



РОЗВИТОК ЗАСОБІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ І ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ В НАФТОГАЗОВІЙ ГАЛУЗІ

О. М. КАРПАШ, М. О. КАРПАШ, І. В. РИБЦЬКИЙ, Н. Л. ТАЦАКОВИЧ

Зроблено огляд найновіших досягнень Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу в галузі розробки засобів та технологій технічної діагностики металокопункцій довготривалої експлуатації. Особливу увагу присвячено питанням розроблення та технічної реалізації методів контролю корозійних пошкоджень, оцінки зміни механічних характеристик, а також виявлення та оцінки дефектів типу порушення суцільності.

The paper is a review of the most recent achievements of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas in the field of development of the means and technologies of technical diagnostics of long-term metal structures. Special attention is given to the issues of development and technical implementation of the methods of corrosion damage monitoring, evaluation of the change of mechanical properties, as well as detection and evaluation of discontinuity type defects.

Нафтогазова галузь України є однією з найстаріших у Європі і включає практично повний перелік можливих секторів — розвідку, буріння, видобування, транспортування та зберігання, а також переробку нафти та газу. Обладнання, що експлуатується у цій галузі, може вважатись таким, що відпрацювало свій нормативний ресурс (майже у 70 % випадків).

Така ситуація зумовлена впливом чинників, котрі можна розділити на дві категорії: технічного та організаційного характеру. До причин технічного характеру слід віднести: високі тиски і температури, агресивні середовища, локальні перевантаження, старіння матеріалу тощо. Організаційні причини в основному пов'язані з фінансовими труднощами, які не дозволяють у повній мірі ремонтувати, обслуговувати та замінити металокопункції, технічний стан яких є незадовільним [1].

Крім того, об'єкти нафтогазової галузі віднесені до категорії потенційно небезпечних і над ними встановлений державний нагляд, який здійснює Держгірпромнагляд МНС України. Зокрема, у 2001 р. прийнято Закон України «Про об'єкти підвищеної небезпеки», який передбачає систематичне виконання процедур із виявлення головних небезпек і оцінку вагомості та ймовірності виникнення цих небезпек на підприємствах, де наявні небезпечні речовини у кількості, що дорівнює або перевищує нормативно-встановлені порогові маси.

Відповідно до існуючої світової та вітчизняної практики, головне місце у виявленні небезпек і оцінці їх вагомості займає технічне діагностування, що в основному реалізується методами неруйнівного контролю (НК) [2].

Так, на сучасному етапі розвитку науки і техніки України ставиться завдання не тільки локалізації та виявлення вже наявних дефектів типу порушення суцільності матеріалу, але й контроль

за утворенням та докритичним розвитком тріщин; контроль напружено-деформованого стану матеріалу; вимірювання зміни фізико-механічних характеристик металу в процесі експлуатації, що дозволить через вимірювання цих параметрів оцінити залишковий ресурс об'єктів довготривалої експлуатації та розробити принципово нові методи, способи і технології оцінки фактичного фізичного (технічного) стану металокопункцій [3].

Для переважної більшості об'єктів нафтогазової галузі можливо застосувати принцип визначення фактичного технічного стану за наступними параметрами:

- геометричні характеристики;
- наявність/відсутність дефектів типу порушення суцільності;
- фізико-механічні характеристики.

Вчені Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу понад 35 років активно працюють за напрямком наукового, технічного, методичного та кадрового забезпечення в нафтогазовій галузі.

Метою даної роботи є висвітлення основних досягнень в галузі НК та технічної діагностики (ТД) в нафтогазовій галузі, визначити перспективи подальшого розвитку вказаного напрямку.

Визначення геометричних параметрів. Своєчасне виявлення та правильне визначення фактичних геометричних розмірів (величин зносу) в нафтогазовому обладнанні є однією з вимог забезпечення його безаварійної експлуатації, а прогнозування залишкового ресурсу різних видів обладнання має здійснюватися з дійсної величини зносу та його характеру.

