, за рахунок яких незабаром буде видобуватиметься близько 10% всієї енергії. Значну роль в цьому має відіграти метан вугільних пластів. За підрахунками на сьогодні запаси метану в Україні складають 12 трлн. м³, що утричі перевищує об’єми природного газу. За цим показником Україна посідає четверте місце після Китаю, Росії і Канади. На п’ятому місці після України знаходиться США, де на сьогодні промислове видобування метану вважається найбільш розвинутим.

За останнє десятиліття Україна спожила близько 75 млрд. м³ природного газу, з яких лише 18 млрд. м³ власного видобутку. В Україні є два вугільних басейни (Львівсько-Волинський і Донецький) з нормальними для видобування метану гірничо-геологічними умовами. На даний час метан з них видобувається не промислово, а в комплексі розробки вугілля і включає два основних напрямки:

- примусове видобування з метою створення безпечних умов у процесі будівництва і роботи шахт, покращення екологічної ситуації і наступної його утилізації;
- примусове видобування для попередньої дегазації вугільних відкладів для отримання додаткових об’ємів енергоносія.

Для цього в більшості випадків використовується звичайна технологія буріння підземних дегазаційних свердловин з наступним підключенням їх до вакуумних станцій. Існує цілий ряд причин, які обумовлюють низьку ефективність їх роботи, однією з яких є відсутність технології і техніки буріння довгих горизонтальних свердловин в м’яких і нестійких вугільних пластах. Забезпечення стійкості стінок в процесі буріння є необхідною умовою її будівництва і вимагає комплексного вирішення питань вибору конструкції свердловини, визначення оптимальних режимів буріння, промивання, руйнування гірської породи (ГП).

На стійкість стінок свердловин значною мірою впливає інтенсивність промивання свердловини, а саме величина подачі насоса. У разі невідповідності її гірничо-геологічним умовам і технології буріння відбувається розмивання стінок свердловини, зміна напрямку буріння зі збільшенням енергетичних і матеріальних витрат на її будівництво. З метою визначення оптимальної подачі насоса, необхідної для транспортування шламу по КП свердловини і очищення її вибою від шламу необхідним є системний підхід, який в комплексі враховує основні принципи промивання, техніко-технологічні і гірничо-геологічні умови процесу буріння та сприятиме підвищенню техніко-економічних показників довбання і зменшенню енергетичних витрат.

Дослідження гідротранспорту шламу у відкритому стовбурі похило-скерованого (ПСС) і горизонтального стовбура свердловини (ГС) потоком бурового розчину (БР)

Транспортування шламу потоком БР відбувається в результаті дії таких сил (рис. 1):

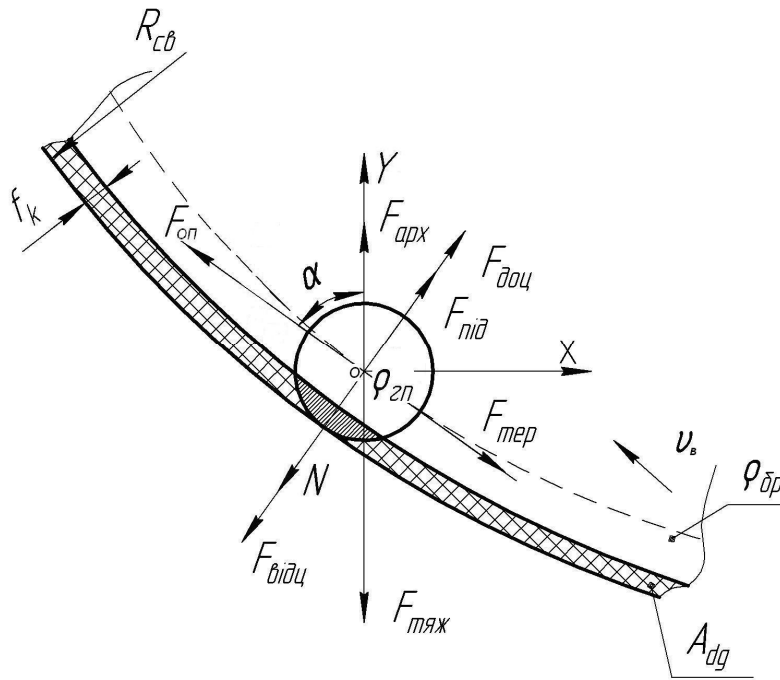


Рисунок 1 – Схема розподілу сил, що діють на частинку шламу в БР вздовж незакріпленого КП викривленого стовбура свердловини

відцентрової $F_{відц}$, доцентрової $F_{доц}$, тертя $F_{тер}$, опору в'язкого середовища $F_{оп}$, тяжіння $F_{ТЯЖ}$, Архімедової $F_{АРХ}$ і підйомної $F_{ПІД}$ [2].

