

7. На основі сучасних підходів до вирішення проблем якості сформульовані вимоги до проведення неруйнівного контролю й розроблені технології, реалізовані в технічних умовах, пов'язаних з наданням послуг з неруйнівного контролю, та в ГСТУ 320.02829777.002-95 "Інструкція по проведенню неруйнівного контролю труб нафтового сортаменту в процесі їх експлуатації".

8. Результати роботи реалізовані в установках для контролю обсадних ("Контакт-1"), насосно-компресорних (УНКТ-1) та обважених бурильних (ОБТ-1) труб, технологіях, нормативному забезпеченні (ГСТУ 320.02829777.001-95, ГСТУ 320.02829777.014-99) і широко впроваджені як в Україні, так і за її межами.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

Захист відбувся 12 березня 2002 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. Заміховський Л.М., канд. техн. наук, Учанін В.М.

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

УДК 620.179

## РОЗРОБКА УСТАНОВКИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ОБСАДНИХ ТРУБ

© Козоріз А.В.

*інженер-консультант фірми „Розен Юроп Б.В. (RosenEurope b.v.)*

*(на час захисту - завідувач лабораторією перспективних досліджень НВФ "Зонд")*

*Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин*

*Показано, що одними з основних параметрів СОТ, які відповідають за експлуатаційну надійність обсадної колони і можуть бути визначені методами неруйнівного контролю, є овальність та ексцентриситет. На основі проведених теоретичних досліджень розроблені способи та встановлені аналітичні залежності для визначення овальності та ексцентриситету СОТ. Експериментально досліджено характер залежності між основними параметрами контролю та характеристиками дефектів. Розроблено та впроваджено у виробництво комплекс технічних засобів і технологій, які дозволяють проводити автоматизований вхідний контроль якості обсадних труб.*

За даними американських нафтогазових компаній, під час перевірки на трубних базах відбраковується до 20% нових обсадних труб. Аварії з обсадними трубами складають 7-8% всіх аварій в бурінні, на їх ліквідації витрачається понад 10% часу, що припадає на ліквідацію аварій всіх видів (особливо важкі аварії цього виду в регіонах, де обсадні труби спускають на велику глибину, та на розвідувальних свердловинах).

Проведений аналіз умов роботи та пошкоджень обсадних колон показав, що основним дефектом обсадних труб є невідповідність геомет-

ричних характеристик обсадних труб нормованим значенням, і тому перш за все слід контролювати їх різностінність (ексцентриситет), овальність та непрямолінійність (прогин). Найбільш прийнятним для вирішення цих задач є акустичний імпульсний луна-метод неруйнівного контролю.

Для виявлення дефектів різних типів та розмірів у всьому діапазоні типорозмірів обсадних труб проведені аналітичні розрахунки таких основних параметрів автоматизованого контролю, як крок сканування, частота акустичних коливань та чутливість.

Особлива увага приділялась визначенню технічних характеристик первинних перетворювачів, зокрема, куту вводу ультразвукових коливань. На базі проведених теоретичних досліджень отримана система рівнянь для визначення оптимального кута призми п'єзоелектричного перетворювача для виявлення дефектів поперечної орієнтації:

$$\begin{cases} \frac{d_{max}}{D} = 0,5 \left( 1 - \frac{c_t \cdot \sin \beta_e}{c_e} \right); \\ \beta_{opt} = \arcsin \left[ \frac{rc_e}{c_t \sqrt{R^2 + r^2}} \right] \end{cases} \quad (1)$$

або

$$27^\circ \leq \beta_{opt} \leq \beta_{max}, \quad (2)$$

де  $\beta_{opt}$  – оптимальний, кут призми похилого перетворювача;  $\beta_{max} = \arcsin \left[ \frac{c_e}{c_t} \left( 1 - \frac{2d_{max}}{D} \right) \right]$  – максимальний кут призми похилого перетворювача;  $d_{max}$  – максимальна глибина прозвучування при контролі труб діаметром  $D$  з заданим кутом  $\alpha$  вводу ультразвукових коливань;  $c_b$ ,  $c_e$  – швидкості хвиль зсуву в об'єкті контролю і поздовжніх хвиль у призмі перетворювача відповідно (залежать від властивостей матеріалів призми перетворювача і об'єкта контролю).