В нафтогазовій галузі найбільше поширення отримали ультразвукові методи контролю цих характеристик. Зокрема, авторами вперше були досліджені способи, розроблені та впроваджені

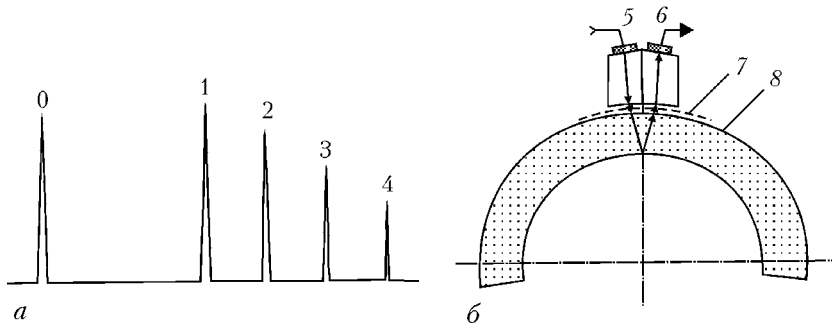


Рис. 1. Зображення багаторазового відбиття УЗ коливань в тілі труби (а) та схема їх проходження (б): 0 — зондуєчий імпульс; 1-4 — імпульси, відбиті від зовнішньої та внутрішньої поверхонь труби; 5 — випромінювач п'єзоелектричний; 6 — приймач п'єзоелектричний; 7 — контактна рідина; 8 — стінка труби

технічні засоби для вимірювання товщини стінки методом безперервного сканування [4]. Такі засоби можуть використовуватися в автоматизованих комплексах НК. Сканування об'єкта контролю може відбуватися або по гвинтовій лінії, або по декількох твірних, використовуючи багатоканальну систему вимірювання. В якості інформативного параметра для оцінки технічного стану труб нафтогазового сортаменту за величиною зношення стінки вибрано екстремальні значення товщини стінки, тобто максимальне і мінімальне її значення в поперечному перерізі труби.

Схема вимірювання товщини стінки труби за вказаним способом наведена на рис. 1. Якщо випромінювач 5 та приймач 6 роздільно-суміщеного перетворювача установлені на невеликій відстані від зовнішньої поверхні контрольованої труби, то на приймальному п'єзоперетворювачі 6, крім зондуєчого імпульсу з індексом 0 і імпульсу з індексом 1, відбитого від зовнішньої поверхні труби, спостерігається серія імпульсів з індексами 2, 3, 4, 5 і т. д., отриманих внаслідок багаторазового відбивання УЗК в стінці труби.

Інтервал часу, який розділяє багатократно відбиті в стінці труби імпульси, а відповідно час зміщення кожного з них відносно імпульсу, відбитого від зовнішньої поверхні стінки труби, змінюється залежно від зміни товщини стінки труби. Тому, вимірюючи інтервал часу t між сусідніми імпульсами, можна тим самим вимірювати товщину стінки.

Проведені авторами дослідження показали, що найбільш надійним та достовірним є спосіб визначення товщини стінки труб за виміряним часовим інтервалом між імпульсами 1 і 2, відбитими

від зовнішньої та внутрішньої поверхонь стінки, за схемою акустичного тракту з роздільними приймачем та випромінювачем, які конструктивно об'єднані в один роздільно-суміщений п'єзоперетворювач.

При використанні як інформативного параметра часового інтервалу між імпульсами 1 і 2 підвищується точність вимірювання, бо виключається вплив на результат вимірювання величини зазору між випромінюючою

поверхнею п'єзоелектричного перетворювача і зовнішньою поверхнею контрольованої труби. Використання щільного способу створення акустичного контакту виключає прямий контакт перетворювача з об'єктом контролю, що особливо важливо при неперервному автоматизованому вимірюванні.

В останні роки наша увага була прикута до проблеми виявлення та оцінки ступеню корозійного пошкодження трубопроводів нафти та газу. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено та впроваджено УЗ корозиметр-товщиномір КТУ-1 (рис. 2), призначений для визначення ступеня корозійного пошкодження поверхні з одночасним вимірюванням залишкової товщини матеріалу виробу як з плоскою, так і з циліндричною поверхнею [5].

В основу роботи приладу покладено принцип вимірювання часу розповсюдження УЗ коливань від перетворювача до поверхні (корозія на зовнішній стороні) і від зовнішньої до внутрішньої поверхні (залишкова товщина стінки) виробу, що контролюється, при русі перетворювача вздовж об'єкта контролю на фіксованому базовому рівні (рис. 3).

Програмне забезпечення приладу КТУ-1 дає змогу проводити контроль виробів в режимі реального часу одночасно з переміщенням перетворювача вздовж поверхні контролю. На екрані комп'ютера відображаються поточні значення ступеня корозійного пошкодження й залишкової товщини стінки (в міліметрах). Таким чином можна отримати зображення перерізу виробу вздовж лінії руху перетворювача.