Розглянемо сферичну частинку шламу в БР свердловини, яка проковзує між стінкою та БК на ділянці набору zenітного кута. При цьому сили Архімеда і тяжіння, які діють на частинку шламу за даних умов визначаються:

$$F_{тяж} = \rho_{ГП} g V_{ч}, \quad (1)$$

де: $V_{ч}$ – максимальний об'єм частинки шламу, яка виноситься БР;

$\rho_{ГП}$ – густина ГП.

$$F_{арх} = \rho_{БР} g V_{ч}, \quad (2)$$

де $\rho_{БР}$ – густина бурового розчину.

$$F_{відц} = 2\rho_{ГП} v_b^2 V_{ч} \kappa / (2 + \kappa D_{СВ}), \quad (3)$$

$$F_{доц} = 2\rho_{БР} v_b^2 V_{ч} \kappa / (2 + \kappa D_{СВ}), \quad (4)$$

де: κ – кривизна стовбура свердловини;

$D_{СВ}$ – діаметр свердловини;

v_b – швидкість піднімання частинки шламу відносно течії БР:

$$v_b = v - v_0, \quad (5)$$

де: v – швидкість потоку БР в КП з врахуванням ексцентриситету осей бурильної колони (БК) і стовбура свердловини;

v_0 – швидкість осідання шламу в БР, [4].

$$F_{он} = c \rho_{БР} S_{ГП} V_{ч} v_b^2 / 2, \quad (6)$$

де: $S_{ГП}$ – максимальна площа поперечного перерізу частинки шламу найбільшої із фракційного складу, утвореного на вибої;

c – емпіричний коефіцієнт:

$$c = \left[\frac{36 \mu}{d_{ГП}^{1.5} \sqrt{3 g \rho_{БР} (\rho_{ГП} - \rho_{БР})}} + 0.67 \right]^2, \quad (7)$$

де: μ – абсолютна в'язкість БР;

$d_{ГП}$ – умовний діаметр частинки шламу.

Сила тертя при підніманні частинки ГП відносно стінки свердловини з врахуванням прилипання її до фільтраційної кірки (ФК) визначається:

$$F_{тер} = N f_{ТЕР} + A_{dg} S_{ГП}, \quad (8)$$

де: $f_{ТЕР}$ – коефіцієнт тертя частинки шламу зі стінкою свердловини;

A_{dg} – міцність ФК на зсув;

N – нормальна складова сили притискання частинки шламу до стінки свердловини:

$$N = V_{ч} (\rho_{ГП} - \rho_{БР}) \times \left[\frac{2 \kappa v_b^2}{2 + \kappa D_{СВ}} + g \sin(\alpha) \right] - F_{нід}, \quad (9)$$

де α – zenітний кут стовбура свердловини.

Під час обертання БК з кутовою швидкістю $\omega = const$ на частинку шламу, яка потрапляє до зони завихреного БР, діє сила $F_{нід}$:

$$F_{нід} = \rho_{ГП} V_{ч} \omega^2 d_{БТ} / 12, \quad (10)$$

де $d_{БТ}$ – діаметр бурильної труби.

Згідно з рис. 1 отримуємо рівняння рівноваги сил, що діють на частинку шламу під час її руху в БР:

проекція сил на вісь ОХ:
 $(F_{on} - F_{мер}) \cos(\alpha) + F_{арх} - F_{тяж} +$
 $+ (F_{нід} + F_{доц} - N - F_{відц}) \sin(\alpha) = 0;$ (11)

проекція сил на вісь ОУ:
 $-(F_{on} + F_{мер}) \sin(\alpha) +$
 $+ (F_{нід} + F_{доц} - N - F_{відц}) \cos(\alpha) = 0.$ (12)

