

УДК 622.245

М.Є. Чернова, канд. техн. наук

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОЛІМЕРНО-КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ БУРІННЯ ПОХИЛО-СКЕРОВАНИХ ТА ГОРИЗОНТАЛЬНИХ СВЕРДЛОВИН

Розглядається можливість підвищення ефективності доведення осьового навантаження на долото в умовах буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин та запобігання явищу прихоплення бурильної колони.

Внаслідок наявності сил тертя між бурильною колоною та нижньою стінкою стовбура похило-скерованої чи горизонтальної свердловини ускладнюється доведення ефективного осьового навантаження на породоруйнівний інструмент, що впливає на механічну швидкість буріння. Для зменшення сил тертя пропонується застосування полімерно-композиційних матеріалів (ПКМ) для покриття поверхні елементів бурильної колони. Наводиться методика та математичні моделі, за рахунок яких є можливим отримання ПКМ із наперед заданими фізико-механічними властивостями, які б задовольняли вимогам експлуатації бурильних колон під час буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин.

Пропонується модель комплексного методу граничних елементів зі змішаною крайовою задачею для основного рівня стаціонарного поля і в якості контрольної моделі пропонується застосувати термодинамічний підхід на основі статистичного методу Монте-Карло. Таке поєднання дає можливість оцінити фізико-механічні властивості металополімерного покриття та правильно підібрати тип наповнювача для ПКМ, щоб повною мірою задовільнити вимоги щодо міцнісних характеристик покриття елементів бурильної колони та її поверхні для даних умов експлуатації і технологічного процесу.

Ключові слова: *полімерно-композиційні матеріали, бурильна колона, свердловина, промивальна рідина.*

Для забезпечення потреб держави в енергоносіях, зокрема нафти і газу, є необхідним постійний приріст об'ємів бурових робіт. Для цього зусилля спрямовуються на освоєння нових родовищ та інтенсифікацію розробки тих родовищ, які вже експлуатуються.

Характерною особливістю нафтових і газових родовищ України є значна виснаженість основних запасів та наявність великої кількості залишкових запасів у тупикових і слабодренованих зонах нафтових об'ємів газодоводів та водоплавних покладах нафти з низькопроникними колекторами.

Для підвищення ефективності бурових робіт, спрямованих на збільшення видобутку нафти і газу, важливим є створення і впровадження нових технологій і технічних засобів. Найбільш ефективним методом підвищення видобутку вуглеводнів є будівництво похило-скерованих і горизонтальних свердловин.

Під час будівництва похило-скерованих і горизонтальних свердловин бурильна колона, під дією сили тяжіння, притискається до нижньої стінки свердловини, через що її обертання утруднюється, а це суттєво ускладнює винесення шламу, зростають сили опору поступальному рухові бурильної колони в напрямку вибою свердловини, що, в свою чергу, перешкоджає оптимальному доведенню осьового навантаження на долото. В кінцевому результаті понижуються показники роботи доліт, погіршується якість керування траєкторією свердловини.

Зменшення сил тертя між бурильною колоною і нижньою стінкою стовбура свердловини та покращення передачі осьового навантаження на породоруйнівний інструмент

можна здійснити внаслідок покриття зовнішніх поверхонь елементів бурильної колони полімерно-композиційними матеріалами.

Полімерне покриття може застосовуватися у вигляді тонкого шару, який наноситься на обезжирену металеву поверхню за допомогою обраного способу і технології. Товщина покриттєвого шару становить 0,3-0,7 мм.

Полімерне покриття може наноситися за допомогою сумішей, що полімеризуються, розплавів та дрібнодисперсних порошоків. Використання спеціальних емульсій дає можливість створювати полімерне покриття з таких матеріалів, які самі по собі не можуть утворювати міцного адгезійного з'єднання з металом. Зокрема такими є фторопласти, які мають відмінні механічні властивості щодо коефіцієнту тертя, модуля Юнга, коефіцієнта Пуассона, але самі по собі володіють низькою адгезійною здатністю. Тому для покриття металевих поверхонь, таких як елементи КНБК та зовнішня поверхня бурильних труб, фторопласти доцільно застосовувати в суміші з іншими речовинами, які не погіршують фізико-механічних властивостей полімерного покриття.

