

увати ефекти Жамена, тобто зміну крайового кута при натіканні та відтіканні.

Розрахунки на моделі можна ввести для трьох випадків:

1. Заповнення попередньо вакуумованого зразка. Всі капіляри зразка в кінці процесу заповнені рідиною.

2. Витіснення газу з пористого тіла. Деякі капіляри зразка перекриті бульбашками газу. У зразку залишаються незаповнені рідиною пори.

3. Витіснення рідини рідиною. У процесі витіснення відбувається захоплення рідких фаз на звуженнях/розширеннях капілярів. У зразку є місця, в яких залишилась невитіснена рідина.

Алгоритм і результати розрахунків для створених моделей і порівняння їх з результатами вимірювань для зразків реальних пористих тіл будуть описані в наступних роботах.

1. Гиматудинов Ш.К., Ширковский А.И. Физика нефтяного и газового пласта. М., 1982. 2. Клейнен Дюж. Статистические методы в имитационном моделировании. М., 1978. Вып.1. 3. Чураев Н.В. Физико-химия процессов массопереноса в пористых телах. М., 1990. 4. Jing-Den Chen, Joel Koplik. Immiscible Fluid Displacement in Small Networks // J. Colloid and interface Sci. 1985. Vol.108. N2. 5. Jing-Den Chen. Some Mechanisms of Immiscible Fluid Displacement in Small Networks // J. Colloid and interface Sci. 1986. Vol.110. N2.

УДК 620.179

## ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАФТОГАЗОВОГО ІНСТРУМЕНТУ

© 1997, І.А.Молодецький

НВФ "ЗОНД", м.Івано-Франківськ

*Наведені основні методи, які застосовують для контролю фізико-механічних характеристик труб нафтового сортаменту на нафтогазових промислах, проаналізовані їх переваги і недоліки, а також можливість підвищення достовірності контролю.*

На сучасному етапі розвитку техніки і технології буріння свердловин для забезпечення безаварійності і високої ефективності робіт необхідно знати фізико-механічні властивості бурильного інструменту та бурового обладнання, що експлуатується, а саме, бурильних труб, які повинні володіти високими міцнісними характеристиками.

За один з показників міцності найчастіше вибирають границю текучості  $\sigma_T$ , що характеризує опір металу малим деформаціям і залежно від якої труби нафтового сортаменту умовно класифікують на групи міцності Д, К, Е, Л, М, Р. Визначення приналежності труби до тієї чи іншої групи міцності дає змогу грамотно компоувати бурильну колону і забезпечити її раціональну експлуатацію.

Аналіз науково-технічної та патентно-ліцензійної інформації методів і засобів неруйнівного контролю (НК) дав можливість зробити висновок про те, що контроль груп міцності найбільш ефективно можна проводити з використанням електромагнітного (точніше, вихрострумове) та акустичного видів неруйнівного контролю.

Вихрострумівий метод (ВСМ) НК ґрунтується на аналізі взаємодії зовнішнього електро-

магнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, наведених збуджуючою котушкою в електропровідному об'єкті контролю. Густина вихрових струмів в об'єкті залежить від геометричних і електромагнітних параметрів об'єкта, а також від взаємного розташування вимірювального вихрострумове перетворювача (ВСП). За виглядом зміни в реальному масштабі часу сигналу від давача розрізняють чотири методи контролю вихровими струмами: основної гармоніки, вищих гармонік, перехідних характеристик (імпульсний), багатопараметровий.

Перетворювачем використовують, переважно, індуктивні котушки (одну або декілька). Синусоїдальний (або імпульсний) струм, діючий в котушках ВСП, створює електромагнітне поле, яке збуджує вихрові струми в електропровідному об'єкті. Електромагнітне поле вихрових струмів діє на котушки перетворювача, наводячи в них електрорушійну силу (ЕРС) або змінюючи їх електричний опір. Реєструючи напругу на затискачах котушки або її опір, отримують інформацію про властивості об'єкта і про положення перетворювача відносно нього. Магнітне поле вихрових струмів направлене протилежно до

первинного магнітного поля збуджуючої обмотки, внаслідок чого результуюче поле залежить від електромагнітних властивостей контрольованого матеріалу, а наведена ЕРС у вимірювальній обмотці перетворювача визначається сумарним потокозчепленням і служить інформативним сигналом, що передає інформацію про об'єкт. Але ЕРС вимірювальної обмотки несе інформацію не тільки про вимірювальний параметр контролю, а залежить від різних чинників, таких як: питома електрична провідність  $\gamma$ , магнітна проникність  $\mu$ , стан поверхні, наявність і розміри дефектів, зазори, орієнтація осі перетворювача і швидкість його переміщення відносно контрольованого об'єкта.

