

НАФТОГАЗОВА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 622.245

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ПРОМИВАЛЬНОЇ РІДИНИ ПІД ЧАС БУРІННЯ ПОХИЛО-СКЕРОВАНИХ І ГОРИЗОНТАЛЬНИХ СВЕРДЛОВИН

М.Є. Чернова

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48090,
e-mail: mirabella1962@mail.ua

Ефективність буріння похило-скерованих (ПС) і горизонтальних свердловин (ГС) залежить від якості очищення вибою та винесення розбуреної породи на денну поверхню. Розглянуто умови формування стійкого обертово-поступального руху промивальної рідини в затрубному просторі похило-скерованої та горизонтальної свердловин безпосередньо енергією потоку рідини та можливість регулювання гідродинамічних параметрів і структури потоку з врахуванням гірничо-геологічних характеристик родовища. Приведено результати теоретичних досліджень гідродинамічних циркуляційних процесів, що відбуваються в затрубному кільцевому просторі під час буріння ПС і ГС із застосуванням гідроакустичних генераторів, які створюють турбулентний потік рідини значної потужності для якісного очищення вибою та винесення розбуреної породи на денну поверхню. Одержано аналітичні залежності з визначення енергетичних характеристик турбулентного потоку промивальної рідини в кільцевому просторі свердловини. З використанням комп'ютерної програми «MathCAD» проведено розрахунок енергетичних параметрів стійкого обертово-поступального потоку біополімерної промивальної рідини у реальній свердловині.

Ключові слова: порода, свердловина, промивальна рідина.

Эффективность бурения наклонных и горизонтальных скважин зависит от качества очистки забоя и выноса разбуренной породы на дневную поверхность. Рассмотрены условия формирования устойчивого вращательно-поступательного движения промывочной жидкости в затрубном пространстве наклонной и горизонтальной скважины непосредственно энергией потока жидкости и возможность регулирования гидродинамических параметров, структуры потока с учетом геологических характеристик горного массива. Наведены результаты теоретических исследований гидродинамических циркуляционных процессов, происходящих в затрубном кольцевом пространстве при бурении наклонных и горизонтальных скважин с применением гидроакустических генераторов, которые создают турбулентный поток жидкости определенной мощности для качественной очистки забоя и выноса разбуренной породы на дневную поверхность. Получены аналитические зависимости для определения энергетических характеристик турбулентного потока промывочной жидкости в кольцевом пространстве скважины. С использованием компьютерной программы «MathCAD» проведены расчеты энергетических параметров устойчивого вращательно-поступательного потока биополимерной промывочной жидкости для реальной скважины.

Ключевые слова: порода, скважина, промывочная жидкость.

Drilling efficiency of directional and horizontal wells depends on quality of coalface cleanness and drill returns onto the daylight surface. There were considered the conditions of formation of stable reverse-forward motion of washing liquid in the annuli of directional and horizontal wells directly by the energy of liquid flow and possibility of regulation of hydrodynamic parameters and flow structure taking into account mining-and-geological characteristics of the field. We provided the results of theoretical studies of hydrodynamic circulation processes that occur in the annuli of directional and horizontal wells during the process of drilling using hydro acoustic generators that create intermittent turbulent liquid flow of significant potency for quality cleaning of the coalface and drill return onto the daylight surface. There were received analytical dependencies for determination of energy characteristics of intermittent turbulent flow of washing liquid in the annulus of the well. Also, there was developed "MathCAD" software and provided the results of calculation of energy parameters of biopolymer washing liquid turbulent flow in the real well.

Key words: field, well, washing liquid.

