

5. Проведено експериментальну оцінку розроблених способів, яка дозволила уточнити параметри контролю, дослідити характер залежності між інформативними параметрами та характеристиками пошкоджень, оцінити адекватність математичної моделі, встановити особливості реалізації та інтерпретації результатів контролю. Встановлено залежність швидкості поширення поздовжньої ультразвукової хвилі в матеріалі сталених обсадних труб від температури, в результаті чого було визначено температурний коефіцієнт швидкості мінус 0,93 м/(с·°C). Отримана залежність $c(T) = 5984 - 0,93T$ використовується для корегування результатів вимірювання товщини стінки труб обсадної колони, що дозволяє зменшити систематичну похибку вимірювання (на 2,25 % при температурі +150 °C). Досліджено вплив експлуатаційних факторів на затухання поздовжніх ультразвукових хвиль у воді та сталі, результати чого використані при розробці системи автоматичного часового регулювання чутливості акустичного тракту.

6. Розроблено підходи до проектування та виготовлено спеціалізовані п'єзоелектричні перетворювачі, які можна використовувати для тривалої роботи в імерсійному варіанті контролю в умовах свердловини.

Розроблено, виготовлено та проведено дослідні випробування в промислових умовах експериментального зразка інформаційно-вимірювального комплексу для контролю геометричних параметрів труб обсадної колони, за результатами якого можна оцінити її фактичний технічний стан.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу та науково-виробничій фірмі "Зонд".

Захист відбувся 9 липня 2004 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.03 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу

Науковий керівник: докт. техн. наук, проф. Карпаш О.М.

Офіційні опоненти: докт. техн. наук, проф. Семенцов Г.Н., канд. техн. наук Рибачук В.Г.

Провідна установа: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ.

УДК 622.245+620.179

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ТРУБНИХ КОЛОН

© Карпаш О.М.

проректор з наукової роботи Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу
(на час захисту – директор НВФ "Зонд")

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.07 – машини і агрегати нафтової і газової промисловості

Захищається 96 наукових праць (з них 32 винаходи), що містять теоретичні дослідження та розробку методів підвищення роботоздатності трубних колон. Запропоновані й досліджені нові інформаційні ознаки якості різьбових з'єднань і способи вимірювання їх параметрів з використанням акустичних (ультразвукових) методів контролю. Досліджені закономірності розвитку корозійно-втомних тріщин у тілі бурильних труб і запропоновані способи їх виявлення. Результати теоретичних та експериментальних досліджень стали основою для технічного, методичного й організаційного забезпечення роботи служб неруйнівного контролю в нафтогазовій галузі.

Однією з найважливіших економічних проблем України є збільшення обсягів та темпів спорудження нафтових і газових свердловин при їх оптимальній собівартості та виконанні вимог екологічної безпеки. Оскільки головним чинником, що визначає вар-

тість, продуктивність та безпеку будь-якої нафтової чи газової свердловини, є трубні колони, то важливість і актуальність проблеми забезпечення їх працездатності до відпрацювання повного ресурсу стає цілком очевидною.

Серед причин незадовільного стану забезпечення експлуатаційної надійності трубних колон є відсутність:

- загального методологічного підходу до оцінки якості елементів трубних колон у різні періоди їх експлуатації,

- науково обґрунтованих даних про причини пошкоджень різьбових з'єднань трубних колон, особливо нових конструкцій, та

- недосконалість, а в більшості випадків - і відсутність об'єктивних критеріїв оцінки якості різьбових з'єднань.

Суттєвого удосконалення також вимагають засоби та технології неруйнівного контролю якості трубних елементів та система їх застосування на промислах.

Аналіз аварійності, проведений багатьма дослідниками в 1960-1975 рр., показав, що близько 85% аварій з бурильними трубами викликано їх корозійно-втомним руйнуванням, причому до 60% припадає на поломки різьбових з'єднань. Це посприяло розробці та широкому впровадженню у виробництво нових типів труб, конструкції різьбових з'єднань яких, при дотриманні технології їх експлуатації, практично виключають можливість поломок по різьби.

Одним із найефективніших способів попередження відмов трубних колон (забезпечення працездатності їх елементів в процесі експлуатації) є перевірка їх фізичного стану методами неруйнівного контролю та технічної діагностики з наступним вилученням дефектних елементів з трубною колоною. Аналіз методів та засобів неруйнівного контролю трубних колон, що застосовуються в Україні та за кордоном, показав, що вони знайшли широке застосування в нафтовій промисловості, і по цьому напрямку в останній час опубліковано багато робіт вітчизняних та зарубіжних дослідників. Найбільш відомі роботи А.К.Гурвіча, І.М.Єрмолова, М.П. Альошина, В.О. Троїцького, П.Я. Криничного, В.І. Михайленка, Л.А. Баштаннікова та інших. Більшість робіт присвячена розробці методів і засобів ультразвукової дефектоскопії різьбових з'єднань сталених бурильних труб за ГОСТ 631-75 і товщинометрії труб.