На результати контролю істотно впливають геометричні чинники: відстань між давачем і поверхнею контрольованого виробу, їх взаємне розташування, форма і розміри виробу. У деяких випадках вони утруднюють практичне застосування методу, оскільки відхилення розмірів деталей або виробів (наприклад, товщини бурильних труб при експлуатації) можуть спричинити сильнішу зміну параметрів перетворювача, ніж властивості металів (електрична провідність і магнітна проникність), що контролюються. Значить, інформація, яку дає перетворювач, багатопараметрова, що визначає як переваги, так і недоліки ВСМ. З одного боку, ВСМ дають змогу здійснювати багатопараметровий контроль, а з іншого боку, потрібні спеціальні прийоми для розділення інформації про окремі параметри об'єкта. При контролі одного з параметрів вплив інших на сигнал перетворювача стає перешкоджаючим, тому цей вплив необхідно зменшити.

Особливість вихрострумowego контролю в тому, що його можна проводити без контакту перетворювача і об'єкта (що при контролі труб нафтового сортаменту в умовах бурової є досить суттєвим). Їх взаємодія проходить, переважно, на відстанях (від часток міліметра до кількох міліметрів), достатніх для вільного переміщення перетворювача відносно об'єкта. Тому цей метод дає змогу проводити контроль, навіть, при високих швидкостях руху об'єктів.

Отримання первинної інформації у вигляді електричних сигналів, безконтактність і висока продуктивність визначають необмежені можливості автоматизації вихрострумowego контролю. Одна із особливостей ВСМ у тому, що на сигнали перетворювача практично не впливають вологість, тиск і забруднення газового середовища, радіоактивні випромінювання, забрудненість по-

верхні об'єкта контролю непровідними речовинами.

Простота конструкції перетворювача - ще одна перевага ВСМ. У більшості випадків катушки поміщають у запобіжний корпус і заливають компаундами. Завдяки цьому вони стійкі до механічних і атмосферних впливів, можуть працювати в агресивних середовищах у великому інтервалі температур і тисків.

Окрім згаданих вище вихрострумовой метод має ще один суттєвий недолік, пов'язаний з тим, що густина вихрових струмів максимальна на поверхні об'єкта в контурі, діаметр якого близький до діаметра збуджуючої обмотки (у випадку використання накладного ВСП) і зменшується до нуля на осі вихрострумowego перетворювача. Густина вихрових струмів зменшується також і в напрямку збільшення глибини контролю.

Для наближеної оцінки глибини проникнення електромагнітного поля накладного ВСП в об'єкт контролю можна використати формулу глибини проникнення  $\delta(\mu)$  плоскої хвилі

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_a \gamma}}, \quad (1)$$

де  $\omega$  - кругова частота струму збудження ВСП;  $\mu_a$  - абсолютна магнітна проникність, Гн/м;  $\gamma$  - питома електрична провідність матеріалу об'єкта контролю, См/м.

Величина відповідає затуханню напруженості магнітного поля в  $e$  разів порівняно зі значенням напруженості магнітного поля на поверхні об'єкта. Формула (1) дає завишене значення глибини проникнення, яке тим ближче до реального, чим більший узагальнений параметр

$$\beta = R \sqrt{\omega \mu_a \gamma}, \quad (2)$$

де  $R$  - радіус збуджуючої обмотки ВСП.