Визначення оптимальної подачі БР $Q_{КП}$ для винесення шламу по ексцентричному КП [1] з врахуванням діючих на неї сил пропонується наступна система рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} F_{відц} &= \frac{2\rho_{ГП} (v - v_0)^2 V_{чк}}{2 + \kappa D_{CB}}; \\ F_{тяж} &= \rho_{ГП} g V_{ч}; \\ F_{відц} &= \frac{2\rho_{БР} (v - v_0)^2 V_{чк}}{2 + \kappa D_{CB}}; \\ F_{on} &= \frac{c \rho_{БР} S_{ГП} V_{ч} (v - v_0)^2}{2}; \\ N &= V_{ч} (\rho_{ГП} - \rho_{БР}) \times \\ &\quad \times \left[\frac{2 \kappa (v - v_0)^2}{2 + \kappa D_{CB}} + g \sin(\alpha) \right] - F_{нід}; \\ F_{нід} &= \rho_{ГП} V_{ч} \omega^2 d_{БТ} / 12; \\ F_{мер} &= N f_{ТЕР} + A_{dg} S_{ГП}; \\ (F_{on} - F_{мер}) \cos(\alpha) + F_{арх} - F_{тяж} + \\ &\quad + (F_{нід} + F_{доц} - N - F_{відц}) \sin(\alpha) = 0; \\ -(F_{on} + F_{мер}) \sin(\alpha) + \\ &\quad + (F_{нід} + F_{доц} - N - F_{відц}) \cos(\alpha) = 0; \\ Q_{КП} &= v \left(\pi [D_{CB}^2 - d_{БТ}^2] / 4 - A_t \right); \\ P A_t + \tau_0 A_1 &= \tau_0 A_2; \\ F_{арх} &= \rho_{БР} g V_{ч}; \\ A_1 &= \left(D_{CB} \sin(\varphi) - \right. \\ &\quad \left. - \sin[\arccos[(D_{CB} \cos(\varphi) - 2e)/d_{БТ}]] d_{БТ} \right) L_{БК} \\ A_2 &= [(2\pi - \varphi) D_{CB} / 2 + (2\pi - \\ &\quad - \arccos[(D_{CB} \cos(\varphi) - 2e)/d_{БТ}]) d_{БТ} / 2] L_{БК}; \\ A_t &= \frac{1}{8} (D_{CB}^2 (2\varphi - \sin(2\varphi)) - d_{БТ}^2) \times \\ &\quad \times (2 \arccos[(D_{CB} \cos(\varphi) - 2e)/d_{БТ}] - \\ &\quad - \sin(2 \arccos[(D_{CB} \cos(\varphi) - 2e)/d_{БТ}])) , \end{aligned} \right. \quad (13)$$

де: e – величина ексцентриситету осей БК і свердловини;

P – тиск помпування бурового насоса;

τ_0 – динамічне напруження зсуву БР;

$L_{БК}$ – довжина бурильної колони (БК);

A_t – площа поперечного перерізу застійної зони БР, [1];

A_1 – площа поверхні контакту між застійною зоною і БР, [1];

A_2 – площа поверхні контакту БР з БК і стінками свердловини в зоні руху, [1];

φ – півкут охоплення елемента БК застійною зоною БР.

Для визначення впливу низки техніко-технологічних і гірничо-геологічних чинників на величину подачі БР для забезпечення гідротранспортування шламу по КП, незакріпленого обсадною колоною ПСС і ГС при $\rho_{ГП} = 2600 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{БР} = (1200 - 1800) \text{ кг/м}^3$; $D_{CB} = 215,9 \text{ мм}$; $d_{БТ} = 114,3 \text{ мм}$, отримано низку графічних залежностей (рис. 2-4).

Встановлено, що під час винесення шламу по КП стовбура свердловини із zenітним кутом 45^0 (рис. 2) суттєвий вплив на величину подачі БР має міцність ФК на зсув. Так, для піднімання шламу діаметром 18 мм по КП повз БК необхідно величину подачі БР витримувати від 6 до 26 л/с.

При зміні zenітного кута нахилу ПСС від 1 до 70^0 за густини БР 1100 кг/м^3 і діаметра частинки шламу 6 мм (рис. 3) встановлено, що із зростанням zenітного кута стовбура виробки подачу насоса необхідно утримувати в межах від 6 до 27 л/с.

Із зміною діаметра частинки ГП від 4 до 18 мм, при $\alpha = 45^0$ і $\rho_{БР} = 1200 \text{ кг/м}^3$ (рис. 4) і інших вихідних даних необхідно витримувати подачу БР в межах від 13 до 23 л/с за наявності на стінках свердловини ФК з високими показниками міцності на зсув.