Однак ні широке впровадження нових типів труб (бурильні - ПК, ВК, ПВ, обсадні - ОТГГ, ОТТМ, ТБО, насосно-компресорні - НКМ, НКБ, конструкція різьбових з'єднань яких практично виключає можливість поломок), ні застосування методів неруйнівного контролю для перевірки стану трубних колон практично не вплинуло на загальну кількість відмов та їх розподіл за видами.

Очевидно, що на сучасному етапі розробки нафтових та газових родовищ необхідні нові підходи

до контролю фізичного стану трубних колон. Основний зміст цих підходів полягає у визначенні параметрів, що відповідають за експлуатаційну надійність трубною колоною (зокрема, невідповідність яких встановленим нормам приведе до виникнення дефектів типу порушення суцільності металу або втрати несучої здатності конструкції), а також розробці методів і способів їх вимірювання, реєстрації та оцінки їх потенційної небезпеки.

Однією із умов забезпечення працездатності різьбових з'єднань є можливість контролю (оцінки) якості процесу згвинчування, а також їх експлуатаційних характеристик (міцності та герметичності) після згвинчування та на різних стадіях експлуатації при дії всього спектру навантажень. При цьому також необхідно враховувати відхилення конструктивних та експлуатаційних параметрів від номінальних значень, які є немінучими і, як правило, мають випадковий характер.

Традиційні методи контролю якості різьбових з'єднань (по крутному моменту згвинчування, по натягу за допомогою калібрів, шляхом вимірювання числа обертів, тензометрування та методом фотопружності) не задовольняють вимог, що ставляться до різьбових з'єднань труб нових конструкцій. Названим методам присутні суттєві недоліки, які в більшій чи меншій мірі властиві кожному з них, а саме:

- вони базуються на вимірюванні параметрів, які безпосередньо не пов'язані із фактичним фізичним станом спряжених поверхонь різьбового з'єднання;

- вони мають невисоку (50 % і більше) точність вимірювань, тоді як спеціалісти фірм "Везерфорд" та "Валурек" стверджують, що недозгвинчування різьбового з'єднання типу ВМ навіть на 0,1 оберту (2%) призводить до розгерметизації з'єднання;

- контроль цими методами, як правило, можливий тільки в процесі згвинчування з'єднань.

При дослідженні нових підходів до контролю якості різьбових з'єднань нових конструкцій необхідно звернути особливу увагу на таку їх особливість: після згвинчування з натягом різьбові з'єднання перебувають в напружено-деформованому стані, а їх якість (значення експлуатаційних характеристик) визначається наявністю в елементах різьби певної величини радіальних деформацій.

У результаті аналізу процесів, що відбуваються при згвинчуванні різьбових з'єднань, було запропоновано для оцінки якості процесу згвинчування використовувати особливості діаграми деформування (залежності зміни величини деформації від прикладеного навантаження). Відомо, що при збільшенні крутного моменту і досягненні границі пропорційності в матеріалі муфти виникають напруження,

значення яких близькі до границі текучості (загальноприйнята умова ефективності різьбових з'єднань). При цьому, залежно від фізико-механічних властивостей матеріалу, на діаграмі деформування виникає так звана "площадка текучості" або змінюється коефіцієнт пропорційності залежності.

За відомими виразами було визначено величину радіальних напружень, що виникають в різьбових з'єднаннях трубних колон різного призначення. Аналіз одержаних результатів показав, що, на відміну від крутного моменту згинчування, відхилення значень радіальних напружень для певного типу з'єднань не перевищують 10%. Таким чином, момент досягнення в різьбовому з'єднанні напружень, величина яких близька до границі текучості, можна взяти за інформаційну ознаку якості різьбових з'єднань при їх згинчуванні, а рівень радіальних деформацій, напружень та їх розподіл в спряжених елементах - після згинчування та в процесі експлуатації.

Згідно з сучасними уявленнями, контактування твердих тіл проходить дискретно, по виступах мікронерівностей, внаслідок чого утворюються плями дотику. Ці плями дотику формують так звану "фактичну площу дотику" (ФПД), яка при прикладенні навантаження збільшується. Однак, як встановлено зарубіжними та вітчизняними дослідниками, при певних значеннях навантажень ріст кількості та розмірів плям дотику припиняється. Ця властивість контактування твердих тіл може бути також прийнята за інформаційну ознаку якості різьбового з'єднання.

Наступним кроком у вирішенні поставленої проблеми є пошук надійних та достатньо точних методів вимірювання параметрів, що характеризують якість різьбового з'єднання за запропонованими інформаційними ознаками. Аналіз методів контролю показав, що єдиним теоретично можливим і перспективним є акустичний (ультразвуковий) метод неруйнівного контролю. Його переваги - в оперативності, можливості отримання інтегральної оцінки по всьому з'єднанню, а також у достатній забезпеченості нафтогазової галузі необхідними технічними засобами. Підставою для використання акустичних методів при контролі якості різьбових з'єднань є однозначний взаємозв'язок між параметрами згаданих методів та характеристиками фізичного стану (контактний тиск, ФПД) різьбового з'єднання. Однак під час розробки засобів та технологій контролю якості різьбових з'єднань акустичним методом при розрахунку акустичних трактів спеціалісти зіткнулися з фактом розбіжності результатів теоретичних розрахунків ходу променів ультразвукових коливань (УЗК) з даними їх експериментальної перевірки, причому згадана розбіжність є неоднозначною як для різних типів з'єднань, так і для однотипних.