Характерною особливістю нафтових і газових родовищ України є значна виснаженість основних запасів. У зв'язку з цим надзвичайно

актуальним і важливим є створення і впровадження вітчизняних технологій і технічних засобів для підвищення ефективності буріння ро-

біт, спрямованих на збільшення видобутку нафти і газу. На основі аналізу літературних і патентних джерел встановлено, що найбільш ефективним методом збільшення дебіту свердловини є будівництво похило-скерованих (ПС) і горизонтальних (ГС) свердловин. Провідними нафтогазовидобувними компаніями світу США, Канади, Росії, Франції та іншими, розроблено сучасні технології для успішного буріння горизонтальних свердловин. Проте практика довела, що існуючі новітні технології не в повній мірі відповідають вимогам буріння ПС і ГС на родовищах України, оскільки тут наявні горизонти нестійких порід, які залягають на значних глибинах. Відповідно, під час розробки технології буріння горизонтальних свердловин необхідно враховувати гірничо-геологічні особливості тих чи інших родовищ України.

Основним напрямком робіт, під час будівництва ПС і ГС є створення технічних засобів і технологій, які враховують специфіку гідродинамічних процесів. Аналіз промислових даних свідчить, що через неефективне очищення похило-скерованого і горизонтального стовбура свердловини, відбуваються різного роду ускладнення, аварії, що призводить до додаткових затрат на будівництво свердловини. Тому вдосконалення гідродинамічних процесів, що супроводжують буріння ПС і ГС, є однією з нагальних задач.

Важливим є формування стійкого обертovo-поступального руху промивальної рідини у кільцевому каналі ГС і ПС безпосередньо енергією потоку та можливість регулювання гідродинамічними параметрами і структурою потоку з врахуванням конкретних геолого-технічних умов. Враховуючи фактори, що викликають ускладнення під час буріння ПС і ГС, умови формування стійкого обертovo-поступального потоку ньютонівських та неньютонівських рідин, фактори, що впливають на транспортвальну здатність промивальної рідини з різними реологічними властивостями за обертovo-поступального руху течії в кільцевому каналі затрубного простору є необхідними дослідження, пов'язані з проектуванням та розрахунками спеціальних гідродинамічних елементів у комплексі з компоновкою низу бурильної колони, які дадуть можливість забезпечити керування технологічними процесами буріння.

Потоки зі стійким обертovo-поступальним рухом володіють високими транспортуючими властивостями. Це стосується як ньютонівських, так і неньютонівських рідин. Для цього число Фруда (Fr), яке є однією з основних реологічних характеристик рідин і за своїм порядком визначає співвідношення кінетичної енергії рідини до приросту енергії, зумовленої роботою сил тяжіння на шляху, що дорівнює характерній довжині, повинно бути не меншим за 1. За такого значення сили в'язкості відіграють стабілізуючу роль і для ньютонівської рідини мінімальне значення критерію Рейнольдса (Re) складає 45, оскільки він пов'язаний пропорційно з обертovoю швидкістю потоку в затрубному просторі. Для неньютонівської рідини мінімаль-

не значення критерію Рейнольдса є $Re > 20$, але тут функціональний зв'язок є параболічним. [1].

За таких умов потік рідини з поступально-обертovим рухом, в структурі якої міститься подрібнена порода, може розглядатися з певним наближенням як «тверде тіло», а тому і описується з точки зору властивостей твердого тіла. Такі умови досягаються, якщо розподіл осьової швидкості потоку при вході у гідродинамічний генератор відбувається за параболічним законом а на виході створюються такі умови, що обертovoа складова швидкості більша від осьової за степеневим законом розподілу [2]. За такої умови інерційні сили переважають над силами в'язкості, а масові сили консервативно впливають на потік.

Зокрема, структура біополімерних промивальних рідин, які останнім часом широко застосовуються при бурінні ПС і ГС, включає в себе органічні та неорганічні компоненти, тому і може з певним наближенням, при розробці наукових основ динаміки промивальних рідин в затоплених потоках, розглядатися з точки зору квазітвердого тіла [3].

Характеристики потоку із застосуванням гідродинамічних пристроїв, що містяться в компоновці низу бурильної колони найбільш повно описуються амплітудно-частотними (АЧХ) та фазово-частотними характеристиками (ФЧХ) [4].

