

Фізико-технічні проблеми видобування енергоносіїв

УДК 622.244.422

ЩОДО ВПЛИВУ ТЕРМОБАРИЧНИХ УМОВ НА РЕАЛІЗАЦІЮ ПРОЦЕСУ ПРОМИВАННЯ СВЕРДЛОВИНИ

І.І. Чудик, Д.А. Грипись, І.Я. Білецька, В.І. Щуцький

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727137,
e-mail: chudoman@ukr.net

Запропоновано новий підхід до вирішення технологічної задачі проектування подачі бурового насоса для промивання свердловин із врахуванням реологічних параметрів бурового розчину і впливу на них термобаричних умов. Практичним втіленням її розв'язку стало об'єднання існуючих підходів у методику енергоефективного промивання свердловин для різних реологічних моделей бурових розчинів із врахуванням таких факторів, як механічна швидкість буріння, концентрація шламів в буровому розчині, його реологічні параметри в залежності від глибини.

При дослідженні автором надано перевагу вивченню процесу видалення шламів із свердловини буровим розчином із категорії в'язко-пластичних моделей. На основі розробленого математичного підходу проведено відповідні розрахунки подачі бурового насоса.

За результатами аналітичних досліджень встановлено, що необхідною умовою для досягнення енергоефективності процесу промивання і забезпечення якісного винесення шламів з вибою свердловин, бурові розчини яких піддаються впливу термобаричних умов, є коректування величини подачі бурового насоса. Можливість для цього забезпечує розглянутий у статті підхід.

Ключові слова: промивання свердловини, буровий розчин, термобаричні умови, механічна швидкість, в'язко-пластична рідина, подача насоса.

Предложен новый подход к решению технологической задачи проектирования подачи бурового насоса для промывки скважин с учетом реологических параметров бурового раствора и влияния на них термобарических условий. Практическим воплощением ее решения стало объединение существующих подходов в методику энергоэффективного процесса промывки скважин для различных реологических моделей буровых растворов с учетом таких факторов, как механическая скорость бурения, концентрация шлама в буровом растворе, его реологические параметры в зависимости от глубины.

При исследовании автор отдает предпочтение изучению процесса удаления шлама из скважины буровым раствором с категории вязко-пластических моделей. На основе разработанного математического подхода проведены соответствующие расчеты подачи бурового насоса.

По результатам аналитических исследований установлено, что необходимым условием достижения энергоэффективности процесса промывки и обеспечения качественного выноса шлама с забоя скважин, буровые растворы которых подвергаются воздействию термобарических условий, является корректировка величины подачи бурового насоса. Возможность для этого обеспечивает представленный в статье подход.

Ключевые слова: промывание скважины, буровой раствор, термобарические условия, механическая скорость, вязко-пластичная жидкость, подача насоса.

Taking into account the rheological parameters of the drilling mud and the influence of thermobaric conditions on them, a new approach to solving the technological problem of designing a mud pump rate for well flushing is proposed. The practical implementation of its solution was to combine the existing approaches into the method of energy-efficient well flushing for different rheological models of drilling fluids taking into account such factors as the mechanical velocity of drilling, the concentration of cuttings in the drilling mud, its rheological parameters depending on the well depth.

A visco-plastic flushing fluid has been applied to study the process of removing cuttings from a well. Based on the developed mathematical approach, the appropriate calculations of the pumping rate have been made.

The results of the analytical study helped establish that in order to achieve energy efficiency in the flushing process and to ensure a proper flushing of the cuttings from the bottomhole, the drilling muds of which are exposed to thermobaric conditions, the necessary condition is to adjust the pumping rate. The approach presented in this article helps to provide this.

Keywords: well flushing, drilling mud, thermobaric conditions, mechanical velocity, visco-plastic fluid, pumping rate..