Аналіз даної ситуації показав, що причиною цього є так звані "нелінійні ефекти", які виникають в напружено-деформованому твердому тілі.

Над проблемою дослідження напруженого стану, що виникає в околі різьбового з'єднання трубної колони, зібраного з натягом, працювало багато відомих вчених. Так, С.Ф. Білик провів детальне дослідження напруженого стану труби під дією внутрішніх і зовнішніх тисків - як на основі розв'язку задачі Ламе, так і на основі розв'язку задачі загальної теорії деформування осесиметричних оболонок. Аналогічні роботи проводились Т.Є.Єрьоменко, В.В.Кравцем, П.А.Віслобощим та іншими. У результаті проведених досліджень знайдені закономірності для вибору оптимальних конструкцій різьбових з'єднань, профілів різьби та ін.

У цій роботі дослідження напруженого стану в околі різьбового з'єднання виконане на основі оригінального розв'язку, побудованого накладанням двох розв'язків задачі Ламе - для внутрішньої і зовнішньої частин різьбового з'єднання. При такому підході, використовуючи граничну умову, яка враховує деякий радіальний натяг δ , на радіусі різьбового з'єднання, вдається одержати потрібний розв'язок, який характеризує напружено-деформований стан (НДС) у системі „внутрішня - зовнішня частини з'єднання” залежно від величини радіального натягу δ_r .

Симетричний відносно осі розподіл напружень у порожнистих циліндрах, які моделюють внутрішню і зовнішню частини різьбового з'єднання, для випадку плоскої деформації, що задовольняє рівнянням рівноваги плоскої задачі теорії пружності в полярній системі координат r, φ , має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{2\sigma_{r\varphi}}{r} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Розв'язок цієї системи рівнянь (1) для внутрішнього циліндра можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^I &= \frac{A_1}{r^2} + 2C_1, \quad \sigma_{\varphi\varphi}^I = -\frac{A_1}{r^2} + 2C_1; \\ U_r^I &= \frac{-\frac{A_1}{r} + 2C_1 \cdot (1 - 2\nu_1) \cdot r}{2\mu_1}, \end{aligned} \quad (2)$$

а для зовнішнього циліндра - у вигляді:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^{II} &= \frac{A_2}{r^2} + 2C_2, \quad \sigma_{\varphi\varphi}^{II} = -\frac{A_2}{r^2} + 2C_2, \\ U_r^{II} &= \frac{-\frac{A_2}{r} + 2C_2 \cdot (1 - 2\nu_2) \cdot r}{2\mu_2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Якщо граничні умови прийняти як співвідношення на радіусах з'єднуваних циліндрів

$$\begin{aligned} \sigma_{\pi}^I &= 0, & \sigma_{\pi}^{II} &= 0, \\ \sigma_{\pi}^I &|_{r=r_1} &= \sigma_{\pi}^{II} &|_{r=r_3} \\ U_r^I + \delta_r &|_{r=r_2} &= U_r^{II} &|_{r=r_2} \end{aligned} \quad (4)$$

(тут r – поточне значення радіуса, r_1, r_2 , - відповідно внутрішні радіуси внутрішнього та зовнішнього циліндрів, r_3 - зовнішній радіус зовнішнього циліндра), то можна визначити чотири невідомі константи A_1, C_1, A_2, C_2 :

$$A_1 = 2 \cdot \delta_r \cdot \left(\frac{1/r_2 + r_2/r_1^2 \cdot (1-2\nu_1)}{\mu_1} + \frac{r^*/r_2 + (r_2 \cdot r^* \cdot (1-2\nu_2))/r}{\mu_2} \right);$$

$$C_1 = \frac{A_1}{2 \cdot r_1^2}; \quad A_2 = -A_1 \cdot r^*; \quad C_2 = \frac{A_2 \cdot r^*}{2 \cdot r_3^2}, \quad (4)$$

де $r^* = \frac{1/r_1^2 - 1/r_2^2}{1/r_2^2 - 1/r_3^2}$. (5)

Проведені дослідження напружено-деформованого стану в зоні різьбового з'єднання дали можливість запропонувати ще один метод контролю якості різьбових з'єднань. Очевидно, що найбільш зручним параметром для контролю в розглянутій моделі, яка встановлює взаємозв'язок між геометричними розмірами різьбового з'єднання, величиною натягу та виникаючими напруженнями й переміщеннями, є зміна зовнішнього діаметру муфти ΔD_3 різьбового з'єднання, яку можна виразити через радіальне переміщення U_r наступним чином:

$$\Delta D_3 = 2 U_r^I, \quad = 2 A_1 \cdot r^* \cdot (1-\nu)/\mu_2/r_3, \quad |_{r=r_3} \quad (6)$$

З урахуванням одержаної залежності були проведені розрахунки зміни зовнішнього діаметру для 22 типорозмірів різьбових з'єднань при зміні діаметрального натягу від 0,1 до 0,7 мм. Розрахунки проводились як для радіуса, середнього по різьбовій ділянці, так і для радіуса, середнього по стабілізуючому пояску. При більшому або меншому натязі, в межах застосування лінійної теорії пружності, величина ΔD_3 змінюється пропорційно величині діаметрального натягу і становить в середньому від 1,2 до 1,6% від діаметру з'єднання.