Безрозмірні рівняння руху та неперервності потоку мають вигляд:

$$\frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial \bar{t}} = \left(\frac{L}{\bar{r} R^2 a} \right) \partial \left\{ \bar{r} \left[\left(\frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial \bar{r}} \right) \nu - \left(\frac{R}{g_0} \right) \langle u'v' \rangle \right] \right\} \partial \bar{r} - \left(\frac{1}{\alpha} \right) \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial \bar{x}}, \quad (1)$$

$$\left(\frac{1}{\alpha} \right) \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial \langle \bar{v} \rangle}{\partial \bar{r}} + \left(\frac{\bar{v}}{\bar{r}} \right) + \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial \bar{x}} = 0, \quad (2)$$

де $\langle \bar{u} \rangle = \frac{\langle u \rangle}{U_0}$, $\langle \bar{v} \rangle = \frac{\langle v \rangle}{U_0}$ – безрозмірні усереднені складові осьової та радіальної швидкості відповідно (вони включають як турбулентні, достатньо високочастотні, так і вимушені низькочастотні коливання);

U_0 – середнє значення швидкості потоку в трубі;

u', v' – турбулентні пульсації швидкості вздовж осі труби та по радіусу;

ν – кінематична в'язкість рідини;

$\langle \bar{p} \rangle = \frac{\langle p \rangle}{p_0}$ – безрозмірний тиск;

p_0 – середній тиск в трубі;

$\bar{t} = \frac{ta}{L}$ – безрозмірний час;

$\bar{r} = \frac{r}{R}$, $\bar{x} = \frac{x}{L}$ – безрозмірні координати по радіусу і вздовж осі труби;

$\alpha = \frac{\rho U_0 a}{p_0}$ – приведений опір рідини в трубі;

ρ – густина рідини.

Щоб виключити з рівняння (1) пульсаційні складові швидкості u' та v' застосовується гіпотеза Буссінеска про зв'язок дотичного турбулентного напруження τ_r з градієнтом швидкості вздовж радіуса

$$\tau_T = -\rho \langle u'v' \rangle = \rho v_T \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial r}, \quad (3)$$

з врахуванням якого рівняння (1) набуде вигляду

$$\frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial t} = \left(\frac{L}{\bar{r} R^2 a} \right) \frac{\partial \left[\bar{r} (v + v_T) \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial \bar{r}} \right]}{\partial \bar{r}}, \quad (4)$$

де v_T – коефіцієнт турбулентної в'язкості.

Зручно розділити усі змінні на дві складові: на середні значення параметрів, що встановилися і малі періодичні збурення (варіації). Тоді можна записати:

$$\langle \bar{u} \rangle = \bar{u} + \delta \bar{u}, \quad \langle \bar{v} \rangle = \bar{v} + \delta \bar{v}, \quad \langle \bar{p} \rangle = 1 + \delta \bar{p}, \quad (5)$$

де $\bar{u} = \frac{u}{U_0}$ – безрозмірне стаціонарне значення поздовжніх складових швидкості;

$\bar{v} = \frac{v}{U_0}$ – безрозмірне стаціонарне значення радіальної складової швидкості;

$\delta \bar{u} = \frac{\delta u}{U_0}$ – безрозмірна варіація поздовжньої складової швидкості;

$\delta \bar{v} = \frac{\delta v}{U_0}$ – безрозмірна варіація радіальної складової швидкості;

$\delta \bar{p} = \frac{\delta p}{p_0}$ – безрозмірна варіація тиску.

Для отримання рівнянь, що описують розподіл в тракці коливань, шукаються частинні періодичні розв'язки системи рівнянь (2) і (4) у вигляді:

$$\delta \bar{u} = \delta \bar{u}_a e^{(i\bar{\omega}t)}; \delta \bar{v} = \delta \bar{v}_a e^{(i\bar{\omega}t)}; \delta \bar{p} = \delta \bar{p}_a e^{(i\bar{\omega}t)}, \quad (6)$$

де $\bar{\omega} = \frac{\omega L}{a}$ – безрозмірна частота;

$\delta \bar{u}_a, \delta \bar{v}_a, \delta \bar{p}_a$ – безрозмірні амплітуди варіацій відповідних параметрів, які залежать від $\bar{x}, \bar{r}, \bar{\omega}$.