Завдяки своїм високим антифрикційним властивостям досить широкого застосування набув політетрафторетилен (Ф4). Цей полімер відноситься до термопластів, але в розплавленому вигляді має малу текучість, тому його переробка є утрудненою. Головною перевагою Ф4 є те, що він володіє найнижчим з усіх відомих полімерів коефіцієнтом тертя. Окрім того Ф4 володіє дуже низьким водопоглинанням – менше 0,01%. Здатність Ф4 до значної деформації виключає можливість його використання у вигляді товстостінних втулок, але те що є негативним для одного напрямку застосування, є позитивним для іншого. Більшість полімерів є хімічно стійкими окрім своїх розчинників, фторопласти ж є стійкими як до всіх відомих кислот, так і сильних окислювачів та розчинників.

Фторопласти володіють високими діелектричними характеристиками в широкому інтервалі частот, малою пористістю, феноменальною інертністю. Фторопласти відносяться до кристалічних полімерів. Але конкретної температури кристалізації не мають, існує лише інтервал кристалізації, зокрема для Ф4 цей інтервал знаходиться в діапазоні 350÷260°C. Міцнісні характеристики фторопластів досить високі, зокрема міцність на розрив сягає 30 МПа, відносне видовження на розрив становить 250 %. Фторопластові полімери виготовлялися на ВО «Хлорвініл», на даний час виготовляються нафтопереробними заводами у вигляді порошку з розміром часток 50-500 мкм, а в емульсії – 0,25 мкм.

Є можливим застосування наповнених матеріалів на основі фторопласту Ф4, які містять графіт, кокс, двосірковий молібден, металеві порошки, скловолокно та інші наповнювачі, що забезпечує підвищення тих чи інших фізико-механічних характеристик таких як твердість, зносостійкість, зниження деформації під навантаженням, зниження коефіцієнта термічного розширення, підвищення модуля пружності, міцності на стиск та інше. Фізико-механічні властивості чистого Ф4 наведено в таблиці.

Фізико-механічні властивості фторопласта марки Ф4

№ п/п	Показники	Ф4
1	Густина, кг/м ³	2120-2200
2	Руйнівне напруження при розтягу, МПа	14,7-34,5
3	Відносне видовження при розриві, %	250-500
4	Модуль пружності за стиску, МПа	686,5
5	Модуль пружності за розтягу, МПа	410
6	Твердість (за Бринелем), МПа	29,4-39,2
7	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м×К)	0,25
8	Питома теплоємність, кДж/(кг×К)	1,04
9	Теплостійкість (за Віка')	110
10	Водопоглинання (за добу), %	0,00

За вищої температури ніж температура розкладання (415 °С) Ф4 не переходить у в'язкотекучий стан, за температури розплавлення біля 370°С в'язкість становить $\sim 10^{11}$ Па·с.

Застосування композиційних матеріалів в якості покриття вимагає проведення експериментальних і теоретичних досліджень з метою визначення їх фізико-маханічних властивостей, оцінки роботоздатності, міцності, зносостійкості.

Композиційні матеріали (КМ), зокрема на основі Ф4, це складні гетерогенні структури, утворені комбінацією армуючих елементів та ізотропного середовища. Матриця забезпечує монолітність КМ, фіксує форму і взаємне розміщення армуючих елементів. Матеріал матриці визначає метод створення покриття, рівень робочих температур композиту, характер зміни властивостей за впливу різних чинників. Наповнювачі в загальному випадку спричинюють зміну ефективних пружних та деформівно-міцнісних характеристик отриманого матеріалу. Метою таких модифікацій є отримання певних фізико-механічних властивостей покриття для даних умов експлуатації. Найбільш важливими параметрами, які контролюються є деформівно-міцнісні, до складу яких входять: модуль пружності, гранична деформація руйнування на розтяг, межа текучості, зношуваність на час та на шлях.

Методи дослідження КМ є дуже різноманітними, вони суттєво відрізняються від підходів класичної механіки, де тіло (зразок) вважається однорідним. Для високоенергетичних матеріалів, якими є композити на полімерній основі у фізичних моделях використовується структурно-механічний, мезоскопічний, мікроструктурний та інші підходи. Мають важливе значення розміри включень (наповнювачів), оскільки вони суттєво впливають на механічні властивості покриття: більші роблять матеріал більш податливим, менші – жорсткішим. З якісної точки зору це пояснюється тим, що включення можуть ставати концентраторами напружень. Але в роботі [3] на основі проведеної оцінки форм і розміщень включень наголошується, що зміну міцнісних характеристик КМ викликають включення, які орієнтуються в певному напрямку, розорієнтовані (розміщені хаотично) включення характеризують анізотропію міцнісних характеристик.