Прилад оснащено стандартним інтерфейсом RS-232, який дає змогу підключати прилад як до настільного, так і до портативного комп'ютера, що особливо зручно при роботі в цехових або польових умовах, на борту судна або на крилі літака. Вбудована FLASH-пам'ять розширює сферу застосування приладу, оскільки дає можливість зберегти отриманий при контролі переріз виробу й

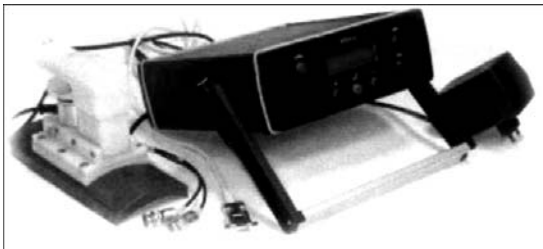


Рис. 2. Ультразвуковий корозиметр-товщиномір КТУ-1

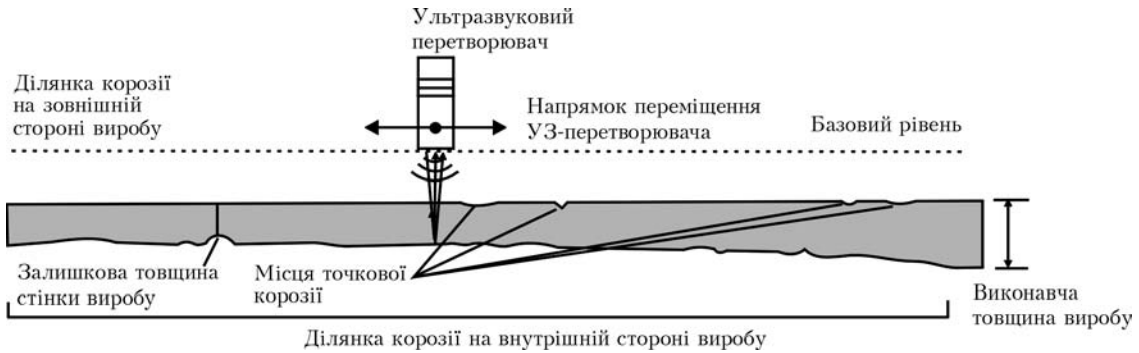


Рис. 3. Схема контролю корозії товщини стінки приладом КТУ-1

передати його на комп'ютер для наступної візуалізації в будь-який зручний для оператора час.

Програмне забезпечення, розраховане на використання в операційних системах Windows 95/98, Windows 2000/XP, що входить в комплект поставки приладу, дозволяє здійснювати зчитування результатів вимірювань з приладу, їх запис на жорсткий диск комп'ютера і підготовку для друку сторінки-звіту за результатами контролю.

Основні технічні характеристики КТУ-1: діапазон товщин, що контролюються — 4...30 мм; діапазон вимірювання глибини корозії — 1...10 мм; абсолютна похибка вимірювання товщини — не перевищує $\pm 0,3$ мм; абсолютна похибка вимірювання глибини корозії — $\pm 0,1$ мм; максимальна швидкість сканування — до 0,9 м/хв.

Проте необхідність забезпечення якісного акустичного контакту між п'єзоперетворювачем та поверхнею об'єкта контролю за допомогою контактних рідин значно обмежує його застосування.

Принципове вирішення даного завдання було знайдене шляхом використання безконтактного акустичного методу, що базується на використанні повітряного акустичного зв'язку [6].

Дослідно-експериментальна установка, що реалізує даний метод УЗ контролю БКТУ-2 (рис. 4), являє собою ручний переносний прилад у металевому корпусі, до якого приєднуються акустичні перетворювачі та автоматичний сканер. Зв'язок БКТУ-2 з персональним комп'ютером здійснюється через інтерфейс USB.

Для забезпечення достовірності результатів контролю розроблено методику використання дослідно-експериментальної установки в промислових умовах.

Конструктивно УЗ безконтактний перетворювач складається з корпусу 1, демфера 2, корпусу резонатора 3, п'єзоелектричної пластини 4, виготовленої з титанату барію ТБК-3 діаметром 20 мм, резонансна частота якої складає 1 МГц, багатощарового узгоджуючого шару 5 та фіксуючого кільця 6 (рис. 5) [7]. Демпфер, п'єзоелектрична пластина та узгоджуючий шар склеюються за допомогою епоксидної смоли і утворюють резонатор, який кріпиться