Дослідження труб показали, що зовнішній контур поперечного перерізу не описується точно простою кривою. На основі досліджень результатів вимірів труб нафтового сортаменту було встановлено, що при описуванні зовнішнього контуру труби колом похибка апроксимації в 6 разів вища за похибку вимірювань. Необхідна точність досягається при описуванні контуру еліпсом. У зв'язку з цим виникла задача найбільш точного визначення форми цього контуру при умові, що похибка апроксимації не повинна перевищувати похибки вимірювань.

Рівняння конічного січення, яке проходить через п'ять точок  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$ ,  $(x_4, y_4)$ ,  $(x_5, y_5)$ , має вигляд:

$$\begin{bmatrix} x^2 & x \cdot y & y^2 & x & y & 1 \\ (x_1)^2 & x_1 \cdot y_1 & (y_1)^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ (x_2)^2 & x_2 \cdot y_2 & (y_2)^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ (x_3)^2 & x_3 \cdot y_3 & (y_3)^2 & x_3 & y_3 & 1 \\ (x_4)^2 & x_4 \cdot y_4 & (y_4)^2 & x_4 & y_4 & 1 \\ (x_5)^2 & x_5 \cdot y_5 & (y_5)^2 & x_5 & y_5 & 1 \end{bmatrix} = 0. \quad (3)$$

Визначення координат п'яти точок зовнішнього діаметру труб пропонується проводити акустичним безконтактним методом на частоті ультразвукових коливань 900 кГц (рис. 1).

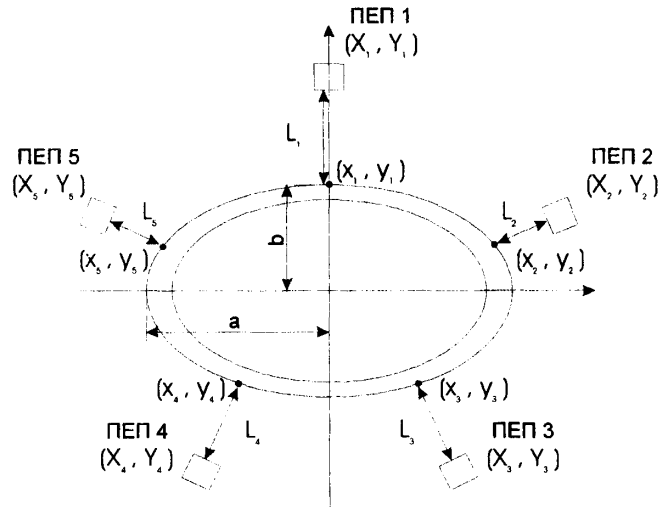


Рис. 1. Схема визначення овальності COT

Коефіцієнти  $a_{i,k}$  ( $i, k=1, 2, 3$ ) можна виразити через рівняння (3) в наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= kA_{11}; \\ 2a_{12} &= kA_{12}; \\ a_{22} &= kA_{13}; \\ 2a_{13} &= kA_{14}; \\ 2a_{23} &= kA_{15}; \\ a_{33} &= kA_{16}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де  $k$  – довільна стала;  $A_{1i}$  – алгебраїчне доповнення відповідного елемента матриці (3) ( $i=1, 2, 3$ ). Знаючи коефіцієнти  $a_{i,k}$  ( $i, k=1, 2, 3$ ) рівняння (3), знаходимо параметри апроксимуючого еліпса  $a$  і  $b$ . Тоді овальність контрольованої труби буде дорівнювати:

$$e = 2 \frac{a-b}{a+b}. \quad (5)$$

На основі запропонованої математичної моделі розроблена методика визначення екстремальних значень товщини стінки  $d_{min}$  і  $d_{max}$ . Особливістю математичної моделі є визначення величини зміщення  $h$  центру внутрішньої поверхні відносно центру зовнішньої поверхні на основі даних безобертової товщинометрії в трьох точках.

На рис. 2 зображено переріз труби із змішеним центром внутрішньої поверхні з радіусом  $r$  відносно центру зовнішньої поверхні з радіусом  $R$  на величину  $h$ . У вибраній декартовій системі координат внутрішня поверхня описується рівнянням:

$$r^2 = (x-a)^2 + (y-b)^2, \quad (6)$$

де  $a$  і  $b$  – координати центра внутрішньої поверхні.