Вступ. Реалізація процесу буріння свердловин суттєво залежить від якості очищення вибою та своєчасного видалення уламків гірської породи в кільцевий простір. Під час поглиблення свердловини утворюється велика кількість різних за розмірами частинок шламу. Буровий розчин, який подається через промивальні канали долота, завихрює їх і затрубним простором піднімає до устя свердловини. Залежно від фізико-механічних властивостей гірської породи, типу долота і режимно-технологічних параметрів об'єм утвореного шламу за одиницю часу може змінюватися у великому діапазоні, що часто зумовлює проблеми його винесення із свердловини. Цьому питанню присвячено ряд наукових праць, в яких основна увага приділяється швидкості потоку бурового розчину в кільцевому просторі, який забезпечить винесення частинок гірської породи на устя свердловини [1-6 та ін.]. Якщо вибій і кільцевий простір забруднені частинками шламу, то процес буріння супроводжується заклинюванням долота, затягуванням, а іноді і прихопленням інструменту, зниженням швидкості буріння та викликає помилкову думку про зустріч долота із твердою чи абразивною гірською породою. А при поганому очищенні вибою відбувається повторне перемелювання шламу, що і стає причиною зниження проходки на долото, збільшення енергетичних і матеріальних затрат при повному виконанні гідравлічної програми промивання свердловини.

Аналіз сучасного стану досліджень. Відомо, що великі запаси нафти і газу в Україні перебувають на значних глибинах у складних гірничо-геологічних умовах їх видобутку. Це обумовлює формування тенденції до збільшення обсягів буріння надглибоких свердловин: (Семиренківська №17, №34), значно підвищуючи витрати на їх будівництво. Тому використання результатів наукових досліджень для зменшення та ефективного використання матеріальних і енергетичних ресурсів [1-6 та ін.] є вкрай актуальним.

Сьогодні при спорудженні надглибоких свердловин використовуються різноманітні техніко-технологічні підходи, які задовольняють високі показники буріння за рахунок значних перевитрат енергії. Це призводить до збільшення собівартості метра проходки та, на жаль, не вирішує проблем якісного й енергоефективного буріння свердловини.

Одним із проблемних питань цього процесу є інтенсифікація поглиблення вибою свердловин за рахунок зменшення непродуктивних витрат енергії. В умовах зростання глибини свердловини, а за нею – вибійних тисків і температур, виникає необхідність у вдосконаленні

методології проектування режимно-технологічних параметрів буріння.

Висвітлення невиконаних раніше частин загальної проблеми. Основним енерговитратним процесом із циклу будівництва свердловини є її промивання. Для глибин 2500-4000 м проблема проектування подачі бурового насоса (БН) для забезпечення якісного і водночас енергоефективного очищення свердловини від шламу частково вирішена й описана в роботах [2, 7 та ін.]. Проте в підходах до проектування подачі БН термобаричні умови й енергоефективність досі не враховані, а використовуються окремо, що обумовлює мету даного дослідження, для реалізації якої ставляться наступні задачі:

- врахування особливих гірничо-геологічних умов, що впливають на реологічні властивості бурових розчинів (БР), їх виносну здатність;
- накладання техніко-технологічних обмежень на реалізацію енергоефективного процесу;
- створення дієвих підходів до проектування й вибору подачі БН.

Висвітлення основного матеріалу дослідження. Забезпечення процесу транспортування частинок шламу висхідним потоком БР на денну поверхню обумовлюється умовою $v_{zp} > u_0$ (v_{zp} - швидкість зрушення частинки шламу потоком БР; u_0 - швидкість осідання шламу в потоці БР). Аналіз літературних і промислових матеріалів розкриває кілька підходів до розрахунку швидкості осідання частинок шламу u_0 [1-4 та ін.]. Але із врахуванням того, що під час промивання свердловини з діючими в них термобаричними умовами є обмеження по енергоефективності, актуалізується питання дослідження їх комплексного впливу на подачу БН.