Одним з основних параметрів, що визначає деформівно-міцнісні характеристики КМ та можливість застосування в якості покриття елементів бурильної колони і її стінок є рівень адгезії. Адгезія зумовлюється тими самими причинами, що й адсорбція. Кількісною характеристикою адгезії є робота, необхідна для роз'єднання тіл і залежить від того, яким чином цей процес буде відбуватися: шляхом зсуву вздовж поверхні поділу чи відривом у напрямку, який є перпендикулярним до поверхні. Адгезія інколи є більшою, ніж когезія, що характеризує сили зчеплення часток всередині тіла. У цьому випадку розрив відбувається когезійно – всередині найменш міцного з дотичних тіл.

Явище адгезії супроводжує процес зварювання, паяння, лудження, склеювання, нанесення полімерних покриттів на металеві поверхні для запобігання корозії. Визначення ступеню адгезії діляться на три групи і в кожній з них суть стосується одного і того ж об'єкту – гетерогенного тіла, що містить дві різні фази, які між собою контактують. Ці тіла пов'язані між собою на межі поділу міжмолекулярними силами. Для першої групи визначення ступеню адгезії стосується виникнення такого зв'язку, тобто переходу системи в новий стан – зв'язаний. Для другої групи – наявність зв'язку як такого – міра результату. Для третьої групи – стан (є зв'язок, немає зв'язку) чи процес зігноровано. Так чи інакше, але одним з важливих об'єктів дослідження залишається міжфазна межа контактуючих несумісних фаз. Для опису такого об'єкту доцільним є термодинамічний підхід чи молекулярна теорія взаємодії між макроскопічними тілами, описані в монографіях [4], інші теорії доцільно розглядати в якості відхилень від ідеальної адгезії. Міцність адгезійного з'єднання визначає основні механічні властивості ПКМ, якими є фізичні аспекти процесів розвитку і росту тріщин, розподілу напружень і їх релаксації та руйнування, наявність внутрішніх напружень і таке інше.

Для моделювання фізичних процесів у тілах з композиційних матеріалів доцільним є застосування комплексного методу граничних елементів [5] для розв'язування задач теорії

потенціалу, ускладнених наявністю в однорідних тілах системи неоднорідних включень, якими в ПКМ є наповнювачі, наприклад порошок міді, графіту та інші. Розглядається змішана крайова задача для основного рівняння стаціонарного поля в однозв'язній області за умови, що характеристики системи (середовища) є неперервною функцією, сталою скрізь у цій області, за винятком скінченної сукупності під областей, де існує залежність від координат.

Отже, характеристики середовища $\Lambda(z)$ стосовно певного фізичного процесу, модельованого потенціалом безвихрового векторного поля є неперервною функцією декартових координат $z = (x, y)$, сталою скрізь у плоскій однозв'язній області Ω з простим замкнутим краєм $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$, за винятком скінченної сукупності локальних неоднорідних включень $\Omega_k \subset \Omega$ ($\Omega_k \cap \Omega_l = \emptyset$, $\partial\Omega_k \cap \Gamma = \emptyset$, $k, l = \overline{1, K}$).

Змішана крайова задача для основного рівняння стаціонарного поля в локальонеоднорідному середовищі записується:

$$\operatorname{div}(\Lambda(z)\operatorname{grad}\theta(z)) = 0, \quad z \in \Omega, \quad (1)$$

$$\theta(z) = p(z), \quad z \in \Gamma_1, \quad \Lambda(z)\frac{\partial\theta(z)}{\partial\vec{n}} = -q(z), \quad z \in \Gamma_2, \quad (2)$$

де

$$\Lambda(z) = 1 + \sum_{k=1}^K a_k \lambda_k(z) \chi_k(z) \quad (z \in \Omega), \quad (3)$$

$\lambda_k(z)$ – якісна характеристика середовища в Ω_k ($k = \overline{1, K}$), для якої $\lambda_k(z) \geq 0$, $\max \lambda_k(z) = 1$;

$\lambda_k(z)|_{z \in \partial\Omega_k} = 0$; $\chi_k(z)$ – характеристична функція області Ω_k ; $a_k = \operatorname{const}_k > -1$.

З врахуванням (3), крайова задача за [5] матиме вигляд:

$$\nabla^2\theta = -\sum_{k=1}^K a_k B_k[\theta] \chi_k \quad \text{в } \Omega, \quad (4)$$

$$\theta = p \quad \text{на } \Gamma_1; \quad \frac{\partial\theta}{\partial\vec{n}} = -q \quad \text{на } \Gamma_2, \quad (5)$$

де $B[\bullet] = \frac{\nabla\lambda_k \nabla[\bullet]}{1 + a_k \lambda_k}$; ∇ – оператор Гамільтона.