При відомих радіусах зовнішньої  $R$  і внутрішньої  $r$  поверхонь і трьох значеннях товщини труби  $d_1, d_2$  і  $d_3$  координати точок  $A_1, A_2$  і  $A_3$  дорівнюють

$$\begin{aligned} x_1 = 0; \quad x_2 = -(R-d_2)\cos 30^\circ; \\ x_3 = (R-d_3)\cos 30^\circ; \\ y_1 = R-d_1; \quad y_2 = -(R-d_2)\sin 30^\circ; \\ y_3 = -(R-d_3)\sin 30^\circ. \end{aligned} \quad (7)$$

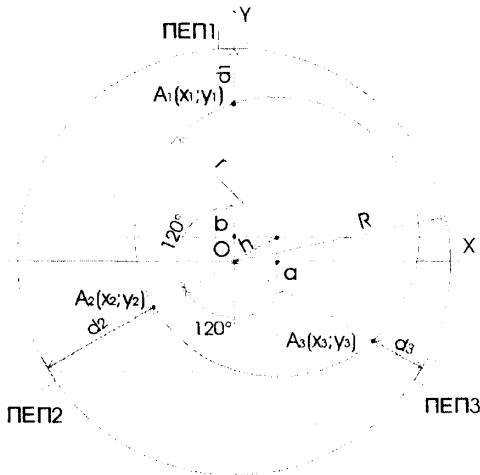


Рис. 2. Схема визначення ексцентриситету СОТ

Виходячи з виразів (6) і (7), складемо наступні співвідношення:

$$\begin{cases} (x_1-a)^2 + (y_1-b)^2 = (x_2-a)^2 + (y_2-b)^2; \\ (x_1-a)^2 + (y_1-b)^2 = (x_3-a)^2 + (y_3-b)^2. \end{cases} \quad (8)$$

Розв'язавши систему рівнянь (8), знаходимо координати центра внутрішньої поверхні  $a$  і  $b$  в декартовій системі координат.

Екстремальні значення товщини дорівнюють:

$$\begin{aligned} d_{\min} &= R-r-h; \\ d_{\max} &= R-r+h, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $h = \sqrt{a^2 + b^2}$ .

Для перевірки основних теоретичних положень, а також визначення оптимальних параметрів контролю геометричних характеристик сталених обсадних труб, були розроблені експериментальні установки контролю ексцентриситету та овальності труб. У ході експериментів перевірялись основні положення теоретичних досліджень про оптимальні параметри контролю.

Щоб розробити алгоритм визначення розмірів і еквівалентної площі дефекту на основі оцінки амплітуди відбитого від нього ультразвукового сигналу, знаходили математичну залежність між глибиною цього дефекту та амплітудою. Експерименти для визначення цієї залежності проводили на зразку СОТ умовним діаметром  $d=168$  мм із нарізаними на ньому штучними дефектами різної глибини і довжини. В ході експерименту використовувались стандартні п'єзоперетворювачі (ПЕП) типу П121-2,5-65, П121-2,5-70 та серійний дефектоскоп УД2-12.

Діапазон зміни глибини дефектів вибирався згідно з ГОСТ 632-80 – від 1 до 6 мм. Дефекти типу риски наносились фрезою діаметром 60 мм. Відповідно, діапазон зміни довжини дефектів складає від 9 до 23 мм, еквівалентної площі – від 6 до 95 мм<sup>2</sup>, що повністю задовольняє вимоги ГОСТ 632-80. Амплітуду сигналів, відбитих від штучного дефекту, вимірювали через фіксовані інтервали (2,5 мм). Отримані в такий спосіб залежності середніх значень амплітуд УЗК від глибини штучного дефекту представлені на рис. 3.

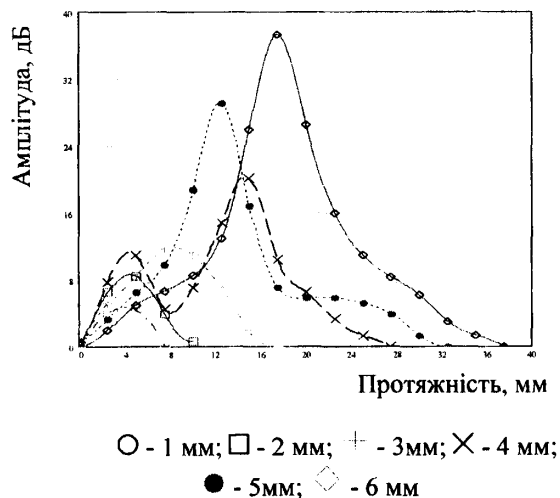


Рис. 3. Розподіл амплітуди УЗК в залежності від глибини штучного дефекту при максимальній глибині дефекту

Результати експериментів показали, що, знаючи амплітуду вихідного аналогового сигналу дефектоскопа, можна визначити глибину залягання дефекту.