Для оцінки швидкості осідання шламу в БР u_0 використовуються [1-4 та ін.]:

формула Ретінгера:

$$u_0 = \sqrt{\frac{4gd_q}{3C} \left(\frac{\rho_q}{\rho_{БР}} - 1 \right)}, \quad (1)$$

де g - прискорення вільного падіння;

$\rho_{БР}$ і ρ_q - густини БР і шламу;

C - коефіцієнт гідравлічного опору шламу, розміром d_q , який залежить від форми свердловини (табл. 1);

$$Re = \frac{u_0 d_q}{\nu_K}, \quad (2)$$

де ν_K - кінематична в'язкість БР.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта C для геометричних тіл (шламу) [2]

Форма частинки шламу	Параметр C
Кулька з гладкою поверхнею	0,38-0,44
Кулька з шорсткою поверхнею	0,62-0,66
Куб	1,0-1,2
Порода обкатана	0,8-1,3
Порода кубоподібної форми уламкова	1,0-1,4

формула Архімеда:

$$u_0 = \frac{v_K}{d_{\text{ч}}} \exp 10 \left(\frac{\sqrt{\ln(Ar) + 2,3}}{2,3} - 1 \right), \quad (3)$$

$$Ar = \frac{d_{\text{ч}} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{БР}})}{v_K^2 \rho_{\text{БР}}}; \quad (4)$$

формула Уокера Мейеза:

$$u_0 = \sqrt{\frac{2gd_{\text{ч}}}{C_X} \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{БР}}} - 1 \right)}, \quad (5)$$

$$C_X = \frac{D_{\text{св}} - d_{\text{ом}}}{d_{\text{ч}}}, \quad (6)$$

де $D_{\text{св}}$ і $d_{\text{ом}}$ - діаметр свердловини і бурильної колони в перерізі, де розглядається потік БР.

формула ВНИИБТ:

$$u_0 = \sqrt{\frac{2gd_{\text{ч}} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{БР}})}{1,12\rho_{\text{БР}}}}. \quad (7)$$

Для оцінки швидкості зрушення частинки шламу потоком БР використовується, [4]:

$$v_{\text{зр}} = K \sqrt{\frac{4\bar{g}d_{\text{ч}} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{БР}})}{3C_W \rho_{\text{БР}}}}, \quad (8)$$

де $K = 1.2 \dots 1.3$;

C_W - коефіцієнт гідравлічного опору;

\bar{g} - ефективне прискорення вільного падіння;

$$\bar{g} = g(\mu_T \sin(\alpha) + \cos(\alpha)), \quad (9)$$

де μ_T - коефіцієнт тертя частини шламу до стінки свердловини і БР;

α - зенітний кут стовбура свердловини (при $\alpha = 0 \rightarrow \bar{g} = g$).

Визначення режиму обтікання частинки шламу ламінарним потоком БР (як в'язкої рідини) проводиться за допомогою параметра C_W [4]:

$$C_W = \frac{24}{\text{Re}_{\text{ч}}}, \quad (10)$$

$$\text{Re}_{\text{ч}} = \frac{v_{\text{зр}} d_{\text{ч}} \rho_{\text{БР}}}{\mu}, \quad (11)$$

де μ - коефіцієнт в'язкості БР.

При $\text{Re}_{\text{ч}} < \text{Re}_{\text{КР}} = 60$ (для умов ламінарного обтікання частинки шламу потоком БР) $v_{\text{зр}}$ визначається:

$$v_{\text{зр}} = \frac{d_{\text{ч}}^2 \bar{g} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{БР}})}{18\mu}. \quad (12)$$

Величина подачі насоса при цьому визначається:

$$Q = - \frac{\pi d_{\Gamma}^3 (D_{\text{св}} + d_{\text{ом}}) A}{128\mu f(\delta)}, \quad (13)$$

$$A = \frac{2\mu v_{\text{зр}}}{\left(-\frac{d_{\Gamma}}{4} + \frac{d_{\text{ч}}}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_{\Gamma}}{4} \right)^2}, \quad (14)$$

$$f(\delta) = - \frac{(1-\delta)^2}{1+\delta^2 + \frac{1-\delta^2}{\ln(\delta)}}, \quad (15)$$

$$\delta = \frac{d_{\text{ом}}}{D_{\text{св}}}, \quad (16)$$

$$d_{\Gamma} = D_{\text{св}} - d_{\text{ом}}. \quad (17)$$

Перевірка режиму руху БР при цьому проводиться:

$$\text{Re} = \frac{Q d_{\Gamma} \rho_{\text{БР}}}{S_{\text{К}} \mu} < \text{Re}_{\text{КР}} = 2100. \quad (18)$$