Дослідження очищення вибою свердловини від шламу потоком БР

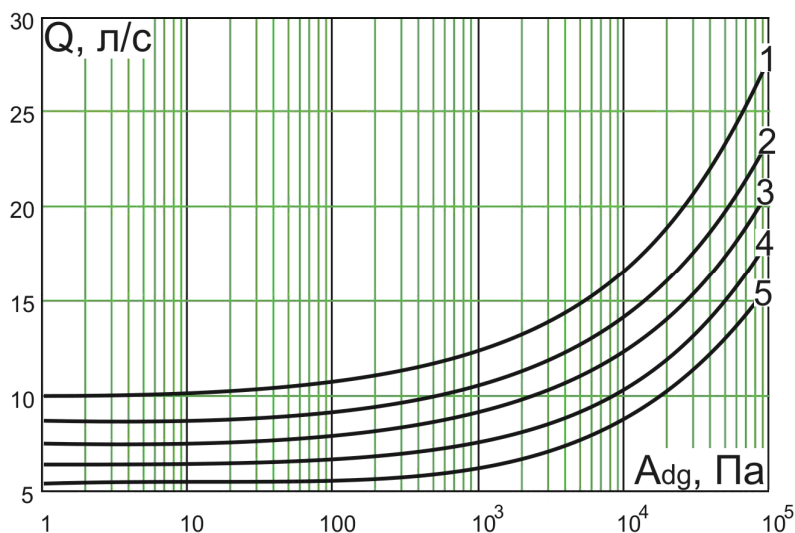
Під час руйнування долотом ГП на вибої свердловини роль БР полягає в забезпеченні повного і своєчасного видалення шламу, утвореного за певний час з метою запобігання повторного його перемелювання. Розглянемо частинку шламу ГП на вибої свердловини під дією таких силових факторів (рис. 5): F_1 – вага частинки ГП; F_2 – тертя із вибоєм свердловини; F_3 – удар струмини БР; F_4 – гідростатичний тиск; F_5 – бокове зміщення частинки потоком БР; F_6 – різниця швидкостей вище і нижче частинки; F_7 – в'язке тертя частинки шламу в БР; F_8 – пластовий тиск.

$$F_1 = \rho_{ГП} g V_{ч}; \quad (14)$$

$$F_2 = f_{ТЕР} N + \arccos[(d_{ГП} - 2 f_k) / d_{ГП}] A_{dg} d_{ГП}^2, \quad (15)$$

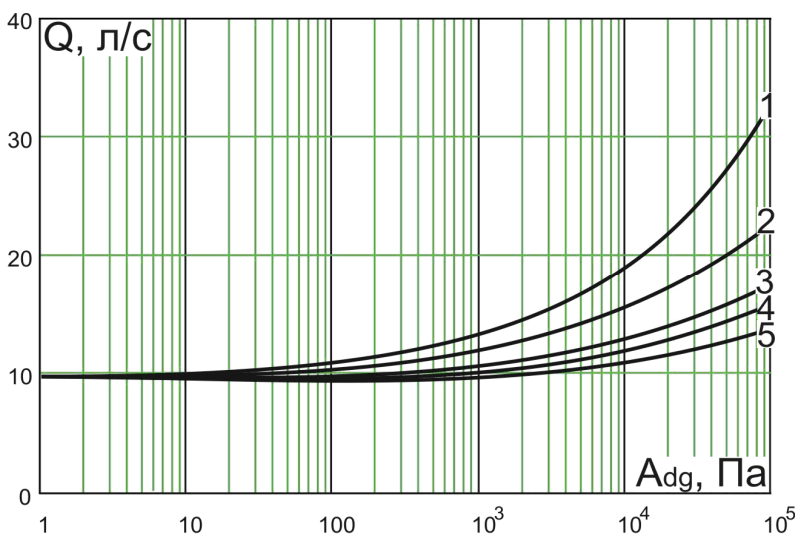
де: N – сила притискання частинки ГП до вибою свердловини;

f_k – товщина фільтраційної кірки.



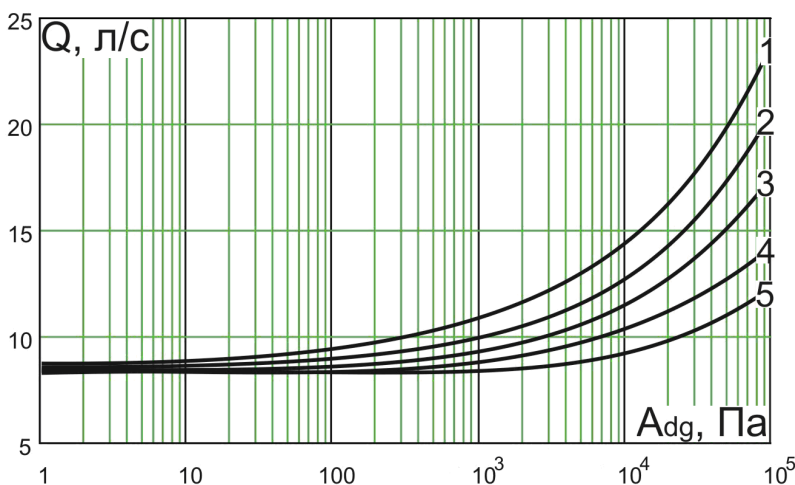
1 – $1000 \text{кВт} / \text{м}^3$; 2 – $1300 \text{кВт} / \text{м}^3$; 3 – $1400 \text{кВт} / \text{м}^3$; 4 – $1600 \text{кВт} / \text{м}^3$; 5 – $1800 \text{кВт} / \text{м}^3$