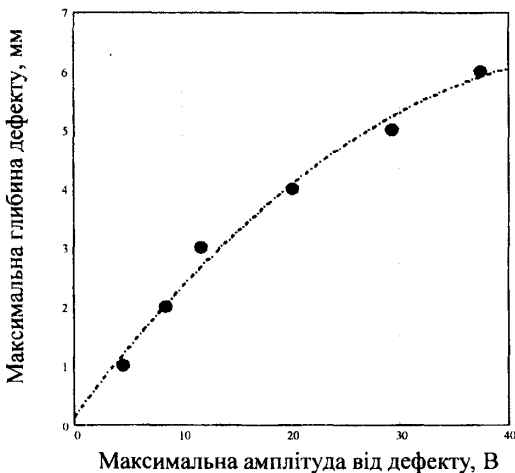
На основі графічних представлень характеру залежностей амплітуди ультразвукового сигналу від глибини і довжини дефекту обрана поліноміальна апроксимація, яка забезпечує найменше відхилення функції від експериментальних даних.

Залежність глибини дефекту  $H$  від амплітуди контрольованого сигналу можна представити у вигляді:

$$H = y_0 + y_1 A_0 + y_2 A_0^2, \quad (10)$$

де  $A_0$  - максимальне значення амплітуди відбитого луна-сигналу;  $y_0, y_1, y_2$  - коефіцієнти полінома (0.137; 0.245; -2.449·10<sup>-3</sup>).

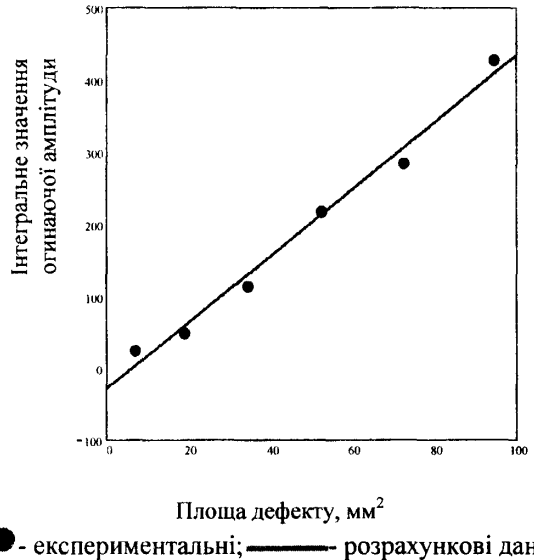
Коефіцієнт кореляції при цьому складає  $R=0,989$ . Відносна приведена похибка визначення величини  $H$  за формулою (10) дорівнює 2,57%. Графік залежності реальної і розрахункової глибини дефекту від амплітуди відбитого луна-сигналу представлений на рис. 4.



● - експериментальні; ..... - розрахункові дані

Рис. 4. Залежність реальної і розрахункової глибини дефекту від амплітуди відбитого луна-сигналу

Для визначення еквівалентної площі дефекту, яка описується контрольованим сигналом, необхідно фіксувати виміряні поточні значення амплітуди сигналу при виявленні дефекту, інтерполювати їх одним з чисельних методів, наприклад, методом кубічних сплайнів, а потім проінтегрувати отриману залежність. На рис. 5 представлені розрахунки еквівалентної площі дефекту на основі експериментальних даних (див. рис.3). Експериментальні дані були інтерпольовані методом кубічних сплайнів, а потім проінтегровані. Зв'язок між розрахунковими та реальними значеннями площі дефектів описується поліноміальною функцією першого порядку. Коефіцієнт кореляції дорівнює 0,993.



● - експериментальні; ——— розрахункові дані

Рис. 5. Залежність розрахункових від реальних значень еквівалентної площі дефектів

Проведений метрологічний аналіз розроблених технічних засобів контролю ексцентриситету та овальності показав, що основна відносна похибка контролю не перевищує, відповідно,  $\pm 1\%$  та  $\pm 4\%$ . При цьому ймовірність виявлення дефектів в СОТ становить 0,965, а достовірність результатів контролю – не менше 0,925, що є цілком прийнятним.