У випадку, якщо $\text{Re} < 2100$, розрахунок Q є правильний, якщо ж $\text{Re} > 2100$, то розрахунок $v_{\text{зр}}$ проводять за формулою (27). Далі проектують подачу БН із умови забезпечення допустимої концентрації шламу у висхідному потоці БР [7]. Визначення режиму обтікання частинки шламу потоком БР (як в'язко-пластичної рідини) проводиться аналогічно за параметром C_W [4]:

$$C_W = \frac{24}{\text{Re}_{\text{ч}}} \left[1 + 1,87 \sqrt{\frac{\text{He}}{\text{Re}_{\text{ч}}}} + 1,15 \frac{\text{He}}{\text{Re}_{\text{ч}}} \right], \quad (19)$$

де $\text{He} = \frac{\tau_0 d_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{БР}}}{\eta^2}$ - число Хедстрема при обтіканні частинки БР;

τ_0 і η - динамічне напруження зсуву і пластична в'язкість БР.

При $\text{Re}_{\text{ч}} < \text{Re}_{\text{КР}} = 60$ для умов ламінарного обтікання частинки шламу потоком БР $v_{\text{зр}}$ визначається за формулою:

$$v_{\text{зр}} = \frac{d_{\text{ч}} \tau_0}{2\eta} \left[3,51 - 2\Delta - 1,87 \sqrt{3,51 - 4\Delta} \right], \quad (20)$$

$$\Delta = 1,15 - \frac{d_{\text{ч}} \bar{g} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{БР}})}{18\tau_0}. \quad (21)$$

Величина подачі БН при цьому визначається так:

$$Q = - \frac{\tau_0 d_{\Gamma} S_{\text{К}}}{\eta S_e}, \quad (22)$$

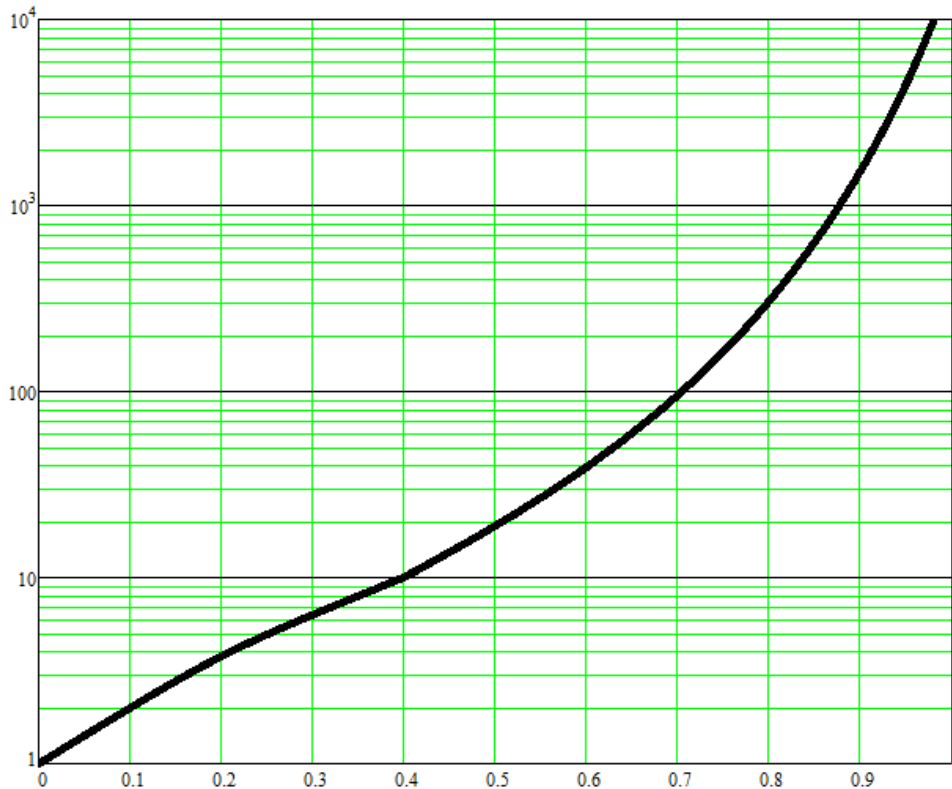


Рисунок 1 – Крива залежності $Se = Se(\beta)$ для визначення числа Se за відомим β