Коли потрібно визначити  $\delta$  при відомому значенні  $\beta$ , то можна застосувати формулу

$$\delta = (R\sqrt{2})/\beta. \quad (3)$$

Дослідження, проведені з трубами нафтового сортаменту показують, що одним із перешкоджаючих чинників є поверхневий феромагнітний шар труби, електромагнітні властивості якого не постійні, а залежать від технології виготовлення труб. Причому, поверхневий шар типу окалини є малопровідним ( $\mu=5-10$  відносних одиниць,  $\gamma=1$  МСм/м) і утворюється на поверхні виробу при гарячій прокатці. Крім того, існує обезвуглеводнений шар з великою магнітною проникністю і електричною провідністю, які залежать від технології термообробки. Також (через економічну

скруту) існують порушення технологічного процесу термообробки трубних виробів, що впливає на нестабільність зміцнення по товщині (більше на поверхні і зменшується в напрямку внутрішньої стінки).

Хоча вплив вищевказаних причин ускладнення визначення фізико-механічних властивостей намагаються зменшити, повністю ліквідувати їх не вдається. Тому основним недоліком цього методу треба вважати контроль тільки поверхневого шару трубних виробів.

Застосування акустичних засобів контролю фізико-механічних властивостей матеріалів (міцності, твердості, величини зерна, тощо) ґрунтується на зв'язку цих властивостей з акустичними характеристиками металів (швидкостями поширення і коефіцієнтами затухання пружних хвиль, тощо). Затухання, зміна швидкості розповсюдження акустичних коливань в основному залежить від величини зерна, яка впливає на міцнісні характеристики виробу. Збільшення розмірів зерна понижує границю текучості та границю міцності. Отже, визначивши затухання або зміну швидкості розповсюдження акустичних коливань у контрольованому виробі порівняно з еталонним, можна твердити про границю текучості.

Основною перевагою вищевказаних методів акустичного контролю є те, що акустичні коливання, проходячи через всю товщину стінки об'єкта контролю (у даному випадку труби нафтового сортаменту), набувають інтегральної інформації про границю текучості, тоді як при вихрострумовому контролі проводиться вимірювання стільки тільки в поверхневому шарі стінки труби. До переваг акустичних методів контролю належать також:

- велика проникаюча здатність, що дає змогу контролювати крупногабаритні вироби;
- можливість контролю при односторонньому доступі до об'єкта;
- простота і висока продуктивність контролю.

До недоліків акустичних методів відноситься необхідність розробки спеціальних методик контролю різних типів нафтогазового обладнання та інструменту та необхідність порівняно високої чистоти обробки поверхні контрольованих виробів.

Послаблення амплітуди і інтенсивності плоскої хвилі, що поширюється в середовищі, визначається затуханням. Це послаблення проходить за законом

$$A = A_0 e^{-\delta x}; \quad j = j_0 e^{-2\delta x}, \quad (4)$$

де  $\delta$  - коефіцієнт затухання,  $m^{-1}$  (визначається відстанню (довжиною шляху), на якому амплітуда плоскої хвилі зменшується в  $e=2,718$  разів). Інколи затухання характеризують параметром  $N_\alpha$  (числом від'ємних децибелів), на яке зменшується амплітуда сигналу на відрізку шляху завдовжки  $1m$ :

$$N_\alpha = 8,686 \delta. \quad (5)$$

Коефіцієнт затухання складається з коефіцієнтів поглинання і розсіювання

$$\delta = \alpha_n + \alpha_p. \quad (6)$$

При поглинанні звукова енергія переходить у теплову, а при розсіюванні залишається звуковою, але виходить із напрямлено поширюваної хвилі внаслідок відбивань від неоднорідностей середовища.

У твердих тілах для поздовжніх і поперечних хвиль коефіцієнти затухання різні. Більшість твердих тіл складається з великої кількості зерен-кристалітів, на границях яких проходить розсіювання акустичних хвиль.

Метали, які застосовують на практиці, мають полікристалічну будову, тому в них, переважно, істотним є розсіювання, пов'язане з пружною анізотропією. Це явище заключається в тому, що в кристалах значення модулів пружності (а отже, і швидкостей звуку) залежать від напрямку відносно осей симетрії кристала.