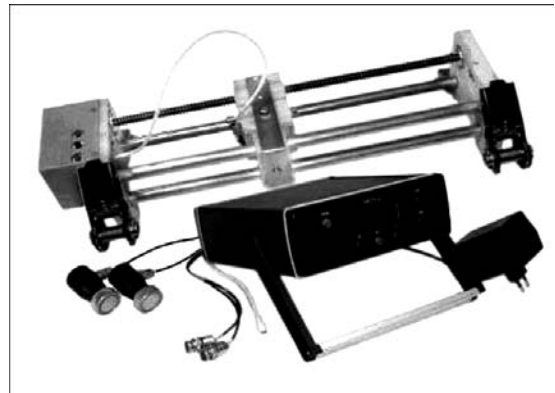


Рис. 4. Дослідна установка БКТУ-2

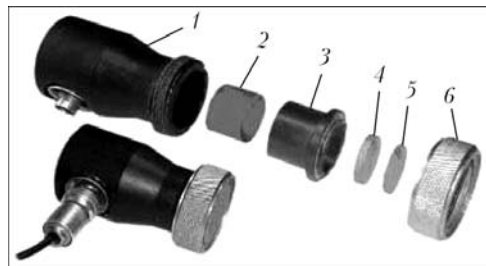


Рис. 5. Конструкція безконтактного УЗ перетворювача (позначення див. у тексті)

ся в корпусі перетворювача за допомогою фіксуючого кільця.

Для проведення експериментальних випробувань було відібрано 12 сталевих зразків товщиною від 0,55 до 9,53 мм. Випробування проводили згідно з розробленою методикою. У ході експериментальних досліджень встановлено, що приведена до діапазону (6,57 мм) похибка вимірювань за допомогою удосконаленого безконтактного методу не перевищує 5,5 %.

Промислову апробацію установки було виконано в умовах лабораторій НВФ «Зонд» та промислу Богородчанського ЛВУМГ.

Виявлення та оцінка дефектів типу порушення суцільності. Аналіз аварійності трубних колон, що використовуються для буріння та видобування нафти і газу, показав, що, незважаючи на широке впровадження нових типів труб, конструкція різьбових з'єднань яких практично вик-



лючає можливість поломок, а також застосування методів НК для перевірки стану трубних колон, загальна кількість відмов і розподіл відмов за видами за останні десятиліття суттєво не змінилися. Основну частку відмов (до 50 %) складають пошкодження різьбових з'єднань трубних колон (корозійно-утомні руйнування, втрата міцності та герметичності), значна частка відмов (до 30 %) припадає на руйнування труб по гладкій частині (на тілі, зварному шві). Сказане підтверджується такими узагальненими статистичними даними по основних підприємствах галузі (ВАТ «Укрнафта», ДК «Укргазвидобування», ДАК «Чорноморнафтогаз»).

Основну частину відмов складають дефекти типу порушення суцільності матеріалу (тріщини різних видів, непровари, шлакові включення, розшарування тощо).

Було показано, що найбільш ефективним методом виявлення тріщин, у тому числі утомних, у різьбових з'єднаннях труб, що знаходяться у згинченому виді в складі бурильної колони, є акустичний метод [8]. Тому для забезпечення універсальності апаратури та здешевлення її вартості для дефектоскопії нафтогазового обладнання розроблялися переважно способи та засоби акустичного контролю.

Першим етапом у вирішенні поставленої проблеми є розроблення нових та удосконалення існуючих методів математичного моделювання взаємодії зовнішніх фізичних полів з об'єктами контролю для кількості та достовірності діагностичної інформації. Особливо складним об'єктом для дефектоскопічного контролю є трубні вироби та їх різьбові з'єднання, оскільки у них складна геометрична форма, матеріал часто знаходиться під дією значних напружень, а розміри типових дефектів співрозмірні з розмірами витків різьби [9].

Для вирішення такого завдання було розроблено новий підхід до дослідження поширення УЗ коливань у матеріалах, за яким використовується зведення ефективного середовища за модулями пружності, залежними від просторового розподілу попередніх напружень [10].

Вирішення цього питання має суттєве значення для розвитку методів акустичного контролю взагалі, і, зокрема, для однієї з найбільш актуальних проблем — контролю якості різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту. Також було досліджено можливість застосування методу променевих рядів Дебая до дослідження поширення, відбиття і заломлення пучків високочастотних хвиль (рис. 6) під час поперечного розповсюдження в циліндричних хвилеводах.