Рисунок 2 – Залежність подачі насоса від густини БР при зміні міцності ФК на зсув



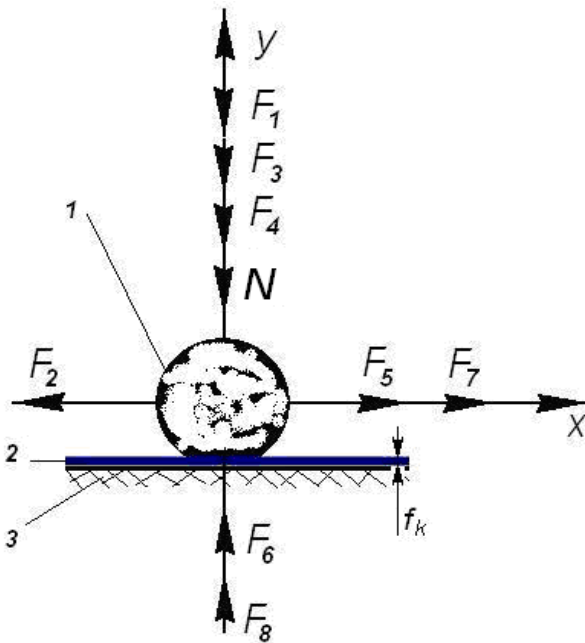
1 – $\alpha = 70^\circ$; 2 – $\alpha = 60^\circ$; 3 – $\alpha = 45^\circ$; 4 – $\alpha = 30^\circ$; 5 – $\alpha = 1^\circ$

Рисунок 3 – Залежність подачі насоса від зенітного кута свердловини при зміні міцності ФК на зсув



1 – $d_{гп} = 4 \text{мм}$; 2 – $d_{гп} = 6 \text{мм}$; 3 – $d_{гп} = 10 \text{мм}$; 4 – $d_{гп} = 14 \text{мм}$; 5 – $d_{гп} = 18 \text{мм}$

Рисунок 4 – Залежність подачі насоса від розмірів шламу при зміні міцності ФК на зсув



1 – частинка шламу; 2 – фільтраційна кірка;
3 – стінка свердловини

Рисунок 5 – Схема розподілу сил, що діють на частинку шламу на вибої свердловини

$$F_3 = 4Q_B^2 \rho_{БР} / (\pi d_{ГП}^2), \quad (16)$$

$$F_4 = g H \rho_{БР} \pi d_{ГП}^2 / 4, \quad (17)$$

де: H – глибина свердловини.

$$F_5 = C \rho_{БР} v_p^2 \pi d_{ГП}^2 / 8, \quad (18)$$

де: C – коефіцієнт опору рухові частинки шламу в БР [3];

v_p – швидкість потоку БР, паралельного вибою свердловини.

$$v_p = \frac{4.12 Q_B}{\pi d_H r n}, \quad (19)$$

де: r – віддаль від центра вибою до місця розташування частинки на ньому;

d_H, n – діаметр і кількість насадок долота.

$$F_6 = \rho_{БР} v_p^2 S_C / 2; \quad (20)$$

$$S_C = \pi d_H r / 4, 12; \quad (21)$$

$$F_7 = 2.18 \sqrt{2 d_{ГП} (\rho_{ГП} - \rho_{БР}) S_C} / 3; \quad (22)$$

$$F_8 = P_{Пл} \pi d_{ГП}^2 / 4, \quad (23)$$

де $P_{Пл}$ – пластовий тиск на вибої свердловини.

Сила притискання частинки шламу до вибою свердловини N визначається так:

$$N = (F_6 + F_8) + (F_1 + F_3 + F_4). \quad (24)$$

При проектуванні сил F_i на вісь OX після ряду спрощень подача насоса для видалення частинки шламу з-під долота визначається:

$$Q_B = \left\{ \pi d_{ГП}^2 \left[P_{Пл} - \frac{4 A_{dg} \tau}{\mu \pi} \arccos \left(\frac{d_{ГП} - 2 f_k}{d_{ГП}} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - g \left(2 \rho_{ГП} d_{ГП} \frac{1 - (\rho_{БР} / \rho_{ГП})}{3} + \rho_{БР} H_{СВ} \right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{d_H r \tau}{1.03 \mu} \right\} \cdot \left\{ 8 \rho_{БР} \frac{\frac{2}{d_H^2} - \frac{1.03}{d_{ГП} r n} - \frac{1.061 C}{\mu r^2 n}}{\pi n} \right\}^{-1} \quad (25)$$