Під час виконання роботи було досліджено особливості поширення високочастотних (ультразвукових) пружних хвиль в середовищах з неоднорідними попередніми напруженнями. Вирішення цього має суттєве значення для розвитку методів акустичного контролю взагалі і, зокрема, для однієї з

центральної проблем даної роботи - контролю якості різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту. Для його розв'язку використано й розвинуто підхід, показаний у роботах В.В.Зароченцева, С.М. Орла, Ю.С. Степанчука, де одержане рівняння поширення пружних хвиль у неоднорідно деформованих кристалах та розглянута задача про поширення плоскої хвилі у неоднорідно деформованому стержні. Це посприяло розробці нових способів контролю трубних колон акустичними методами та визначенню їх основних параметрів, у тому числі способу контролю якості процесу згвинчування різьбових з'єднань (рис. 1).

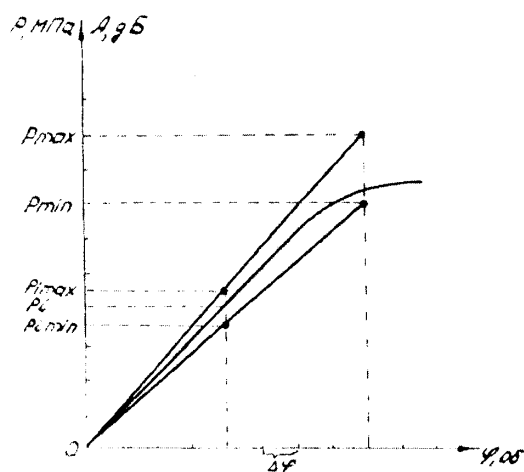
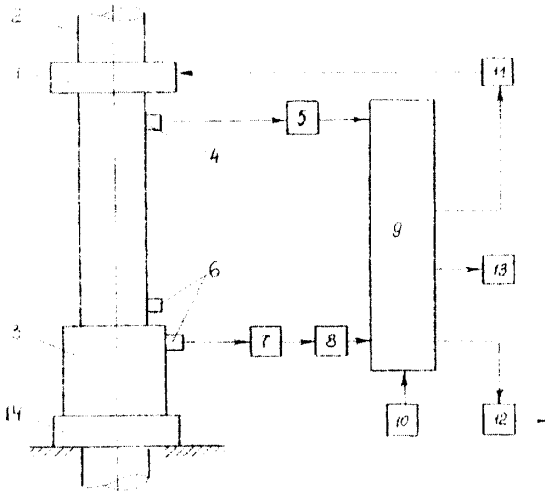


Рис. 1. Схема контролю якості процесу згвинчування різьбового з'єднання

Його суть полягає в тому, що в процесі згвинчування одночасно вимірюють контактний тиск (акустичним методом) та визначають знак похідної $dP/d\phi$. Вимірювання проводять дискретно, з певним кроком, наприклад, $\Delta\phi=0,1$ оберту. Якість процесу згвинчування оцінюють по відхиленню виміряного значення контактного тиску від номінального та по величині і знаку похідної $dP/d\phi$. При цьому якість процесу згвинчування є задовільною, якщо поточне значення контактного тиску P_i знаходиться в діапазоні $P_{i\min} < P_i < P_{i\max}$, а похідна $dP_i/d\phi_i > 0$. Процес згвинчування вважають закінченим, а з'єднання - якісним, якщо значення похідної $dP_i/d\phi_i = 0$ або $dP_i/d\phi_i < A$ на протязі часу $t = n\Delta\phi$, а значення P_i знаходяться в границях допуску (тут A та n - коефіцієнти, що визначаються для кожного типу з'єднань). Блок-схема реалізації способу показана на рис. 2.

При розробці нафтових і газових родовищ широке застосування знайшли нові конструкції різьбових з'єднань, особливість яких полягає в використанні різьби трапецієвидного профілю та стабілізуючих (ущільнюючих) поясків.

Це бурильні труби ВК за ГОСТ 631-75, обсадні ОТГГ-1, ТБО-4, ТБО-5 за ГОСТ 632-80, насосно-компресорні НКМ за ГОСТ 633-80. Міцність та герметичність таких з'єднань забезпечується досягненням певних нормованих (у діапазоні від 0.3 мм до 0.7 мм) значень діаметрального натягу по різьбі та стабілізуючому пояску. Було розроблено та досліджено декілька способів контролю величини діаметрального натягу акустичним методом. Найбільш ефективним є спосіб багатократного відбиття променів УЗК від поверхні спряження. За допомогою цього способу можна визначити як середнє значення діаметрального натягу з'єднання, так і відхилення його значень від нормованих на окремих ділянках.