За умови, що апроксимація $\hat{\theta}$ функції розв'язку θ задачі (4) і (5) в області кожної з локальних неоднорідностей Ω_k є відомою, за виведенням в [5], розв'язок \mathcal{G} отриманої крайової задачі трактуватиметься:

$$\nabla^2\mathcal{G} = -\sum_{k=1}^K a_k B_k[\hat{\theta}] \chi_k \quad \text{в } \Omega; \quad (6)$$

$$\mathcal{G} = p \quad \text{на } \Gamma_1; \quad \frac{\partial\mathcal{G}}{\partial\vec{n}} = -q \quad \text{на } \Gamma_2 \quad (7)$$

як аналог розв'язку вихідної задачі.

Далі розв'язок задачі (6) і (7) згідно [5] зображується у вигляді:

$$\mathcal{G}(z) = u(z) + \sum_{k=1}^K P_k[z, \hat{\theta}], \quad (8)$$

де

$$P_k[z, \bullet] = \frac{a_k}{2\pi} \int_{\Omega_k} \ln \frac{1}{|z - \zeta|} B_k[\bullet] d\Omega_k(\zeta); \quad (9)$$

$u(z)$ – розв'язок задачі для рівняння Лапласа з видозміненими крайовими умовами:

$$\nabla^2 u = 0 \quad \text{в } \Omega; \quad (10)$$

$$u = p - \sum_k P_k[z, \hat{\theta}] \quad \text{на } \Gamma_1, \quad \frac{\partial u}{\partial \bar{n}} = -q - \sum_k Q_k[z, \hat{\theta}] \quad \text{на } \Gamma_2 \quad (11)$$

де $Q_k[z, \bullet] = \frac{\partial}{\partial \bar{n}} P_k[z, \bullet]$.

Шуканий розв'язок задачі (10), (11) інтегрується як $u = \operatorname{Re} w$ згідно [5], де $w = w(z) = u(z) + iv(z)$ - аналітична в $\Omega \cup \Gamma$ функція комплексної змінної $z = x + iy$, причому потенціал u та функція потоку v є гармонійними в $\Omega \cup \Gamma$.

Беручи до уваги, що $\frac{\partial u}{\partial \bar{n}} = \frac{\partial v}{\partial \bar{s}}$, де \bar{s} - одиничний додатноорієнтований (проти стрілки годинника) вектор, дотичний до Γ , переходимо до розв'язування такої крайової задачі:

$$\nabla^2 u(z) = 0 \quad \text{в } \Omega, \quad (12)$$

$$u(z) = p(z) - \sum_k P_k[z, \hat{\theta}] \quad \text{на } \Gamma_1; \quad (13)$$

$$\frac{\partial v(z)}{\partial \bar{s}(z)} = -q(z) - \sum_k Q_k[z, \hat{\theta}] \quad \text{на } \Gamma_2. \quad (14)$$

Для довільної точки z заданої однозв'язної області Ω з простим замкнутим додатноорієнтованим краєм Γ справедлива інтегральна формула Коші:

$$w(z) = \frac{1}{2\pi i} \cdot \int_{\Gamma} \frac{w(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta, \quad (15)$$

на основі якої є справедливою дискретизація Γ послідовністю N граничних елементів Γ_n (для яких $\bigcup_{n=1}^l \Gamma_n$ апроксимує Γ_1 , а $\bigcup_{n=l+1}^N \Gamma_n = \Gamma_2$), при моделюванні кожного з елементів за допомогою вектора $\vec{\varphi}$ базових інтерполюючих функцій, пов'язаних з локальною нормалізованою координатою η . Уздовж кожного з елементів апроксимується w інтерполяційним поліномом [5]:

$$w(\eta) = \vec{\varphi}^T(\eta) \cdot \vec{w}_n, \quad (16)$$

де \vec{w}_n - вектор невідомих вузлових значень w .

Кожна з областей Ω_k дискретизується системою ермітових чотирикутних елементів Ω_{km} ($m = \overline{1, M_k}$) і $\hat{\theta}$ представляється пробною функцією [5]:

$$\hat{\theta}(\xi_1, \xi_2) = \vec{\psi}^T(\xi_1, \xi_2) \cdot \vec{\theta}_{km}, \quad (17)$$

де $\vec{\theta}_{km}$ - вектор невідомих вузлових значень функції $\hat{\theta}$, значень її перших та змішаних похідних на елементі Ω_{km} ; $\vec{\psi}$ - вектор базових функцій у локальній системі координат $\xi = (\xi_1, \xi_2)$.