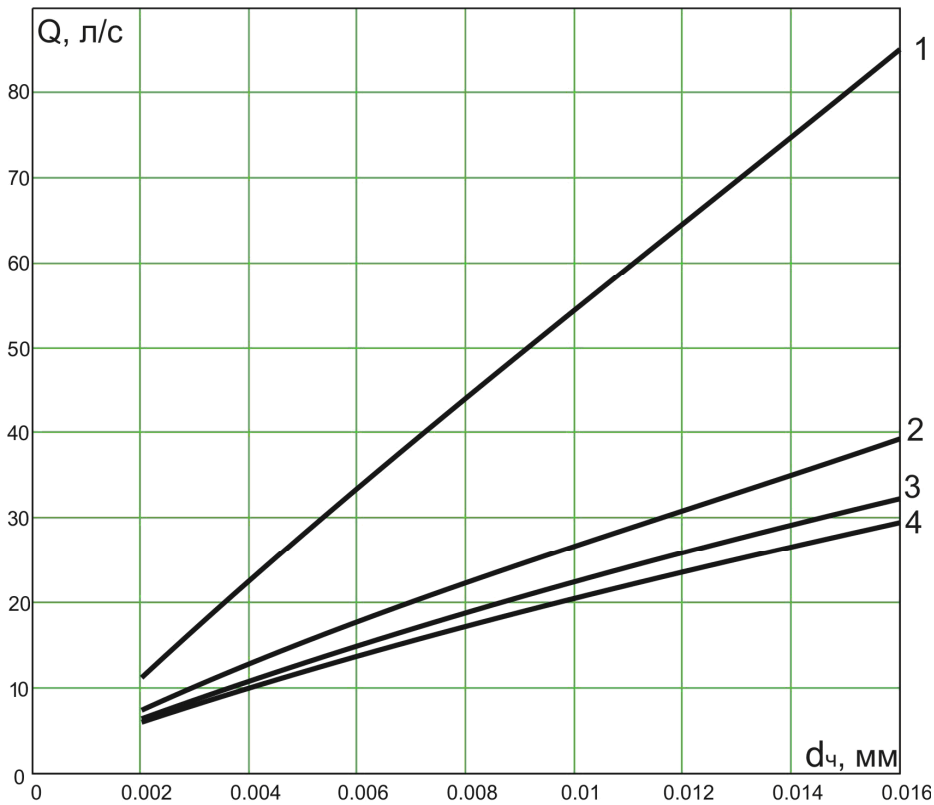
В результаті розрахунку оптимальної подачі БР в процесі промивання вибою свердловини згідно попередньо встановлених вихідних даних отримано низку графічних залежностей (рис. 6-8). При цьому встановлено: під час видалення шламу з вибою свердловини суттєвий вплив мають діаметр прохідного каналу насадки долота і розміри частинок шламу. Так, чим менший діаметр каналу насадки долота і більші геометричні розміри частинки шламу (рис. 6) на їх видалення з вибою без повторного перемелювання слід збільшувати величину подачі БР в декілька разів. Проте частинки шламу розмірами 2-7 мм згідно даної графічної залежності виносяться з вибою свердловини при встановлених вихідних даних за подачі БР в межах 8-18 л/с.

Зростання величини показника міцності ФК на зсув або її товщини обумовлює необхідність збільшення подачі насоса (рис. 7). Так, для видалення 4-16 мм частинок шламу струменем БР, який витікає з насадки діаметром 10 мм, необхідно при $\Delta P = 2.5 \text{ кПа}$ та величиною $A_{dg} = (10^3 \div 10^5) \text{ Па}$ забезпечити його подачу в межах 8-35 л/с.

У міру віддалення частинок шламу від насадки долота виникає потреба у збільшенні подачі БР. (рис. 8). Так, для шламу розмірами від 4 до 16 мм при зміні r від 10 до 50 мм необхідно збільшити подачу насоса від 3 до 27 л/с.

Визначальними чинниками при проектуванні і виборі подачі насоса з метою забезпечення ефективності промивання свердловини є інтервал буріння (кондуктор, проміжні й експлуатаційна колони), його довжина, інтенсивність викривлення, зенітний кут та відповідний діаметр долота, його промивна система, сукупність гірничо-геологічних умов, що характеризують шлам та реологічні параметри БР. Використовуючи їх проектують подачі насоса Q_B і $Q_{КП}$, за якими приймається кінцеве рішення про використання в процесі промивання свердловини Q .