Було одержано аналітичні вирази для знаходження довільної кількості амплітуд A_m , B_m променевих рядів Дебая. Також розглянуті геометрія падаючих, відбитих та заломлених променів на криволінійній межі розподілу двох середовищ і гра-

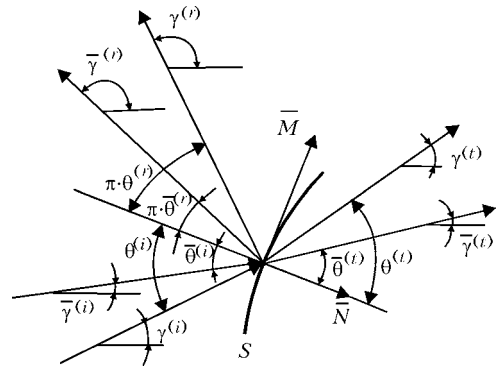


Рис. 6. Схема відбиття та заломлення високочастотних хвиль на криволінійній межі розподілу: i, t, r — індекси відповідно падаючих, заломлених та відбитих хвиль; N, \bar{M} — відповідно вектор, нормальний до межі розподілу та дотичний до неї

ничні умови на них, що дало змогу розробити нові способи УЗ контролю трубних виробів [9, 10].

Суттєвим обмеженням застосування акустичного методу контролю є той факт, що внаслідок явища заломлення, відбиття і трансформації ультразвукового контролю (УЗК) на межі розділу середовищ, а також їх розфокусування зовнішньою і внутрішньою поверхнями труби сигнал, що випромінює п'єзоперетворювач, значною мірою (до 98 %) послаблюється. Це призводить до зниження достовірності контролю. Завдання щодо підвищення чутливості контролю може бути вирішено за рахунок збільшення частки ультразвукової енергії, що вводиться в трубний виріб. Одним зі шляхів його вирішення є виконання умови, за якої всі елементарні промені пучка УЗК будуть введені в контрольований виріб по нормалі до його зовнішньої поверхні, тобто будуть відсутні явища відбиття, заломлення і трансформації УЗК.

Була одержана аналітична залежність, що визначає форму випромінюючої поверхні п'єзоперетворювача, за якої всі елементарні промені пучка УЗК будуть введені в контрольований циліндричний виріб по нормалі:

$$R_n = \frac{R_b}{\sqrt{1 + \frac{1}{n^2} - \frac{2}{n} \cos \gamma}}$$

За результатами даних досліджень був теоретично обґрунтований і запатентований спосіб підвищення чутливості УЗ контролю, що забезпечував надійне виявлення тріщин утоми на ранній стадії їх розвитку завдяки збільшенню амплітуди луно-сигналу в 1,9...2,7 рази [11].

На основі проведених досліджень були розроблені унікальні способи та засоби для виявлення дефектів у різьбових з'єднаннях, у тому числі обважених бурильних труб, що дають змогу виявляти корозійно утомні тріщини глибиною від 0,5 мм за умов високих завад (висота профілю різьби 1,8 мм).

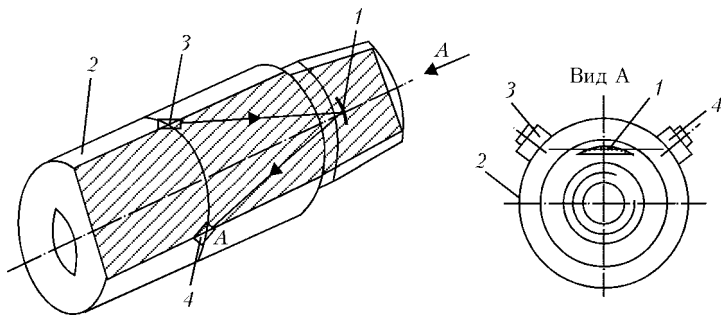


Рис. 7. Схема реалізації способу контролю різьбових з'єднань двома перетворювачами: 1 — дефект; 2 — труба, що піддається контролю; 3, 4 — відповідно випромінюючий та приймаючий п'єзоперетворювачі

Схема реалізації такого способу контролю зображено на рис. 7.

Вказані способи реалізовані в пересувних лабораторіях НК ПЛНК-5, ПЛНК-9, установках «Зонд-5», «Зонд-7», що експлуатуються практично на всіх підприємствах нафтогазової галузі України.

Визначення фактичних фізико-механічних характеристик металоконструкцій. У програмі «Ресурс» [3] визначено, що найбільш економічно і технічно прийнятним шляхом виходу з даної ситуації є розроблення нових методів і засобів ТД та НК, за допомогою яких можна буде створити банк даних фізико-механічних характеристик конструкційних матеріалів та їх деградацію з метою оцінки фактичного технічного стану з подальшою оцінкою залишкового ресурсу. Відповідно до чинних нормативних документів найбільш важливими фізико-механічними характеристиками матеріалів металоконструкцій (сталей) є межа плинності, межа міцності, твердість та ударна в'язкість [12].