З урахуванням (16) дискретний аналог (15) набуває вигляду:

$$\hat{w}(z) = \frac{1}{2\pi i} \sum_{n=1}^N \frac{\vec{\varphi}^T \zeta'(\eta)}{\zeta(\eta)} d\eta \cdot \vec{w}_n. \quad (18)$$

Враховуючи (17), P_k (як і Q_k) записується:

$$P_k[z, \hat{\theta}] = P_k[z, \vec{\psi}(\xi_1, \xi_2)] \vec{\theta}_{km},$$

де

$$P_k = \frac{a_k}{2\pi} \iint_{\Omega_{km}(\xi)} \ln \frac{1}{|z - \zeta(\xi)|} B_k[\vec{\psi}] \left| \frac{\partial \zeta_1^m}{\partial \xi_1} \frac{\partial \zeta_2^m}{\partial \xi_2} - \frac{\partial \zeta_2^m}{\partial \xi_1} \frac{\partial \zeta_1^m}{\partial \xi_2} \right| d\xi_1 d\xi_2.$$

Система рівнянь для визначення вузлових значень будується за методом зважених нев'язок, що вводяться як для крайових умов, так і для областей локальних включень у матричній формі, за умови використання непрямого формулювання методу граничних елементів, буде мати вигляд:

$$\begin{pmatrix} V_u^1 & V_u^2 & V_v^1 & V_v^2 & G_1 & \dots & G_K \\ U_u^1 & U_u^2 & U_v^1 & U_v^2 & T_1 & \dots & T_K \\ \tilde{U}_{u1}^1 & \tilde{U}_{u1}^2 & \tilde{U}_{v1}^1 & \tilde{U}_{v1}^2 & \tilde{T}_{11} & \dots & \tilde{T}_{1K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{U}_{uK}^1 & \tilde{U}_{uK}^2 & \tilde{U}_{vK}^1 & \tilde{U}_{vK}^2 & \tilde{T}_{K1} & \dots & \tilde{T}_{KK} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{p} \\ \hat{u} \\ \hat{q} \\ \hat{\theta}_1 \\ \vdots \\ \hat{\theta}_K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{v} \\ \hat{u} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (19)$$

де $\hat{u}, \hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_K, \hat{v}$ – вектори невідомих вузлових значень, відповідно, потенціалу на дискретному аналізі Γ_2 , дискретних аналогах областей $\Omega_1, \dots, \Omega_K$, а також невідомі вузлові значення функцій потоку на дискретному аналізі Γ_1 краю області Ω .

Блоки V_j^i ($j = u, v$), G_k ($k = \overline{1, K}$) – суми внесків, відповідно, дискретного аналога потенціалу і потоку на Γ_i ($i = 1, 2$), а також в Ω_k для уявної частини \hat{w} на Γ_1 . Блоки U_j^i ($j = u, v$), T_k ($k = \overline{1, K}$) – суми внесків, відповідно, аналога потенціалу і потоку на Γ_i ($i = 1, 2$), а також в Ω_k для дійсної частини \hat{w} на Γ_2 . Блоки \tilde{U}_{jl}^i ($j = u, v$), \tilde{T}_{lk} ($k, l = \overline{1, K}$) – суми внесків, відповідно, дискретного аналога потенціалу і потоку на Γ_i ($i = 1, 2$), а також в Ω_k для дійсної частини \hat{w} на Ω_k .

У довільній точці z дискретного аналога області Ω значення потенціалу та функції потоку знаходяться з допомогою формули (18), користуючись розв'язком (19).

Дослідження кінетичної теорії високоеластичності полімерів, що застосовуються для вирішення вищезгаданих проблем свідчать, що під час деформації вони проявляють пружність, природа якої є подібною до пружності газів. Як і стиск газу, так і розтяг ПКМ супроводжується опором розтягу зразка. «Модуль пружності» газу і рівноважний модуль еластичності зростають пропорційно до температури (з підвищенням температури зростає інтенсивність теплового руху і зростає опір деформації).

Але у газів міжмолекулярна взаємодія є незначною, а у ПКМ – значною. Під час деформації газів змінюється об'єм (зменшується віддаль між молекулами), а під час деформації ПКМ об'єм не змінюється. Під час деформації ПКМ змінюється ступінь закрученості макромолекул, що переводить їх із більш ймовірного стану у менш ймовірний стан. Після припинення дії навантаження полімерні ланцюги з плином часу самовільно під дією теплового руху повертаються у початковий стан.