Далі з врахуванням густин БР і частинок ГП і їх максимальних геометричних розмірів визначається швидкість осідання шламу у вертикальному стовбурі свердловини [4]. За величиною механічної швидкості проходки в момент буріння свердловини для даного інтервалу при відповідних техніко-технологічних і гірни-



1 – $d_H = 16\text{ мм}$; 2 – $d_H = 14\text{ мм}$; 3 – $d_H = 12\text{ мм}$; 4 – $d_H = 10\text{ мм}$

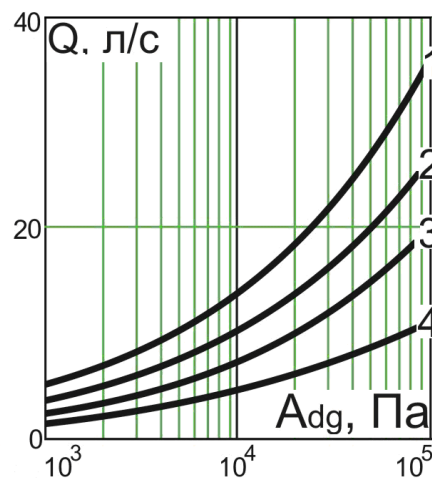
Рисунок 6 – Залежність подачі насоса від розмірів частинки шламу і діаметрів насадок долота

чо-геологічних умовах визначається об’ємна концентрація шламу в КП $C_{ш}$ [4] і за умовою $2\% \leq C_{ш} \leq 5\%$ проводиться коригування запроектованих величин подачі бурового насоса Q .

У процесі буріння стовбура свердловини буровими долотами з діаметрами понад за 269,9 мм в інтервалах залягання нестійких і схильних до осипання ГП характерним є укрупнення частинок шламу. При відповідно збільшеній площі поперечного перерізу КП і високій механічній швидкості проходки >10 м/год виникає необхідність у застосуванні високих подач бурового насоса з метою дотриманням необхідної об’ємної концентрації шламу в БР.

У процесі буріння свердловини малих діаметрів у інтервалах залягання, схильних до розмивання і осипання ГП, є необхідність в обмеженні швидкості висхідного потоку БР в КП з метою запобігання розширенню стовбура свердловини. Тому проектування і вибір подачі бурового насоса для промивання свердловини повинен також виходити із умови забезпечення номінальної концентрації шламу в КП (рис. 9).

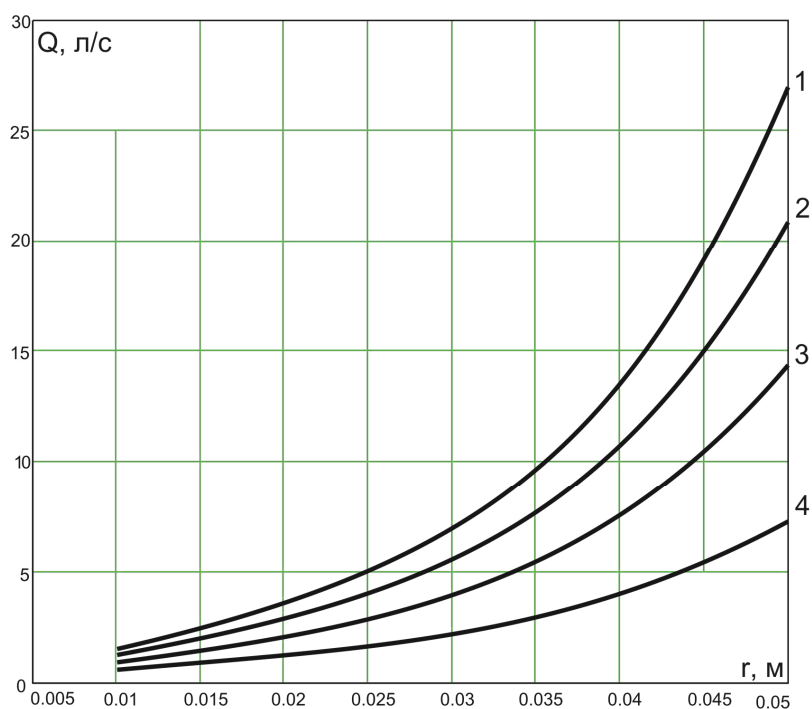
Запропонований підхід до проектування і вибору оптимальної подачі БР для забезпечення ефективного очищення вибою від шламу і його транспортування КП, запобігаючи можливості розмивання стінок свердловини, налипання на них шламу вносить суттєві вдосконалення в науковому і практичному плані технології буріння ПСС і ГС у відкладах ГП, схильних до розмивання, осипання, обвалювання.