Для вирішення задачі визначення фізико-механічних характеристик сталей (межа плинності/міцності) раніше було запропоновано використовувати не один параметр, а кілька одразу. В результаті теоретичних досліджень і моделювання були вибрані наступні параметри — твердість, теплопровідність та питомий електричний опір. Останній параметр довелось виключити з переліку в силу неможливості його точного вимірювання в польових умовах для феромагнітних виробів. Теоретичне обґрунтування наявності зв'язку між механічними характеристиками і теплопровідністю було надано в роботах [13, 14]. Для підтвердження проведених теоретичних досліджень та розробленого методу визначення механічних характеристик сталей було розроблено та виготовлено експериментальний взірець приладу ФМХ-1 (рис. 8).

З метою перевірки відповідності приладу ФМХ-1 функціональному призначенню були проведені його лабораторні випробування на зразках насосно-компресорних труб з метою визначення їх границі. Відібрано 13 зразків насосно-компресорних труб із попередньо визначеними в заводських лабораторіях фізико-механічними характе-

ристиками згідно ГОСТ 10006–80. Діапазон вказаних значень межі плинності відібраних зразків 320...760 МПа, товщина стінки усіх зразків 5,5 мм, діаметр 73 мм.

Також в ході попередніх досліджень виділено інформативний параметр, залежність межі плинності зразків від якого описана в роботі [14]. Було показано, що залежність вимірюваної теплопровідності та межі плинності нелінійна. Коефіцієнт кореляції межі плинності S та інформативного параметру теплопровідності M дорівнює 0,721, коефіцієнт кореляції твердості та межі плинності 0,857, а залежність між цими параметрами практично лінійна.

При тестуванні приладу ФМХ-1 на двох нових зразках насосно-компресорних труб абсолютна похибка визначення межі плинності склала 11,6 МПа, або приведена до діапазону межі плинності відносна похибка 2,6 % [15].

Невирішеним залишається питання визначення ударної в'язкості неруйнівними методами. Ударна в'язкість характеризує здатність металу труб чинити опір крихкому руйнуванню, а її зміна в процесі експлуатації металоконструкцій підтверджена на практиці [16, 17].

З метою вирішення даного питання були проведені експериментальні дослідження можливості визначення ударної в'язкості неруйнівним методом, а також встановлення характеру залежностей між інформативними параметрами вибраного методу НК та фізико-механічними характеристиками матеріалу трубопроводів, в тому числі реальними значеннями ударної в'язкості, які визначаються стандартними руйнівними методами (ГОСТ 9454–78).

Принцип роботи розробленої експериментальної установки І-1 ґрунтується на встановленій експериментальним шляхом залежності частоти електромагнітних коливань індуктивного контуру перетворювача від фазової структури складу та механічних характеристик матеріалу металокон-

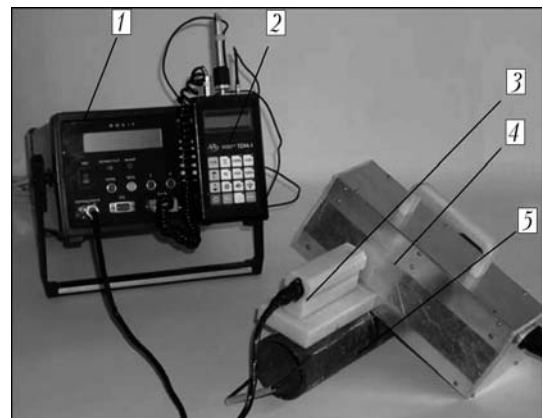


Рис. 8. Комплект установки ФМХ-1: 1 — блок обробки інформації; 2 — твердомір ТДМ-1; 3 — блок термодавачів; 4 — блок нагрівача; 5 — об'єкт контролю (взірець насосно-компресорної труби)

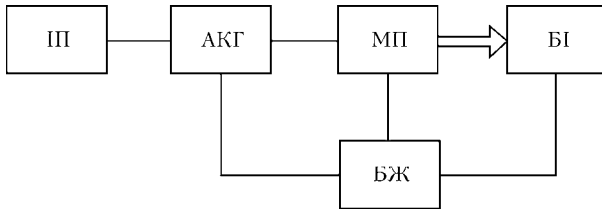


Рис. 9. Блок-схема експериментальної установки І-1: ІІ — індуктивний перетворювач; АКГ — автоколивний генератор; МП — мікропроцесор; БІ — блок індикації; БЖ — блок живлення

струкцій. Блок-схема експериментальної установки зображена на рис. 9 [18].