Розвиток кінетичної теорії високоеластичності дало можливість кількісно зв'язати рівноважні пружні властивості ідеальних сіток з їх структурними параметрами. В теорії ідеальна полімерна сітка розглядається як просторова структура, утворена полімерними ланцюгами, які з'єднуються між собою вузлами.

Напруження розраховане на вихідний переріз зразка, розраховується співвідношенням:

$$\sigma = \frac{\rho RT}{M_c} [D - D^{-2}] \quad (20)$$

де ρ – густина зразка, кг/м³; M_c – молекулярна маса, кг; R – газова стала, $R = 8,31$ (Дж/моль · К); T – термодинамічна температура, К; D – відносне видовження зразка

$$D = \frac{l}{l_0}.$$

Теоретично доведено [4], що високоеластична деформація характеризується не лише кінетикою, а має й енергетичний характер, що характеризує подолання потенціальних бар'єрів внутрішнього обертання. Ця залежність описується емпіричним рівнянням Муні-Рівліна:

$$\sigma = \left(\frac{RT\rho}{M_e} + AD^{-1} \right) (D - D^{-2}) \quad (21)$$

де A – константа для даного полімеру, Дж/моль·м³.

Отже, кінетична теорія базується на чотирьох умовах:

- 1) тенденція макромолекул до викривлення;
- 2) висока гнучкість макромолекул;
- 3) ступінь зшиву;
- 4) подолання потенціальних бар'єрів обертання.

У високоеластичному стані для ПКМ є характерним поєднання властивостей усіх трьох агрегатних станів речовини: за механічними властивостями – це тверді тіла, за внутрішньою структурою – це рідини, за природою пружних сил під час деформації – гази.

Процес високоеластичної деформації ПКМ з точки зору термодинаміки пояснюється на прикладі видовження зразка з початкової довжини l_0 до довжини видовження $l_0 + dl$, що відбулося під дією сили f , але оскільки ПКМ практично не змінюють свого об'єму в процесі деформації, то робота, виконана при цьому буде:

$$dA = -fdl. \quad (22)$$

За першим законом термодинаміки для ізольованих систем різниця між теплотою, отриманою системою і виконаною нею ж роботою, залежить лише від початкового і кінцевого стану системи:

$$dU = dQ - dA, \quad (23)$$

де Q – кількість теплоти, Дж; U – внутрішня енергія, Дж; A – робота, Дж.

Внутрішня енергія включає в себе теплоту, підведену до системи і роботу, виконану над системою, тому з врахуванням (22), рівність (23) записується:

$$dU = dQ + fdl. \quad (24)$$

Разом з тим, за законом термодинаміки Больцмана, довільний самостійний процес супроводжується зростанням ентропії:

$$dQ = TdS. \quad (25)$$

Врахувавши (25) в (24), отримується рівність:

$$dU = fdl + TdS. \quad (26)$$

За другим законом термодинаміки внутрішня енергія системи складається з вільної dF та зв'язаної TdS :

$$dU = dF + TdS, \quad (27)$$

з врахуванням цього вираз для зміни вільної енергії системи запишеться:

$$dF = fdl. \quad (28)$$

За сталих об'єму і температури вираз

$$f = \left(\frac{dF}{dl} \right)_{T,V}, \quad (29)$$

розкриває фізичний зміст сили деформації, а саме – вона дорівнює зміні вільної енергії системи, що припадає на одиницю видовження. Отже, з виразу для зміни вільної енергії можна отримати вираз, що характеризує зміну термодинамічних параметрів ПКМ під час деформації:

$$f = \left(\frac{dU}{dl} \right)_{T,V} - T \left(\frac{dS}{dl} \right)_{T,V}, \quad (30)$$

або

$$f = f_U - f_S. \quad (30. a)$$

Таким чином сила, прикладена до тіла з ПКМ спричинює деформацію, яка супроводжується зміною внутрішньої енергії і ентропії. Просторово-зшиті ПКМ з малою частотою зшивок (рідкоічасті) за температур, що є більшими від температури шкловання ($-100^{\circ}\text{C} \div -120^{\circ}\text{C}$), характеризуються напруженнями, що характеризуються тільки зміною ентропії, оскільки $f_U = 0$.

Є очевидним, що за малих деформацій ідеального твердого тіла (кристалу), коли кристалічна структура не порушується, напруження виникають лише за рахунок зміни міжатомних віддалей у кристалічній ґратці, тому для ідеального кристалу $f_S = 0$ (зміна ентропії є рівною нулю).