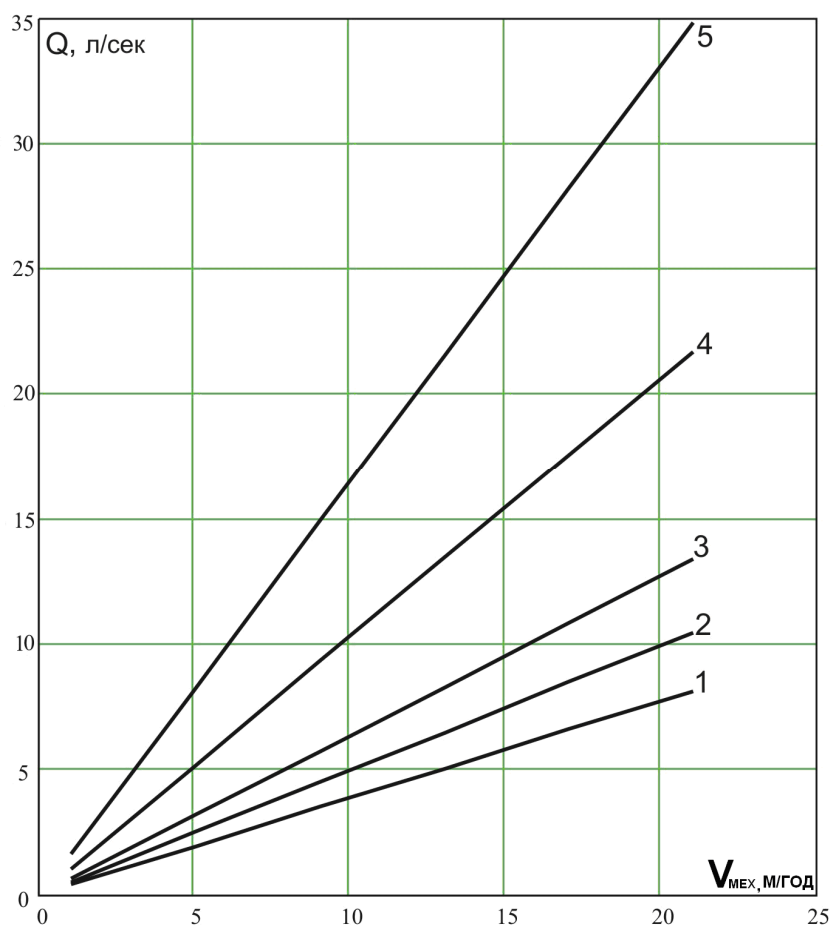
$d_H = 16\text{ мм}$; 2 – $d_H = 14\text{ мм}$; 3 – $d_H = 12\text{ мм}$; 4 – $d_H = 10\text{ мм}$

Рисунок 7 – Залежність подачі насоса від розмірів частинок шламу та міцності ФК на зсув

Результати аналітичних досліджень довели, що величина подачі насоса, запроектована з врахуванням вищевказаних умов, може бути забезпечена у разі використання серійного обладнання для буріння свердловин з можливістю оперативного управління нею за механічною швидкістю буріння.



1 – $d_{ГП} = 16$ мм; 2 – $d_{ГП} = 12$ мм; 3 – $d_{ГП} = 8$ мм; 4 – $d_{ГП} = 4$ мм
Рисунок 8 – Залежність подачі насоса від розмірів частинки шламу у міру її віддалення від насадки долота



1 – $D_{д} = 190,5$ мм; 2 – $D_{д} = 215,9$ мм; 3 – $D_{д} = 244,5$ мм; 4 – $D_{д} = 311$ мм; 5 – $D_{д} = 393,7$ мм
Рисунок 9 – Діаграми вибору подачі насоса для забезпечення об'ємної концентрації шламу в БР 2% за повної механічної швидкості буріння

Література

- 1 Чудик І. Вплив ексцентричного розташування бурильної колони у стовбурі свердловини на його промивання [Текст] / І. І. Чудик. – Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2008. – № 1(26). – С. 44-48.
- 2 Куликов В. Удаление шлама из ствола скважины восходящим потокам очистного агента [Текст] / В. В. Куликов // Строительство нефтяных и газовых скважин. – 2007. – №4. – С. 19–21.
- 3 Гусман А. Управление очисткой забоя скважины при бурении шарошечными долотами [Текст] / А. Н. Гусман. – Бурение и нефть. – 2005. – №2. – С. 12–15.
- 4 Маковей Н. Гидравлика бурения [Текст] / Н. Маковей. – М.: Недра, 1986. – 537 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії

28.09.10

Рекомендована до друку професором

Коцкуlichem Я.С.