Було відібрано 18 зразків труб різних марок сталей та визначено їх фактичні фізико-механічні характеристики — твердість і коерцитивну силу, а також проведені вимірювання інформативного параметра *i* за допомогою експериментальної установки І-1.

Використання інформативного параметру, що вимірюється за допомогою розробленої експериментальної установки І-1, у комплексі вхідних параметрів для визначення ударної в'язкості дає високий результат (значення середньої приведеної до діапазону похибки перебуває в межах 3,47...4,11 %). З точки зору найкращого результату і мінімальної кількості технічних засобів оптимальною є комбінація вхідних параметрів твердість — інформативний параметр (середня приведена до діапазону похибка становить 3,90 %).

Висновки

На вирішення проблеми забезпечення експлуатаційної безпеки в нафтогазовій галузі шляхом НК та ТД було розроблено та технічно реалізовано ряд методів для контролю геометричних параметрів, визначення фізико-механічних характеристик та виявлення дефектів типу порушення суцільності металоконструкцій довготривалої експлуатації.

Подальші зусилля науковців університету зосереджені над вирішенням наступних науково-технічних задач:

розроблення безконтактного УЗ товщиноміра-дефектоскопа з одностороннім доступом до об'єкта контролю;

підвищення інформативності контролю фізико-механічних характеристик шляхом включення нових інформативних параметрів (питомий електричний опір, швидкість поширення ультразвуку);

розроблення методів ідентифікації типів та розмірів дефектів, виявлених УЗ засобами з використанням алгоритмів штучних нейронних мереж;

створення баз даних фактичних фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій довготривалої експлуатації.

Сделан обзор новейших достижений Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа в сфере разработки средств и технологий технической диагностики металлоконструкций длительной эксплуатации. Особое внимание уделено вопросам разработки и технической реализации методом контроля коррозионных повреждений — описан принцип работы экспериментальной установки, реализующей метод бесконтактного ультразвукового контроля. Кроме того, описаны достижения в сфере контроля основных механических свойств (предела текучести/прочности и ударной вязкости) металлоконструкций методами неразрушающего контроля. Проанализированы также достижения в сфере выявления и оценки дефектов типа нарушения сплошности. Дана оценка технического эффекта от внедрения разработанных средств.

1. Коллакот Р. Диагностика повреждений / Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 512 с.
2. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник: У 5 т. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. — Київ: Наук. думка, 1988. — Т.5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З. Т. Назарчука. — Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. — 1134 с.
3. Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс»), затверджена Постановою КМ України № 1331 від 08.10.2004.
4. Неруйнівний контроль труб нафтового сортаменту / О. М. Карпаш, Є. І. Крижанівський, П. Я. Криничний та ін. — Івано-Франківськ: Факел, 2001. — 380 с.
5. Карпаш О. М., Зінчак Я. М., Карпаш М. О. Технології та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики нафтогазового обладнання // Нафтова і газова промисловість. — 2007. — № 6. — С. 8–11.
6. Карпаш О. М., Рибіцький І. В., Карпаш М. О. Експериментальна установка для вимірювання товщини металоконструкцій безконтактним акустичним методом // Методи та прилади контролю якості. — 2008. — № 20. — С. 7–12.
7. Карпаш О. М., Рибіцький І. В., Карпаш М. О. Обґрунтування можливості використання кодів Баркера для підвищення чутливості ультразвукового безконтактного способу вимірювання товщини // Техн. діагностика і неразруш. контроль. — 2008. — № 2. — С. 31–35.
8. Неразрушающий контроль и диагностика: Справ. В 2-х кн / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филинов и др. // Под ред. В. В. Клюева. — Кн. 2. — М.: Машиностроение, 1995. — 448 с.
9. Про один з підходів до контролю якості скручування різьбових з'єднань у трубах нафтового сортаменту / О. М. Карпаш, Я. М. Бажалук, Я. М. Зінчак та ін. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — Львів, 1992. — № 29. — С. 73–77.
10. Карпаш О. М., Рубцов Ю. К. Уточнений анализ отражения пучков высокочастотных упругих волн при поперечном распространении в цилиндрических волноводах // Прикладная механика. — 1994. — № 3. — Т. 30/40. — С. 34–36.
11. А. с. 1783417. Устройство неразрушающего контроля цилиндрических изделий / О. М. Карпаш, Б. И. Ковалив. — 1992. — БИ № 47.
12. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др. // Под общ. ред. В. Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.