де S_K - площа поперечного перерізу кільцевого простору;

Se - число Сен-Венана, яке знаходиться за рис. 1 за величиною параметра β :

$$\beta = \frac{4\tau_0}{|A|d_\Gamma} \quad (23)$$

Для визначення параметра A , залежно від величини частинки шламу d_Γ , при умові $\left[\frac{d_\Gamma}{2}\right] \leq \frac{[H - H_0]}{2}$ використовується формула:

$$A = \frac{16\eta[2\eta v_{зр} + d_\Gamma \tau_0]}{d_\Gamma^2 - [d_\Gamma - d_\Gamma]^2}; \quad (24)$$

якщо $\left[\frac{d_\Gamma}{2}\right] \geq \frac{[H - H_0]}{2}$:

$$A = -\frac{4}{d_\Gamma} \left(d_\Gamma \tau_0 + 4\eta v_{зр} + 2\sqrt{2\eta v_{зр} (d_\Gamma \tau_0 + 2\eta v_{зр})} \right); \quad (25)$$

де $H_0 = -\frac{2\tau_0}{A}$ - фронт ядра потоку БР у кільцевому просторі шириною $H = \frac{[D_{св} - d_{\delta m}]}{2}$.

Проводиться перевірка: якщо $\frac{d_\Gamma}{2} < \frac{d_\Gamma}{4} - \frac{\tau_0}{A}$, то величина A , розрахована за

(24) є справедливою; якщо $\frac{d_\Gamma}{2} \geq \frac{d_\Gamma}{4} - \frac{\tau_0}{A}$, то розрахунок A проводиться за формулою (25).

Перевірка режиму руху БР при цьому проводиться так:

$$Re = \frac{Q d_\Gamma \rho_{БР}}{S_K \eta} < Re_{КР} = 2100 + 7.3 He^{0.58}, \quad (26)$$

де $He = \frac{[\tau_0 d_\Gamma^2 \rho_{БР}]}{\eta^2}$ - число Хедстрема потоку БР.

У випадку, якщо $Re < Re_{КР}$, то розрахунок Q є правильний, а якщо ж $Re > Re_{КР}$, то розрахунок $v_{зр}$ проводять за (27), відтак – проєктують подачу БН із умови забезпечення допустимої концентрації шламу у висхідному потоці БР [7].

$$v_{зр} = \frac{V_{мех} S_B + c u_0 S_K}{c S_K}, \quad (27)$$

де $V_{мех}$ - механічна швидкість буріння;
 c - об'ємна концентрація шламу у БР кільцевого простору;

S_B - площа вибою свердловини, з якого відбувається формування шламу.

Для врахування впливу термобаричних умов на реологічні властивості БР під час промивання надглибоких свердловин і вибору при цьому величини подачі БН, пропонується вико-

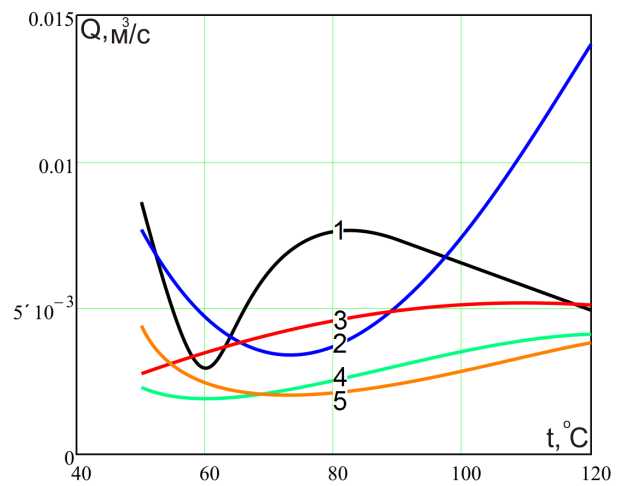
ристати розроблений пакет програм «Реометрія» [8] для моделей БР Ньютона, Освальда, Шведова-Бінгама, Гершеля-Балклі й Шульмана-Кессона, [6]. Шляхом оцінки зміни реологічних властивостей БР (η і τ_0) при різних варіаціях значень тиску $\{P_1, P_2, \dots, P_k\}$ і температури $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ в програмі програм «Реометрія» проводять відповідне коректування вищеприказаних підходів до проектування і вибору подачі БН.