Лінеаризувавши рівняння (2) і (4), підставивши в них співвідношення (5) і розв'язки (6), знаходимо диференціальні рівняння, що зв'язують амплітуди коливань, тиску і складових швидкості вздовж осі труби по радіусу

$$i\bar{\omega} \delta \bar{u}_a = -\left(\frac{1}{\alpha} \right) \frac{\partial \delta \bar{p}_a}{\partial \bar{x}} + \left(\frac{\bar{L}}{r R^2 a} \right) \frac{\partial \left[\bar{r} (v + v_T) \frac{\partial \delta \bar{u}_a}{\partial \bar{r}} \right]}{\partial \bar{r}}, \quad (7)$$

$$i\bar{\omega} \delta \bar{p}_a + \frac{\partial \delta \bar{v}_a}{\partial \bar{r}} + \frac{\delta \bar{v}_a}{\bar{r}} + \frac{\partial \delta \bar{u}_a}{\partial \bar{x}} = 0. \quad (8)$$

Для оцінки відносного вкладу кінематичної в'язкості рідини ν та коефіцієнта турбулентної в'язкості ν_T зіставляється товщина

в'язкого пристінкового шару [1,2,8] $\xi = \frac{30\nu}{u_*}$ та

глибину проникнення збурень у глиб потоку за коливань в'язкого середовища (в ламінарному пристінковому шарі)

$$\delta = \left(\frac{2\nu}{\omega} \right)^{0,5}, \quad (9)$$

де $u_* = \left(\frac{|\tau_w|}{\rho} \right)^{0,5}$ – динамічна швидкість;

τ_w – дотичне напруження на стінці.

Для оцінки величини τ_w використовуємо зв'язок цього параметра з коефіцієнтом опору λ :

$$\tau_w = \frac{\lambda \rho U^2}{8}, \quad (10)$$

і рівнянням Блязіуса

$$\lambda = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}, \quad (11)$$

де U – середня швидкість в перерізі;

Re – число Рейнольдса.

Перетворення рівнянь (7), (8) проводиться введнням змінної:

$$\delta \bar{z}_a = \delta \bar{u}_a + \left(\frac{1}{i\bar{\omega}\alpha} \right) \frac{\partial \delta \bar{p}_a}{\partial \bar{x}}, \quad (12)$$

враховуючи, що за умови $R \ll L$, $\frac{\partial \delta \bar{p}}{\partial \bar{r}} = 0$, визначається:

$$\frac{\partial^2 \delta \bar{z}_a}{\partial \bar{r}^2} + \left(\frac{1}{\bar{r}} \right) \frac{\partial \delta \bar{z}_a}{\partial \bar{r}} - i s^2 \delta \bar{z}_a = 0, \quad (13)$$

де $s = R \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}$ – безрозмірний параметр, який називають числом Стокса. Розв'язок рівняння (13) має вигляд:

$$\delta \bar{z}_a = E(\bar{x}, \bar{\omega}) J_0(i^{\frac{3}{2}} \bar{r} s) + F(\bar{x}, \bar{\omega}) Y_0(i^{\frac{3}{2}} \bar{r} s), \quad (14)$$

де J_0, Y_0 – функції Бесселя;

$E(\bar{x}, \bar{\omega}), F(\bar{x}, \bar{\omega})$ – невідомі функції.