В результаті теоретичних та експериментальних досліджень у НВФ „Зонд” була виготовлена стаціонарна установка автоматизованого контролю обсадних труб „Зонд-СОТ”, яка дозволяє в автоматизованому режимі виявляти дефекти поздовжньої і поперечної орієнтації заводського походження у тілі сталених обсадних труб, визначати місце розташування цих дефектів і визначати екстремальні значення товщини стінки та овальності, а також в ручному режимі визначати групи міцності та проводити дефектоскопію різьби і інструментальний контроль труб.

В основу роботи установки покладено акустичний метод дефектоскопії і товщинометрії та вихрострумний метод контролю групи міцності.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в тому, що:

вперше розроблено спосіб визначення овальності СОТ акустичним луна-методом, який дозволяє проводити безконтактний контроль;

вперше розроблено спосіб визначення ексцентриситету СОТ, який на основі визначення товщини стінки труб за трьома твірними дозволяє здійснювати безобертний контроль;

експериментально встановлені залежності між інформативними параметрами ультразвукового контролю та основними характеристиками дефектів, що виявляються в процесі автоматизованого контролю СОР.

**Практичне значення** одержаних результатів полягає в тому, що розроблені технічні засоби та технології реалізовані в комплексній установці автоматизованого контролю основних параметрів СОР, впроваджені у виробництво знайшли відображення в галузевих стандартах і дозволяють оптимізувати процес формування обсадної колони за результатами вхідного контролю труб. Згадана установка з позитивними результатами пройшла промислові випробування в науково-виробничій фірмі "Зонд" і впроваджена на базі виробничого обслуговування Хрещищенського УБР ДК „Укр-газвидобування”.

#### **Основні результати та висновки:**

У дисертації наведене теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової задачі контролю якості обсадних труб, що полягає в розробці необхідних для проведення автоматизованого контролю способів, методів, технічних засобів та нормативних документів, впровадження яких сприяє попередженню відмов.

У результаті аналізу причин відмов і поломок сталених обсадних труб в процесі їх експлуатації визначено, що серед основних параметрів СОР (відсутність дефектів типу порушення суцільності металу, відповідність фізико-механічних характеристик та товщини труби нормованим значенням), які відповідають за експлуатаційну надійність обсадної колони і можуть бути визначені методами неруйнівного контролю, є овальність та ексцентриситет.

На основі проведених теоретичних досліджень аналітично визначені та експериментально перевірені основні параметри автоматизованого акустичного контролю труб: кут вводу акустичних коливань для виявлення поздовжніх дефектів складає  $65^\circ$ , поперечних –  $70^\circ$ .

Встановлено, що чутливість при виявленні дефектів повинна складати не менше 30 дБ, крок сканування – не менше 30 мм, що дозволяє надійно виявляти (96%) та реєструвати в реальному масштабі часу дефекти розмірами за ГОСТ 632-80 за швидкості контролю до 2 м/хв.

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень встановлені аналітичні залежності, розроблені способи та технічні засоби для визначення овальності та ексцентриситету СОР, що є необхідним для розрахунку та формування оптимальної конструкції обсадної колони.

Експериментально досліджено характер залежності між інформативними параметрами акустичного контролю та характеристиками дефектів, зокрема показано, що:

залежність між глибиною штучного дефекту і максимальною амплітудою відбитого від нього ультразвукового сигналу описується поліномом другого порядку. Коефіцієнт кореляції складає 0,989, відносна приведена похибка визначення глибини дефекту не перевищує 12,4 %;

встановлено можливість визначення еквівалентної площі дефекту, використовуючи дані про умовні глибину і довжину дефекту – існує лінійна залежність між інтегральним значенням огинаючої амплітуди луна-сигналу від дефекту та площею дефекту. При цьому коефіцієнт кореляції складає 0,993.

В процесі проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено та впроваджено у виробництво комплекс технічних засобів і технологій, які дозволяють проводити автоматизований вхідний контроль якості обсадних труб. Економічний ефект від впровадження автоматизованої установки контролю якості обсадних труб тільки на одному буровому підприємстві складає не менше 150 тис. грн. на рік.

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

Захист відбувся 4 липня 2003 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. Мавський С.М., канд. техн. наук Учанін В.М.

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