Для визначення впливу термобаричних умов на Q в'язко-пластичного БР під час промивання свердловини проведено розрахунки. Приклад, отриманий при даних, зазначених в роботі [6] та наведених у табл. 2, а також при наступних параметрах: свердловина вертикальна; $D_{св}/d_{ом} \rightarrow 295,3/127$ мм; $d_{ч} \rightarrow 10$ мм з $\rho_{ч} \rightarrow 2600$ кг/м³; $\rho_{БР} \rightarrow 1300$ кг/м³.

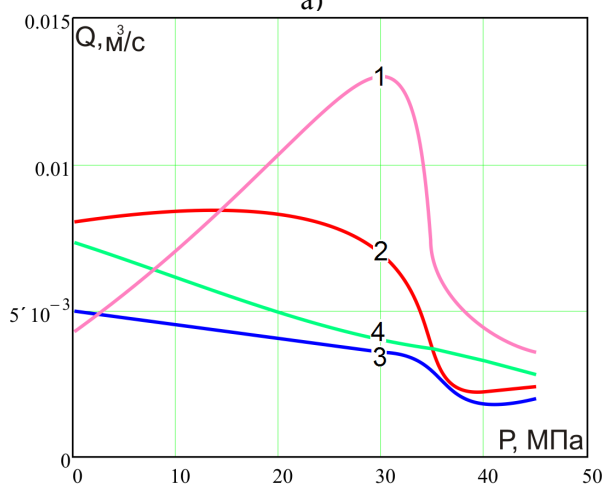
Таблиця 2 – Результати обробки експериментальних даних за τ_0 і η [6]

Тиск, МПа	Температура, °С	Реологічні параметри БР	
		$\tau_0, \text{Па}$	$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$
0,1	50	6,515	0,0236
	60	7,023	0,0258
	90	7,241	0,0154
	120	7,492	0,0179
30	50	6,324	0,0306
	60	7,11	0,0303
	90	7,565	0,0201
	120	6,733	0,0116
35	50	7,185	0,0411
	60	7,270	0,0299
	90	7,728	0,0193
	120	7,557	0,0141
40	50	7,428	0,0433
	60	7,687	0,0360
	90	7,954	0,0214
	120	7,952	0,0175
45	50	7,123	0,0422
	60	7,485	0,0357
	90	8,368	0,0257
	120	8,159	0,0195

З отриманих графічних залежностей слід відмітити, що для БР, які відповідають моделі в'язко-пластичної рідини, термобаричні умови впливають на величину подачі БН, яка проектується з умови зрушення (підняття) частинки шлам у вертикальній свердловині.

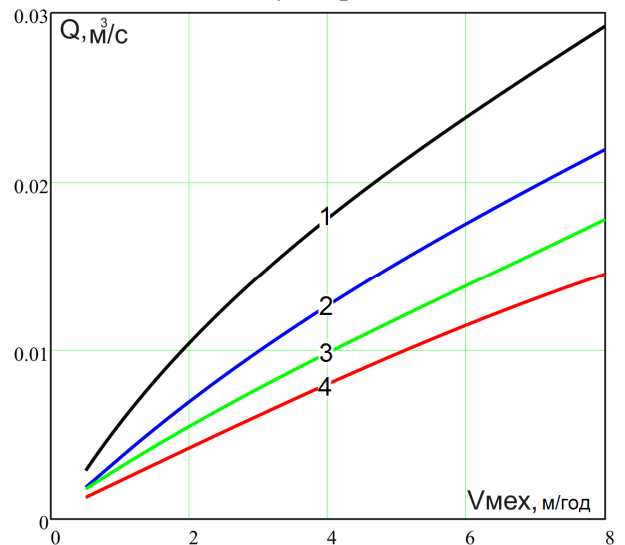


1 - $P = 0,1$ МПа; 2 - $P = 30$ МПа; 3 - $P = 35$ МПа; 4 - $P = 40$ МПа; 5 - $P = 45$ МПа