1-пристрій для створення крутного моменту;
2-труба; 3-муфта; 4-датчик кута повороту;
5-лічильник обертів; 6 - н'єзоперетворювачі;
7 - ультразвуковий прилад; 8 - функціональний перетворювач; 9 - обчислювальний блок; 10 - пристрій ручного вводу; 11 - виконавчий механізм;
12 - реєструючий пристрій; 13 - світлове табло;
14 - спайдер

Рис. 2. Блок - схема установки контролю якості згинчування різьбових з'єднань

До різьбових з'єднань трубних колон окрім вимог міцності ставляться також вимоги щодо герметичності, а саме - непроникності зони контакту труби з муфтою для рідин та газів, що знаходяться під тиском. Тому дослідження і забезпечення герметичності в першу чергу пов'язане з оцінкою характеру контакту всіх елементів різьбового з'єднання (витків різьби, упорних торців, ущільнюючих поясків і т.п.). Розроблено декілька способів оцінки герметичності різьбового з'єднання шляхом визначення фактичної площі дотику по спряжених поверхнях, в тому числі:

- спосіб одночасного вимірювання і порівнювання амплітуд УЗК, відбитих від протилежних (суміжних) граней витків різьби;

- спосіб вимірювання амплітуд УЗК, що пройшли через зону спряження або відбилися від неї.

Для врахування дії силових та температурних факторів, які призводять до релаксації контактного тиску в різьбовому з'єднанні, було запропоновано здійснювати контроль якості з'єднань принаймні двічі: вперше - безпосередньо після згинчування, а вдруге - через певний час напрацювання. По зміні та перерозподілу контактних тисків на спряжених поверхнях, обумовленим впливом експлуатаційних факторів, можна за відомими залежностями вираховувати залишковий ресурс з'єднання для конкретних умов експлуатації.

Важливим питанням при проведенні контролю в польових умовах є зменшення впливу зовнішніх чинників (температури навколишнього середовища, стану зовнішньої поверхні контролюваної труби та ін.) на результати контролю. Як один із шляхів вирішення цього завдання, було запропоновано та досліджено спосіб акустичного контролю, при якому для одержання інформації використовуються обидві випромінюючі сторони п'єзoeлементу. Це дозволяє проводити оцінку якості виробу не за абсолютною величиною амплітуди луна-імпульсу, відбитого від дефекту, а шляхом порівняння її з амплітудою опорного луна-імпульсу. Реалізація такого способу також дає можливість постійно контролювати якість акустичного контакту і з більшою точністю визначити місце розташування дефекту та його розміри.

Також було запропоновано та досліджено способи стабілізації кута вводу УЗК при коливаннях температури оточуючого середовища та контролюваного виробу, що особливо важливо при проведенні контролю труб в польових умовах. Найбільш ефективним і простим в реалізації є спосіб стабілізації кута вводу α ультразвукових коливань шляхом зміни кута нахилу призми β . При цьому закон зміни кута нахилу призми β (рівняння термостабільності) описується виразом:

$$\theta = \pm \arcsin \left\{ \frac{\sin \alpha \left(\frac{C_k}{C_e} \right) - \sin \beta \left(\frac{C_k}{C_{np}} \right)}{\sqrt{1 - \left[\sin \beta \left(\frac{C_k}{C_{np}} \right) \right]^2}} \right\}, \quad (19)$$

де θ - кут призми, градуси; C_k , C_e , C_{np} - відповідно швидкості поширення УЗК у контактній рідині, контролюваному виробі та призмі ПЕП.

Достовірність результатів при контролі якості різьбового з'єднання в значній мірі залежить від точності оцінки амплітуди ультразвукового сигналу.

Оскільки об'єкт контролю, як було показано раніше, знаходиться під впливом внутрішніх та зовнішніх факторів, то в інформаційно-вимірювальних системах виникають спотворення і неконтрольовані затримки вимірювальних сигналів.

На підставі аналізу результатів експериментальних досліджень процесів згвинчування труб на спеціальному стенді РСТ для розгвинчування та згвинчування турбобурів було встановлено, що амплітуда ультразвукового сигналу має випадковий характер, тобто є випадковою функцією кількості обертів або просторової координати, і її розподіл практично співпадає з нормальним (Гаусовим) законом розподілу.

Аналіз частотних діапазонів зовнішніх збурюючих впливів і корисного сигналу показує, що ці діапазони перекриваються. Тому з метою підвищення точності оцінки амплітуди ультразвукового сигналу при визначенні контактного тиску в різьбових з'єднаннях показана доцільність використання саме цифрової обробки сигналів із застосуванням оптимальних алгоритмів.

Одержаний алгоритм з використанням фільтра Калмана має оптимальну структуру в розумінні мінімуму середньої квадратичної помилки оцінки амплітуди ультразвукового сигналу. Експериментальна перевірка запропонованого фільтра показала, що оптимальні оцінки амплітуд значно відрізняються від експериментальних значень, а тому висновки про якість згвинчування труб, що зроблені на основі невідкоректованих експериментальних даних, можуть бути помилковими.