Великий вплив на значення коефіцієнта розсіювання в металах має співвідношення середнього діаметра зерна  $D$  і довжини хвилі  $\lambda$ . При  $\lambda \ll D$  затухання визначається в основному поглинанням. Особливо велике розсіювання при  $\lambda \approx D$ , причому в інтервалі  $\lambda = (3...4)D$  розсіювання максимальне.

В області  $4 \leq \lambda/D \leq 10$  розсіювання пропорційне  $Df^2$ , де  $f$  - частота коливань. При  $\lambda > 10 D$  коефіцієнт затухання визначається формулою

$$\delta = c_1 f + c_2 f^4 D^3, \quad (7)$$

де  $c_1$  і  $c_2$  - константи.

Перший член правої частини рівняння зумовлений поглинанням (пружним гістерезисом), а другий - релєєвським розсіюванням. У матеріалах із великою різнозернистістю другий член може бути пропорційним до кубу і навіть до квадрату частоти. Так, у сталях із перлітною структурою  $N_\alpha \approx 100(\Delta/\lambda)^3$ , а в сталях з проміжною структурою  $N_\alpha \approx 35(D/\lambda)^3$ .

Найбільший вплив величини зерна на коефіцієнт затухання акустичних коливань спостерігається при  $5 \leq \lambda/D \leq 15$ , де  $\lambda$  - довжина хвилі акустичних коливань;  $D$  - середній діаметр зерна.

Розподіл величини затухання, отриманий при контролі виробу в різних точках, підпорядковується логарифмічно-нормальному закону і характеризує параметри розподілу величин зерен металу, який досліджується.

Для вимірювання коефіцієнта затухання найширше застосування отримав імпульсний (луно або тіньовий) метод, який ґрунтується на порівнянні амплітуд акустичних сигналів і його застосовують в імерсійному та контактному варіантах. Структуру металу оцінюють порівнянням даних, отриманих на виробі, що контролюється, і на зразках із відомою середньою величиною зерна.

Існуючі технічні засоби визначення фізико-механічних характеристик металів, що реалізують акустичний метод контролю, не задовольняють специфічні особливості контролю нафтогазового інструменту та обладнання. Так, прилади "УС-12ИМ", "УС-13ИМ" та "КРИСТАЛ-6" призначені для контролю контактним способом і за конструктивними особливостями їх не можна використовувати для безперервного сканування. Крім того, вищепераховані прилади призначені для лабораторних умов контролю і не придатні для використання їх в польових умовах.

У зв'язку з цим досить актуальною є розробка приладу для визначення границі текучості труб нафтового сортаменту, робота якого ґрунтувалася на акустичному методі контролю і

який би забезпечив вимірювання ст при безперервному скануванні в польових умовах.

Як приклад акустичного приладу, який використовує принцип безперервного сканування, можна назвати луно-імпульсний товщиномір типу ПТУ-1, ПТУ-2 (Патент РФ N 1652818, опубл. 30.01.1991, Б.И. N 20).

Інформативним параметром служить часовий інтервал між луно-імпульсом, відбитим від зовнішньої поверхні труби та луно-імпульсом, від її внутрішньої стінки. Оскільки швидкість розповсюдження акустичних коливань пов'язана з часом їх розповсюдження формулою

$$v = H/t, \quad (8)$$

де  $H$  - товщина стінки труби,  $t$  - час розповсюдження, то, визначивши часовий інтервал, ми визначимо й швидкість (а отже, і границю текучості) при напередвідомій товщині  $H$ .

Через те, що товщина стінок труб нафтового сортаменту, переважно, не постійна за довжиною та окружністю, час проходження акустичних коливань змінюватиметься, що своєю чергою вплине на точність визначення границі текучості. Тому розробку приладу потрібно проводити з урахуванням даного перешкоджаючого чинника з метою його компенсації.

1. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К., Бершанский Л.И., Костецкая Н.Б., Лешко В.А., Сагач М.Ф. Поверхностная прочность при трещи / Под общ. ред. Б.И.Костецкого. К., 1976. 2. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. - 3-е изд., перераб. и доп. М., 1990. 3. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник. В 2-х кн. Кн.2. / Под ред. В.В.Клюева. 2-е изд., перераб. и доп. М., 1986.