Враховуючи, що за прямування аргументу до нуля функція Бесселя Y_0 прямує до нескінченності, а амплітуда варіації швидкості $\delta \bar{u}_a$, а отже і $\delta \bar{z}_a$ є обмеженими, то функція

$F(\bar{x}, \bar{\omega}) = 0$. Застосовуючи граничну умову залипання пристінкового шару $\delta\bar{u} = 0$ за умови $\bar{r} = 1$, знаходиться співвідношення для функції $E(\bar{x}, \bar{\omega})$, а відповідно для амплітуд варіації $\delta\bar{z}_a$

$$\delta\bar{z}_a = \left(\frac{1}{i\omega\alpha} \right) \left[\frac{J_0(i^{\frac{3}{2}}s\bar{r})}{J_0(i^{\frac{3}{2}}s)} \right] \frac{\partial \delta\bar{p}_a}{\partial \bar{x}}, \quad (15)$$

та варіації швидкості:

$$\delta\bar{u}_a(\bar{x}, \bar{r}, \omega) = - \left(\frac{1}{i\bar{\omega}\alpha} \right) \left(\frac{\partial \delta\bar{p}_a}{\partial \bar{x}} \right) \left[1 - \frac{J_0(i^{\frac{3}{2}}s\bar{r})}{J_0(i^{\frac{3}{2}}s)} \right]. \quad (16)$$

Для аналізу розподілу амплітуд варіацій швидкості і тиску по довжині свердловини, вводиться середня за перерізом амплітуда варіації швидкості:

$$\delta\bar{U}_a(\bar{x}, \bar{\omega}) = \left(\frac{1}{\pi} \right) \int_0^1 2\pi\bar{r} \delta\bar{u}_a(\bar{x}, \bar{r}, \bar{\omega}) d\bar{r}, \quad (17)$$

яка за допомогою співвідношення (16) перетворюється до вигляду:

$$\delta\bar{U}_a(\bar{x}, \bar{\omega}) = - \left(\frac{1}{i\bar{\omega}\alpha} \right) \left(\frac{\partial \delta\bar{p}_a}{\partial \bar{x}} \right) \left[1 - \frac{2J_1(i^{\frac{3}{2}}s)}{i^{\frac{3}{2}}sJ_0(i^{\frac{3}{2}}s)} \right], \quad (18)$$

де J_1 – функція Бесселя першого роду першого порядку. Ввівши параметр β , що визначається залежністю:

$$\left(\frac{1}{\beta^2} \right) = \left(\frac{2}{i^{\frac{3}{2}}s} \right) \left[\frac{J_1(i^{\frac{3}{2}}s)}{J_0(i^{\frac{3}{2}}s)} \right] - 1, \quad (19)$$

рівняння руху (18) кінцево набуде вигляду:

$$\delta\bar{U}_a = \left(\frac{1}{i\bar{\omega}\alpha} \right) \left(\frac{1}{\beta^2} \right) \frac{\partial \delta\bar{p}_a}{\partial \bar{x}}. \quad (20)$$

Провівши з рівнянням неперервності (8) аналогічні перетворення що й з рівністю (7), та врахувавши граничні умови на пристінковому шарі, одержується співвідношення:

$$\delta\bar{p}_a = \left(\frac{\alpha}{i\bar{\omega}} \right) \frac{\partial \delta\bar{U}_a}{\partial \bar{x}}. \quad (21)$$

Виключивши з рівностей (20) та (21) амплітуду варіації тиску, отримується рівняння, що визначає розподіл амплітуд коливань середньої швидкості по довжині свердловини:

$$\frac{d^2 \delta\bar{U}_a}{d\bar{x}^2} - \beta^2 \bar{\omega}^2 \delta\bar{U}_a = 0. \quad (22)$$

Оскільки, корені характеристичного рівняння (22) дорівнюють $\pm \beta\bar{\omega}$, його розв'язок буде мати вигляд:

$$\delta\bar{U}_a = Ce^{(\beta\bar{\omega}\bar{x})} + De^{(-\beta\bar{\omega}\bar{x})}. \quad (23)$$

Підставляючи розв'язок (23) у (21), знаходять розв'язок для амплітуди варіації тиску:

$$\delta\bar{p}_a = i\beta\alpha \left[Ce^{(\beta\bar{\omega}\bar{x})} - De^{(-\beta\bar{\omega}\bar{x})} \right]. \quad (24)$$