Під час виконання роботи було проведено ряд експериментальних досліджень, зокрема:

- промислові та стендові випробування контрольних комплектів труб для визначення впливу величини діаметрального натягу на експлуатаційні характеристики різьбових з'єднань;

- лабораторні випробування з визначення спрямованості фронту поширення втомних тріщин у тілі труб та встановлення характеру залежностей між ступенем навантаженості з'єднання та його акустичними властивостями;

- промислові, стендові та лабораторні випробування з визначення оптимальних параметрів способів акустичного контролю.

Для одержання достовірних результатів усі експериментальні дослідження проводили на натурних зразках труб нафтового сортаменту - нових і таких, що були в експлуатації. Зокрема, експерименти проводились на з'єднаннях бурильних труб ВК групи міцності Л1 (тип 3 за ГОСТ 631-75) діаметром 140 мм з товщиною стінки 11 мм (цей типорозмір труб широко використовується при бурінні нафтових та газових свердловин) та з'єднаннях сталених

обсадних труб (ГОСТ 632-80) групи міцності Д діаметром 146, 168 та 245 мм з товщиною стінки відповідно 7,0, 7,3 та 8,1 мм. Основні технічні характеристики зразків (діаметр, товщина стінки, овальність, параметри різьби, стабілізуючого пояска тощо) відповідали вимогам згаданих стандартів. Попередньо зразки були перевірені на наявність прихованих дефектів заводського та експлуатаційного походження акустичним (дефектоскоп УД2-12) та магнітним (дефектоскоп ПМД-77) методами. Обробка результатів експериментальних досліджень здійснювалась методами математичної статистики, тому число даних, які підлягають статистичній обробці (об'єм вибірки), має відтворювати деяку генеральну (теоретичну) сукупність з задовільним наближенням. Для проведених досліджень достатнім можна вважати об'єм вибірки $n > 30$.

Проведені промислові дослідження підтвердили висунуте припущення, що однією з основних причин руйнування різьбових з'єднань труб з стабілізуючими (ущільнюючими) поясками є незабезпечення нормованого значення діаметрального натягу в з'єднанні.

У процесі стендових досліджень було встановлено, що корозійно-втомні тріщини в тілі бурильних труб розвиваються як із зовнішньої, так і з внутрішньої поверхонь труби, і кут їх нахилу відносно перпендикуляра до твірної труби на глибині 1,5 мм становить $(22 \pm 5)^\circ$ при довірчій вірогідності $P = 0,95$.

Одержані результати підтвердили можливість використання нових інформаційних ознак оцінки якості різьбових з'єднань: рівня та розподілу напружень (деформацій) в тілі замка (муфти); фактичної площі дотику в елементах різьбового з'єднання; контактної тиску в різьбових з'єднаннях.

Дані проведених експериментальних досліджень також дали можливість встановити взаємозв'язок між характеристиками, що визначають якість різьбових з'єднань, та параметрами (амплітуда та швидкість поширення УЗК) акустичного методу їх контролю. Показано, що напружено-деформований стан в залежності від рівня напружень в муфті (замку) з'єднання викликає зміну (до 7°) траєкторії поширення центрального променя пучка УЗК, що необхідно враховувати при визначенні параметрів способів акустичного контролю якості різьбових з'єднань. Крім того, встановлено, що похибка акустичного методу контролю якості різьбових з'єднань за новими інформаційними ознаками не перевищує 8%.

Також було підтверджено, що застосування фокусуючих п'єзоперетворювачів для контролю труб нафтового сортаменту дозволяє підвищити чутливість контролю на 12 - 20 дБ.

Показано можливість підвищення точності вимірювання контактних тисків в різьбових з'єднаннях акустичним методом за рахунок застосування обчислювальної процедури оптимальної фільтрації Калмана.

Результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень послужили науковою основою для технічного, методичного та організаційного забезпечення роботи служб неруйнівного контролю підприємств Держнафтогазпрому України, Російського акціонерного товариства (РАТ) "Газпром", об'єднання "Зарубежнефестрой" (Росія) та інших відомств.

Для технічного забезпечення служб неруйнівного контролю нафтогазової галузі розроблені, здані приймальним комісіям (одержано дозвіл на серійний випуск) технічні засоби, призначені для комплексного неруйнівного контролю трубних колон. Ці засоби дозволяють проводити дефектоскопію різьбових з'єднань всіх конструкцій труб; дефектоскопію та товщинометрію гладкої частини труб; технічну діагностику (контроль міцності та герметичності) різьбових з'єднань різних конструкцій; контроль груп міцності бурильних та насосно-компресорних труб. В залежності від умов експлуатації технічні засоби конструктивно виконані як стаціонарні (установка УКНТ-1, комплекс "Ремонт-1"), пересувні (лабораторії ПЛНК-1, ПЛНК-2), переносні (установки "Зонд-3", "Зонд-4", "Зонд-6", "Контакт-1", УКС-1, ОБТ-1), окремі прилади та засоби (ПТУ-1, БЗУ-1, "Гном" та ін.).