1 - $t = 120^\circ\text{C}$; 2 - $t = 90^\circ\text{C}$; 3 - $t = 60^\circ\text{C}$; 4 - $t = 50^\circ\text{C}$

Рисунок 2 – Залежності зміни величини Q від P і t у свердловині



1 - $c = 0,02$; 2 - $c = 0,03$; 3 - $c = 0,04$; 4 - $c = 0,05$
Рисунок 3 – Залежності зміни величини Q від $V_{мех}$ і концентрації шлам c

Висновки

В результаті досліджень встановлено:

– зміна температури діапазону ($90^{\circ} < t < 120^{\circ}$) сприяє зниженню показників η і τ_0 , що впливає на виносну здатність БР і потребує збільшення його подачі БН. Особливо при великих тисках ($P > 35 \text{ МПа}$) величина Q здебільшого зростає по відношенню до нижчих температур ($50\text{-}60^{\circ}\text{C}$), (рис. 2, а);

– внаслідок зростання вибійних тисків - P до $40\text{-}45 \text{ МПа}$ і температур до $t = 120^{\circ}\text{C}$, як видно із графіка (рис. 2, б), для зрушення і підняття шламу потоком в'язко-пластичної рідини потрібна на $10\text{-}15\%$ нижча подача БН, ніж при $P=0.1\text{-}10 \text{ МПа}$;

– величина подачі БН при використанні в'язко-пластичної рідини (рис. 2) із врахування змін температури і тиску у вибійних умовах, корелюється з даними графіка (рис. 3), коли $V_{\text{мех}} < 3 \text{ м/год}$ і $2\% < C < 5\%$. Для $V_{\text{мех}} > 3 \text{ м/год}$ для забезпечення якісного промивання свердловини подачу БН необхідно підвищувати в даному випадку від $0,015 \text{ м}^3/\text{с}$ до $0,028 \text{ м}^3/\text{с}$.

– для забезпечення процесу промивання надглибоких свердловин при проектуванні подачі бурового насоса, необхідно враховувати зміну реологічних параметрів БР, яка відбувається під дією вибійних тисків і температур, забезпечуючи умови енегоефективності процесу.

Література

1 Леонов Е. С. Гидроаеромеханика в бурении [Текст] / Е. С. Леонов, В. И. Исаев. – М.: Недра, 1987. – 304 с.

2 Гукасов Н. А. Гидродинамика в разведочном бурении [Текст] / Н. А. Гукасов, О. С. Брюховецкий, В. Ф. Чихоткин. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1999. – 304 с.

3 Кожевников А. А. Аналитические исследования скорости оседания твердых тел в неподвижной жидкости [Текст] / А. А. Кожевников, А. А. Игнатов // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2005», 12-14 жовтня 2005 р. – С. 257-263.

4 Леонов Е. С. Теория методика расчета расхода бурового раствора различной реологии для очистки от шлама ствола наклонно-направленных скважин [Текст] / Е. С. Леонов, В. И. Исаев, И. П. Лукьянов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и море. – 2006. – № 8. – С. 24-31.

5 Мыслюк М. А. Об оценке выносной способности промывочной жидкости при бурении скважин / М. А. Мыслюк // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и море. – 2009. – №2. – С. 29-32.

6 Мыслюк М.А. Оценка влияния баротермических условий на реологические свойства буровых растворов [Текст] / М.А. Мыслюк, Ю. М. Салыжин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и море. – 2007. – № 4. – С. 44-47.

7 Чудик І. І. Оптимальна подача промивальної рідини на вибій свердловини при бурінні свердловини [Текст] / І. І. Чудик, Р. Б. Бабій // Нафтогазова енергетика. – 2007. – № 3 (4). – С. 71-75.

8 Пакет программ для обработки данных ротационной вискозиметрии / М. А.Мыслюк, И. И. Рыбчич, Ю. М. Салыжин [и др.] // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и море. – 2002. – № 10. – С. 24-26.

Стаття надійшла до редакційної колегії 20.11.17

Рекомендована до друку

професором Кондратом О.Р.

(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)

д-ром техн. наук Куцяком Я.В.

(ПрАТ «НДІКБ бурового інструменту, м. Київ)