Правильність висновків процесу деформації ПКМ, зроблених з точки зору термодинаміки, підтверджується супутніми тепловими ефектами, зокрема, якщо сталений стрижень з вантажем, що на ньому висить, нагріти, то стрижень видовжиться. Разом з тим, крім звичайного теплового розширення, проявиться послаблення взаємодії атомів у кристалічній ґратці, і пружність сталі, що утримує зразок, спаде. З ПКМ суть справи є іншою, під час їх деформації вся робота зовнішніх сил перетворюється в теплоту, а ентропія zdeформованого ПКМ спадає.

Явище виділення тепла за умови розтягу ПКМ певним чином пов'язано зі скороченням zdeформованого ПКМ за нагрівання. Якщо зразок миттєво розтягнути, то його температура зросте, але, якщо тримати зразок у розтягнутому стані до охолодження за кімнатної температури і після цього звільнити кінці, то це спричинить охолодження зразка. Отже, виділення теплоти є зворотнім.

Зниження ентропії за умови розтягу ПКМ пояснюється природою еластичної деформації, яка пов'язана з випрямленням зкручених макромолекул, що, в свою чергу, призводить до зменшення кількості можливих конформацій.

За рівнянням Больцмана:

$$S = \left(\frac{R}{N_A} \right) \ln W, \quad (31)$$

де R – універсальна газова стала; N_A – число Авогадро; W – термодинамічна ймовірність стану.

Термодинамічна ймовірність стану визначається числом мікростанів, які відповідають даному макростану. За рівністю (31) зі зменшенням W зменшується ентропія, тобто деформація ПКМ призводить до статистичного менш ймовірного термодинамічного стану, тобто до зменшення ентропії.

Такий підхід дає можливість, застосовуючи метод Монте-Карло, отримати розподіл ймовірних значень змінних величин від яких залежить результат який очікується, тобто за рахунок чого можна отримати, в нашому випадку, підвищення адгезії, підвищення міцнісних характеристик ПКМ, отримати картину про розподіл навантажень, які може витримувати покриття на поверхні елементів бурильної колони в процесі експлуатації в умовах будівництва похило-скерованих та горизонтальних свердловин.

Моделювання за методом Монте-Карло дає можливість бачити які саме вихідні дані мають найбільший вплив на кінцевий результат, оскільки це є важливим для подальшого аналізу результатів, та скеровування напрямку проведення подальших досліджень. Для проведення розрахунків застосовується програма @RISK в Microsoft Excel на базі операційної системи DOS.

Висновки

1. Одним з напрямків підвищення ефективності буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин є застосування полімерно-композиційних матеріалів (ПКМ) для покриття поверхні елементів бурильної колони.

2. Вибір типу ПКМ залежить від гірничо-геологічних властивостей породи, в якій проводиться буріння.

3. Високими антифрикційними властивостями та найменшим значенням коефіцієнта тертя володіє ПКМ на основі Ф-4.

4. Для моделювання фізичних процесів у тілах з полімерно-композиційних матеріалів доцільним є застосування комплексного методу граничних елементів, де розглядається змішана крайова задача для основного рівняння стаціонарного поля, що дає можливість розрахувати міцнісні характеристики матеріалу, та вибрати тип наповнювача ПКМ для покриття поверхні елементів бурильної колони.

5. Процес високоеластичної деформації ПКМ моделюється термодинамічним методом та статистичним методом Монте-Карло теорії ймовірності, що дає можливість оцінити правильність обраного ПКМ, і коригуючи вихідні дані, визначити оптимальні параметри наповнювача.

Рассматривается возможность повышения эффективности подачи нагрузки на долото в забое скважины при бурении наклонно-направленных и горизонтальных стволов и предотвращение прихвата бурильной колонны.

Существование сил трения между бурильной колонной и нижней стенкой ствола наклонной и горизонтальной скважины препятствует подаче максимальной осевой нагрузки на породоразрушающий инструмент. Это существенно влияет на механическую скорость бурения. Для уменьшения сил трения предлагается использование полимерно-композиционных материалов (ПКМ) для покрытия поверхности элементов бурильной колонны. Приводится методика и использование математического моделирования, за счет которых возможно получение ПКМ с определенными физико-механическими свойствами, удовлетворяющими условия эксплуатации бурильной колонны при бурении наклонных и горизонтальных скважин.