З метою методичного забезпечення розроблені, затверджені та впроваджені нормативні документи: РД 51-01-15-86 "Інструкція по проведенню неразрушающего контролю труб нефтяного сортамента в условиях глубокого наклонно-направленного бурения", ГСТУ 320.02829777.002-95 "Інструкція по проведенню неруйнівного контролю нарізних труб нафтового сортаменту в процесі їх експлуатації". У цих документах регламентовані: браковочні критерії по кожному об'єкту контролю; методи і обладнання для контролю; методики контролю всіх типів труб, що знаходяться в експлуатації; періодичність неруйнівного контролю; методи ідентифікації проконтрольованих виробів; алгоритм дії персоналу після проведення контролю.

Для підвищення ефективності використання засобів неруйнівного контролю, тобто недопущення аварій при мінімумі економічних витрат, розроблена методика розрахунку оптимальної періодичності неруйнівного контролю ділянок бурильних колон на основі кінетостатичних діаграм втоми. Такий підхід дозволяє враховувати розсіювання довговічності та зниження границі втоми, визначати залишковий ресурс і проводити сумування пошкоджень.

Для вирішення питань організаційного забезпечення розроблені, затверджені та впроваджені нормативні керівні документи, що стосуються організації роботи служб неруйнівного контролю: РД 51-01-24-85 "Типовое положение о службе неразрушающего контроля бурового предприятия в системе Министерства газовой промышленности" та ГСТУ 320.02829777.001-95 "Положення про службу неруйнівного контролю в нафтовій і газовій галузях". Ці документи регламентують завдання, функції й основні засади діяльності служб неруйнівного контролю, їх структуру і вимоги до кваліфікації персоналу.

Теоретична і практична цінність досліджень полягає в розвитку нового напрямку в розробці методів та засобів оцінки фактичного фізичного стану трубних колон на протязі всього періоду їх експлуатації, суть якого - виявлення в елементах трубних колон не тільки дефектів типу порушення суцільності (тріщини, промиви і т. п.), але й у вимірюванні фізико-механічних характеристик (рівень та розподіл напружень, величина деформації, фактична площа дотику та ін.) трубних колон, невідповідність яких нормованим значенням приведе до виникнення вказаних дефектів. Результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень послужили науковою основою для технічного, методичного, організаційного та кадрового забезпечення функціонування служб неруйнівного контролю бурових та нафтогазовидобувних підприємств України.

Наукова новизна

1. Запропоновано, теоретично обґрунтовано та досліджено нові інформаційні (діагностичні) ознаки для оцінки якості різьбових з'єднань:

- момент досягнення в найбільш навантажених елементах різьбового з'єднання напружень, близьких до границі текучості матеріалу;

- величину фактичної площі дотику та рівень радіальних деформацій і їх розподіл в спряжених елементах.

2. На основі оригінального рішення, побудованого накладанням двох розв'язків задачі Ламе для внутрішньої (труби) та зовнішньої (муфти) частин різьбового з'єднання одержані аналітичні вирази для визначення радіальних, кільцевих напружень та переміщень залежно від величини радіального натягу. Також встановлено характер взаємозв'язку між геометричними розмірами з'єднання, величиною натягу та напруженнями і переміщеннями.

3. Досліджено особливості поширення високочастотних пружних хвиль у середовищах з неоднорідними попередніми напруженнями, в результаті чого:

- розроблено новий підхід до дослідження поширення високочастотних пружних хвиль, у якому використовується введення ефективного середовища

із зведеними модулями пружності, залежними від просторового розподілу попередніх напружень;

- розроблено і застосовано уточнюючий (з урахуванням кривизни граничних поверхонь і фронтів хвиль) метод дослідження проходження, відбиття і заломлення пучків високочастотних пружних хвиль, оснований на променевих рядах Дебая.

4. Встановлені особливості розвитку корозійно-втомних тріщин у тілі бурильних труб, а саме: спрямованість фронту направленості та залежність кути нахилу тріщини до осі труби від її глибини.

5. Розроблені нові способи контролю якості різьбових з'єднань, у тому числі і з використанням запропонованих нових інформаційних ознак, та визначені їх оптимальні параметри.

6. Встановлено характер зв'язків між параметрами якості різьбового з'єднання та характеристиками (амплітуда, швидкість УЗК) акустичного методу контролю.

7. Теоретично обґрунтована і досліджена можливість застосування оптимального цифрового фільтру Калмана для підвищення точності оцінки амплітуди ультразвукового сигналу при визначенні контактних тисків по витках різьбового з'єднання.

8. Розроблена методика визначення періодичності неруйнівного контролю ділянок бурильних колон з урахуванням розсіювання довговічності та зниження границі втоми.

Основні висновки

1. Проведені дослідження дозволили вирішити науково-технічну проблему забезпечення працездатності трубних колон нових конструкцій шляхом розробки та впровадження технічних засобів і технологій оцінки їх фактичного фізичного стану методами неруйнівного контролю. При цьому розроблено новий методологічний підхід до контролю різьбових з'єднань, який полягає не тільки у виявленні корозійно-втомних тріщин, але і у вимірюванні параметрів з'єднання, які визначають їх експлуатаційні характеристики (міцність та герметичність).