Для визначення констант C та D формулюються граничні умови для вибою та устя свердловини:

$$\bar{x} = 0; \quad \delta\bar{p}_a = \Pi_0 \delta\bar{U}_a + \Gamma_0 \delta\bar{y}_0, \quad (25)$$

$$\bar{x} = 1; \quad \delta\bar{p}_a = \Pi_1 \delta\bar{U}_a + \Gamma_1 \delta\bar{y}_1, \quad (26)$$

де Π_0, Π_1 – відповідно вхідний та вихідний імпеданси;

γ_0, γ_1 – коефіцієнти підсилення для зовнішніх збурень на вході $\delta\bar{y}_0$ і на виході $\delta\bar{y}_1$ потоку.

Підстановка розв'язків (23) і (24) в граничні умови (25) та (26) дає можливість визначити коефіцієнти C та D , після чого віднаходяться співвідношення, що зв'язують коливання швидкості і тиску в довільному перерізі свердловини за відомої частоти коливань:

$$\delta\bar{U}_a(\bar{x}, \bar{\omega}) = \left(\frac{\gamma_1}{B} \right) \left[(\alpha_n - \Pi_0) e^{(\beta\bar{\omega}\bar{x})} + \right. \quad (27)$$

$$\left. + (\alpha_n + \Pi_0) e^{(-\beta\bar{\omega}\bar{x})} \right] \delta\bar{y}_1 - \left(\frac{\gamma_0}{B} \right) \times$$

$$\times \left\{ (\alpha_n + \Pi_1) e^{[\beta\bar{\omega}(1-\bar{x})]} + (\alpha_n - \Pi_1) e^{[-\beta\bar{\omega}(1-\bar{x})]} \right\} \delta\bar{y}_0;$$

$$\delta\bar{p}_a(\bar{x}, \bar{\omega}) = \left(\frac{\alpha_n \gamma_1}{B} \right) \left[(\alpha_n + \Pi_0) e^{(-\beta\bar{\omega}\bar{x})} - \right. \quad (28)$$

$$\left. - (\alpha_n - \Pi_0) e^{(\beta\bar{\omega}\bar{x})} \right] \delta\bar{y}_1 - \left(\frac{\alpha_n \gamma_0}{B} \right) \times$$

$$\times \left\{ (\alpha_n + \Pi_1) e^{[\beta\bar{\omega}(1-\bar{x})]} - (\alpha_n - \Pi_1) e^{[-\beta\bar{\omega}(1-\bar{x})]} \right\} \delta\bar{y}_0;$$

де

$$B = (\alpha_n + \Pi_0)(\alpha_n - \Pi_1) e^{(-\beta\bar{\omega})} - (\alpha_n - \Pi_0)(\alpha_n + \Pi_1) e^{(\beta\bar{\omega})};$$

$$\alpha_n = -i\alpha\beta - \text{приведений хвильовий опір.}$$

Рівняння (27) та (28) дають можливість визначити хвильові характеристики турбулентного потоку рідини в кільцевому каналі затрубного простору в свердловині за стійкого обертового-поступального руху.

Під час проведення розрахунків використовувалися дані реальних умов буріння, зокрема $P = 3 \text{ МПа}$; вхідні і вихідні характеристики тракту генератора включають розміри вхідних і вихідних камер генератора, для яких розхід рідини становить $Q = 36 \text{ л/с}$, а співвідношення

$$\text{хвильового опору становило } \frac{2\Delta p_1}{\rho U_0 a} = 2,55 \text{ для}$$

полімерної рідини «Біокар».

На рисунку 1 наведено результат визначення хвильових характеристик тракту (АЧХ) генератора і зсуву фаз між амплітудами коливань (ФЧХ), звідки видно, як в залежності від амплітудо-частотних (рис. 1 а) та фазово-частотних (рис. 1 б) характеристик генератора

змінюються енергетичні характеристики потоку в затрубному кільцевому просторі свердловини.