13. *Новий підхід до визначення фізико-механічних параметрів сталей неруйнівними методами / О. М. Карпаш, І. А. Молодецький, І. С. Кісіль, М. О. Карпаш // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. — 2004. — Вип. 9. — С. 80–86.*
14. *Карпаш М. О. Обрунтування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій // Методи та прилади контролю якості. — 2004. — № 12. — С. 30–33.*
15. *Кісіль І. С., Карпаш М. О., Ващишак І. Р. Прилад для контролю фізико-механічних характеристик сталей ФМХ-1 // Те саме. — 2005. — № 14. — С. 77–80.*
16. *Эксплуатационная долговечность нефтепроводов / В. В. Курочкин, Н. А. Малюшин, О. А. Степанов, А. А. Мороз. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. — 231 с.*
17. *Гумеров А. Г., Гумеров Р. С., Гумеров К. М. Безопасность длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. — 310 с.*
18. *Тацакович Н. Л., Карпаш О. М., Карпаш М. О. Экспериментальне дослідження можливості визначення ударної в'язкості неруйнівним методом // Мат. 14-ї Міжн. наук.-техн. конф. ЛЕОТЕСТ-2009 «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів». — Славське, 2009. — С. 100.*

Ів.-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу

Надійшла до редакції
27.05.2009

УДК 620.112.14

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ РЕНТГЕНТЕЛЕВИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЭКРАНОВ И ПЗС-КАМЕР С НАКОПЛЕНИЕМ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В. А. ТРОИЦКИЙ, Н. Г. БЕЛЫЙ, В. Н. БУХЕНСКИЙ, А. В. ЛЕЩИШИН, С. Р. МИХАЙЛОВ, Н. В. СЛОБОДЯН

Предложена усовершенствованная методика расчета относительной чувствительности контроля рентгенотелевизионных систем на основе рентгеновских экранов и ПЗС-камер, которая учитывает пространственную фильтрацию изображений в системе. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований цифровой рентгенотелевизионной системы на основе рентгеновского монокристаллического экрана CsI(Tl) и ПЗС-камеры, работающей в режиме регулируемой длительности накопления изображений на матрице.

The advanced method of calculation relative sensitivity of the testing X-ray television systems on the basis of the X-ray screen and CCD-cameras, which considers a spatial filtration of images in system, is proposed. Results of theoretical and experimental researches for digital X-ray television systems on the basis of the X-ray monocrystal screen CsI(Tl) and the CCD-cameras, operated in a mode of adjustable duration of accumulation of images on a matrix, are given.

Рентгенотелевизионные системы (РТВС) эффективно применяются для неразрушающего контроля (НК) качества материалов и изделий в промышленности. Такие системы имеют преимущества как перед пленочной, так и перед беспленочной рентгенографией (комплекс «ФОСФОМАТИК») в отношении производительности и стоимости контроля. В отличие от рентгенографии РТВС позволяют также контролировать объекты как в статике, так и в динамике. Наиболее распространены в настоящее время РТВС с промежуточным преобразованием теневого рентгеновского изображения в оптическое с помощью рентгеновских экранов или рентгеновских электронно-оптических преобразователей (РЭОП). РТВС с рентгеновскими экранами имеют ряд преимуществ перед РТВС на основе РЭОП: возможность смены рентгеновского экрана, что позволяет изменять размер рабочего поля и другие параметры РТВС; простота конструкции; низкая стоимость и др. Однако низкая яркость свечения экранов требует применения

в телевизионных камерах таких РТВС высокочувствительных преобразователей свет–сигнал.

Благодаря матрицам на приборах с зарядовой связью (ПЗС-матриц) появилась возможность использовать их в РТВС в качестве преобразователей свет–сигнал. ПЗС-матрицы оказываются более предпочтительными по сравнению с передающими электронно-лучевыми трубками благодаря компактности, минимальным геометрическим искажениям за счет фиксированной геометрии раstra, отсутствию инерционности и большому сроку службы. В последние годы фирмой «Sony» разработана серия ПЗС-матриц, в которой высокая чувствительность, соизмеримая с чувствительностью таких высокочувствительных передающих трубок, как изокон и супервидикон, достигается за счет микролинзового массива на поверхности матрицы (так называемые матрицы EXview HAD CCD). РТВС на основе таких телевизионных ПЗС-камер совместно с рентгеновскими экранами могут эффективно применяться для НК подвижных объектов, обеспечивая относи-