2. На основі аналізу відмов трубних колон, причин цих відмов та методів їх попередження встановлено, що однією із основних причин руйнування різьбових з'єднань, у тому числі і нових конструкцій, є недосконалість традиційно прийнятого критерію оцінки ефективності різьбових з'єднань - крутного моменту згвинчування - через його низьку достовірність, як по точності, так і по його фізичній суті.

3. Встановлено, що за нові інформаційні діагностичні ознаки якості різьбового з'єднання можна приймати: при згвинчуванні - момент досягнення в найбільш навантажених елементах різьбового з'єднання напружень, близьких до границі текучості матеріалу; після згвинчування та в процесі експлуа-

тації - величину фактичної площі дотику та рівень радіальних деформацій і їх розподіл в спряжених елементах. Обґрунтовано використання акустичного методу контролю для вимірювання параметрів, які характеризують ці інформаційні ознаки.

4. Досліджено попередньо напружений стан, що виникає в околі різьбового з'єднання. Аналітично розраховані та побудовані графіки розподілу радіальних та кільцевих напружень у різьбовому з'єднанні для різних варіантів з'єднань; розроблена інженерна методика розрахунку зміни зовнішнього діаметру муфти від зміни натягу в з'єднанні та здійснена її експериментальна перевірка. Визначені границі зміни контактних тисків, що виникають в різьбових з'єднаннях трубних колон різних конструкцій.

5. Досліджені особливості поширення високочастотних пружних хвиль у попередньо напруженому середовищі із складним неоднорідним навантаженням, якими є різьбові з'єднання труб нових конструкцій. Зокрема, на основі нелінійної динамічної теорії пружності розвинуто метод дослідження, при якому рівняння руху середовища з неоднорідним попередньо напруженим станом приводиться до стандартного вигляду рівняння руху в слабонеоднорідному середовищі із зведеними модулями пружності, що залежать від координат. Встановлено, що відхилення траєкторії центрального променя пучка УЗК залежно від величини напружень може сягати до 7°. Розроблено та досліджено спосіб фокусування ультразвукових коливань, який при контролі трубних виробів дозволяє підвищити чутливість контролю мінімум в 3 рази.

6. Розроблено та досліджено нові способи ультразвукового контролю якості різьбових з'єднань під час згвинчування, після згвинчування та в процесі експлуатації. Теоретично обґрунтовано і практично перевірено можливість застосування, для підвищення точності оцінки амплітуд УЗК при визначенні контактного тиску в різьбових з'єднаннях, обчислювальної процедури оптимального цифрового фільтру Калмана. Удосконалено способи ультразвукового контролю труб у польових умовах, внаслідок чого зменшено вплив на результати контролю зовнішніх завад (стан поверхні контрольованого виробу, температура навколишнього середовища, тощо).

7. Експериментальними та промисловими дослідженнями підтверджено, що причиною руйнувань різьбових з'єднань труб з конічними стабілізуючими поясками є невідповідність діаметрального натягу по стабілізуючому пояску нормованому значенню.

8. Встановлено, що час зародження корозійно-втомних тріщин в тілі бурильних труб становить менше ніж 40 - 50% тривалості роботи труби до поломки, а направленість фронту їх поширення на глибині 1,5 мм знаходиться в інтервалі від 17 до 27°. Ці

дані дозволили розробити ефективні способи знаходження цих дефектів акустичним методом.

9. Удосконалена та впроваджена методика визначення оптимальної періодичності неруйнівного контролю ділянок бурильних колон з врахуванням розсіювання довговічності та зниження границі втоми.

10. Розроблені та серійно випускаються на заводах "Газавтоматика" (м. Саратов, Росія), "Нафтоавтоматика" (м. Бугульма, Росія), дослідному виробництві НВФ "Зонд" (м. Івано-Франківськ) технічні засоби - ПКДЛ-1, ПЛНК, "Зонд-3", "Зонд-4", "Зонд-6", "Зонд-7", ППК-1 - та технології (РД 51-01-15-86, РД 51-01-24-86) для неруйнівного контролю та технічної діагностики трубних колон, які використовуються практично на всіх бурових та нафтогазових підприємствах України, РАТ "Газпром" та держав

СНД, а також в Іраку, Індії, Лівії, Кубі, Болгарії, В'єтнамі. Об'єм випуску в 1986-1991 рр. складає 226 установок на рік.

Робота виконана в Івано-Франківському державному технічному університеті нафти і газу та науково-виробничій фірмі „Зонд”.

Захист відбувся 4 липня 1996 р. на засідання спеціалізованої вченої ради Д 09.02.01 в Івано-Франківському державному технічному університеті нафти і газу

Офіційні опоненти: докт. техн. наук, проф. Білик С.Ф., докт. техн. наук, проф. Похмурський В.І., докт. техн. наук, проф. Маєвський С.М.

Провідна установа: Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, м. Київ.