Предлагается модель комплексного метода граничных элементов со смешанной краевой задачей для основного уравнения стационарного поля и в качестве контрольной модели предлагается использовать термодинамический подход на базе статистического метода Монте-Карло. Такое сочетание даст возможность оценить физико-механические свойства металлополимерного покрытия и правильно подобрать наполнитель для ПКМ, чтобы полностью удовлетворить требования прочностных характеристик покрытия элементов бурильной колонны и ее поверхности для определенных условий эксплуатации и технологического процесса.

Ключевые слова: *полимерно-композиционные материалы, бурильная колонна, скважина, промывочная жидкость.*

We consider the possibility of improvement of the effectiveness of minimization of axial load on the drilling bit in the conditions of drilling of the directional and horizontal wells and prevention of sidewall sticking.

As a result of friction forces between the drillstring and the low side of directional or horizontal well, minimization of axial load on the rock destruction tool is complicated and it influences the speed of mechanical drilling. The use of polymer composite materials for coating of the surface of the drillstring elements is suggested to decrease friction forces. We describe the technique and mathematical models that enable obtaining of the polymer composite materials with prescribed physical and mechanical properties that would satisfy the drillstring exploitation requirements during drilling of the directional and horizontal wells.

The model of complex method of boundary elements with mixed boundary value problem is proposed for the main level of stationary field and thermodynamical approach based on Monte-Carlo statistics method is proposed as a control model. Such a combination enables evaluation of physical and mechanical properties of metallopolymeric coating and proper selection of the filler for polymer composite materials in order to fully satisfy the requirements set forth to strength characteristics of the coating elements of the drillstring and its surface under existing conditions of exploitation and technological process.

Key words: *polymer composite materials, drillstring, well, washing liquid*

Література

1. Чернова М. Є. Вплив низькочастотних коливань на динаміку бурильної колони. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2013, – Вип. 16. – С.197-201.
2. Стадухин Я. В. Исследования и разработка технологии применения смазочных реагентов для бурения наклонно направленных скважин с горизонтальным окончанием. Технология бурения и освоения скважин. – Тюмень, 2006. – 114 с.
3. Кудрин А. Б. Деформации и напряжения в деталях из ПКМ. – М: Машиностроение, 1987. – 336 с.
4. Гришаева Н. Ю. Прямые и обратные задачи конструирования наполненных полимерных композиций с учетом влияния адгезии на эффективные деформационно-прочностные характеристики. – Томск, 2005. – 126 с.
5. Гудз Р., Петльований А. Комплексний метод граничних елементів при моделюванні фізичних процесів у тілах з композиційних матеріалів // Вісник Львів. ун-ту. Сер. прикл. матем. інформ. – 2003. – Вип. 7. – С. 148–155.

Надійшла 21.07.14

УДК 622.245

Я. В. Кунцяк, докт. техн. наук; **М. Є. Чернова**, канд. техн. наук; **М. Б. Бігун**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ КОЛИВНИХ ПРОЦЕСІВ У ГЕНЕРАТОРІ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ІМПУЛЬСІВ СПРЯМОВАНОЇ ДІЇ

Розглядається механізм утворення коливань гідродинамічних імпульсів в генераторах спрямованої дії, що можуть застосовуватися у компоновці низу бурильної колони під час буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин у нафтогазовій промисловості. Для вибору правильних конструктивних параметрів є необхідним розуміння фізичної суті процесу утворення гідродинамічних імпульсів у потоці рідини, який рухається у камері генератора. Це у свою чергу дає змогу правильно визначити геометричні параметри самої камери, зокрема радіус кривизни, довжину закручування потоку в камері, висоту відкритої частини сопла. Такий підхід до означеної задачі дасть можливість отримувати частоту коливань саме у тому діапазоні, в якому коливні процеси, викликані генератором гідродинамічних імпульсів забезпечать найвищий коефіцієнт корисної дії пристрою. Оскільки коливання можуть збуджуватися в низькочастотному чи у середньо частотному діапазоні, в залежності від поставленої мети, підбір параметрів генератора повинен відповідати тому напрямку застосування, для якого проведено розрахунок у поставленій задачі, адже одні і ті ж генератори гідроакустичних імпульсів, з однаковими геометричними параметрами не можуть експлуатуватися у різних геологічних умовах. Підбір параметрів генератора не може бути спонтанним без відповідних математичних розрахунків, оскільки це може призвести до небажаних наслідків та спричинити аварійну ситуацію у процесі будівництва свердловини і замість очікуваного підвищення ефективності буріння похило скерованої чи горизонтальної ділянки свердловини, сприяти негативним наслідкам. Тому у наведених таблицях подано основні характеристики конструктивних особливостей генератора гідроакустичних імпульсів, а графічні залежності дають можливість проаналізувати зміну