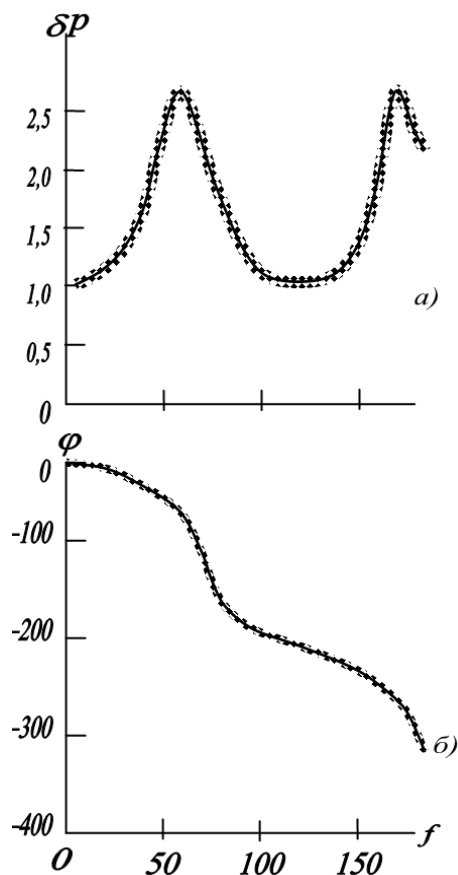


Рисунок 1 – Амплітудно-частотні (а) та фазово-частотні (б) характеристики тракту потоку

Наявність резонансних піків дає можливість визначити межі таких амплітуд і частот, за яких робочі характеристики генератора будуть давати стійкий турбулентний потік, забезпечуючи ефективне очищення вибою стовбура свердловини під час буріння ПС і ГС.

ВИСНОВКИ

Підвищення ефективності буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин можливе за рахунок досконалих гідродинамічних циркуляційних процесів промивальної рідини в затрубному просторі свердловини.

Формування стійкого обертово-поступального руху промивальної рідини в кільцевому каналі затрубного простору ПС і ГС забезпечується енергією самого потоку, енергетичні характеристики якого залежать від конструкції та технічних характеристик гідроакустичного генератора, який включається у компоновку низу бурильної колони.

Науково обумовлений вибір характеристик гідродинамічних циркуляційних процесів забезпечує запобігання ускладненням, пов'язаним з порушенням стійкості стінок свердловини, утворенням застійних зон, спричиняючи

сепарацію шлама за значного зниження енергозатрат.

Розрахунок параметрів елементів гідродинамічних пристроїв в комплексі з компоновкою низу бурильної колони забезпечує можливість керування технологічним процесом буріння з врахуванням геологічних умов родовищ.

Література

- 1 Чернова М.Є. Динаміка гідроакустичних коливань у затопленій струмині затрубного простору бурильної колони / М.Є. Чернова // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2013. – № 1 (34). – С. 82-88.
- 2 Бердин Т.Г. Проектирование разработки нефтегазовых месторождений системами горизонтальных скважин / Т.Г. Бердин. – М.: Недра, 2001. – 157 с.
- 3 Лебединский Е.В. Экспериментальный метод определения динамических свойств потоков / Е.В. Лебединский, М.С. Натанзон, М.В. Никифоров // Акустический журнал. – 1982. – Т. 28. – № 5. – С. 660-684.
- 4 Абалакин И.В. Многопараметрическое семейство схем повышенной точности для уравнений переноса турбулентных потоков / И.В. Абалакин, Т.К. Козубская // Математическое моделирование. – 2007. – Т. 19. – № 9. – С. 56-66.

Стаття надійшла до редакційної колегії
12.02.14

Рекомендована до друку
професором **Мойсишиним В.М.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром техн. наук **Куцяком Я.В.**
(НДІКБ бурового інструменту, м. Київ)