

МЕТОДИ І ЗАСОБИ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БУРОВОГО ТА НАФТОГАЗОВОГО ОБЛАДНАННЯ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О. М. Карпаш¹, Я. М. Зінчак¹, П. Я. Криничний²

¹*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ*

²*НВФ "Зонд", Івано-Франківськ*

Надійшла до редакції 02.09.05

Резюме: Викладені результати багаторічних теоретичних та експериментальних досліджень зі створення технічних засобів і технологій неруйнівного контролю та технічної діагностики бурового та нафтогазового обладнання. Описаний комплексний підхід до питання забезпечення ефективного застосування розробок в нафтогазовій галузі, який полягає у науковому, технічному, методичному та кадровому забезпеченні.

Ключові слова: неруйнівний контроль, технічне діагностування, бурове обладнання, нафтогазове обладнання.

О. М. Карпаш, Я. М. Зинчак, П. Я. Криничный. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БУРОВОГО, НЕФТЕГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ.

Резюме: Изложены результаты многолетних теоретических и экспериментальных исследований по созданию технических средств и технологий неразрушающего контроля и технической диагностики бурового и нефтегазового оборудования. Описан комплексный подход к вопросу обеспечения эффективного использования разработок в нефтегазовой отрасли, суть которого состоит в научном, техническом, методическом и кадровом обеспечении.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, техническое диагностирование, буровое оборудование, нефтегазовое оборудование.

O. M. Karpash, J. M. Zinchak, P. J. Krynychnyj. METHODS AND MEANS OF TECHNICAL CONDITION EVALUATION OF DRILLING AND PETROLEUM EQUIPMENT.

Abstract: The results of long-term theoretical and experimental studies on the scientific base development for design of means and technologies of non-destructive testing (NDT) and evaluation of drilling and petroleum equipment and tools are reviewed. The complex approach for operational safety maintenance of the equipment and tools by scientific, technical, methodical and personnel provision of the NDT services in the petroleum industry is considered.

Keywords: non-destructive testing, technical evaluation, drilling equipment, petroleum equipment.

1. АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ

Забезпечення технологічної безпеки в основних галузях економіки, запобігання виникненню аварій і надзвичайних ситуацій є складовою створення екологічно та техногенно-безпечних умов життєдіяльності кожної особи зокрема і суспільства взагалі, а отже, невід'ємною частиною державної політики національної безпеки і державного будівництва.

Підтвердженням важливості такого напрямку розвитку є видання низки нормативних документів уряду України [1, 2].

Аналіз причин виникнення аварій і надзвичайних ситуацій техногенного характеру за останні роки показав, що майже половина з них (48 %) мають технічний характер (незадовільний технічний стан споруд, конструкцій, обладнання та інженерних мереж або їх значна зношеність внаслідок закінчення нормативного терміну експлуатації – нормативного ресурсу). За підрахунками спеціалістів, спрацювання зазначених об'єктів у різних галузях економіки складає 50–70 % і має тенденцію до зростання [3].

Через складний та фінансовий стан більшості суб'єктів господарської діяльності, значне подорожчання будівництва і введення в експлуатацію нових об'єктів, високу вартість і трудомісткість їх заміни практично припинилося оновлення основних фондів. Капітальний і поточний ремонт споруд, конструкцій, обладнання та інженерних мереж проводиться нерегулярно, внаслідок чого зростає спрацьованість цих об'єктів, ступінь їх небезпеки та ймовірність виникнення аварій і надзвичайних ситуацій техногенного характеру, а витрати на аварійно-відновлювальні роботи в 2–3 рази перевищують розрахункові витрати на проведення зазначених ремонтів.

Особливо гостро ця проблема стоїть у нафтогазовій промисловості України. Сучас-

ний етап розробки нафтових і газових родовищ супроводжується зростанням технічних, екологічних та економічних проблем (серед технічних – високі тиски і температури; агресивні пластові води, які викликають корозію, більш глибокі, у т. ч. похилі та горизонтальні, свердловини тощо). Бурове та нафтогазове обладнання (далі – обладнання) є головними чинниками, які впливають на продуктивність і безпеку будь-якої нафтової чи газової свердловини, а збитки внаслідок їх поломки можуть бути досить великими.

Аналіз аварій тільки на трубних колонах показав, що, незважаючи на широке впровадження нових типів труб, конструкція різьбових з'єднань яких практично виключає можливість поломок, а також на застосування методів неруйнівного контролю для перевірки стану трубних колон, загальна кількість відмов і розподіл відмов за видами за останні 30 років суттєво не змінилися. Основну частку відмов (50 %) складають (і мають тенденцію до збільшення) пошкодження різьбових з'єднань трубних колон (корозійно-втомні руйнування, втрата міцності та герметичності). Значна частка відмов (до 30 %) припадає на руйнування труб на гладкій частині (тілі, зварному шву). Сказане підтверджується такими узагальненими статистичними даними. У ВАТ "Укрнафта" в 1996 р. мала місце 241 відмова. Серед них: обривання по різьбі – 70 випадків (29 %), розкручування різьб – 44 випадки (18 %), обривання труб – 12 випадків (4 %), корозійне пошкодження тіла труб і різьби – 96 випадків (40 %). У 2002 р. тільки в БУ "Укрбургаз" ДК "Укргазвидобування" було зафіксовано 27 відмов елементів бурильних колон, із них 15 (55 %) – це поломки на різьбовому з'єднанні, в т. ч. 9 (33 %) на замкові різьби; 11 (40 %) – поломки на тілі труб, переважно діаметром 127 мм. Узагальнюючи причини відмов нафтогазопромислового обладнання, доходимо висновку, що вони зумовлені такими недоліками:

Інновації при видобуванні та транспортуванні природного газу

- неправильною експлуатацією обладнання (наприклад, експлуатацією під час навантажень, більших за допустимі);
- неправильним виготовленням (параметри елементів трубних колон не відповідають проектним характеристикам);
- відсутністю ефективних методів і засобів для об'єктивної оцінки їх якості.

На практиці зазвичай зустрічається одночасна дія кількох із наведених чинників. Усе це гостро ставить питання про необхідність забезпечення якості обладнання – як на стадії виготовлення, так і в процесі їх експлуатації.

Світовою практикою доведено, що одним із найефективніших методів забезпечення експлуатаційної надійності обладнання, конструкцій та матеріалів є широке впровадження нових наукомістких технічних засобів і технологій оцінки їх фактичного технічного стану методами неруйнівного контролю (НК) та технічної діагностики (ТД). Основні завдання, які вирішуються методами НК і ТД, зображені на рис. 1. Суттєвим є те, що технологія НК стає штатною технологічною операцією.

Таким чином, впровадження нових високоефективних методів та засобів НК та ТД є актуальним та важливим загальнодержавним завданням для України.



Рис. 1. Основні завдання, які вирішуються за допомогою засобів неруйнівного контролю та технічної діагностики

2. НАУКОВЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Основні труднощі у вирішенні проблеми НК і ТД обладнання пов'язані із неповнотою інформації та неоднозначністю її інтерпретації, яку одержують на практиці різними фізичними методами. Складність діагностування об'єктів визначається взаємозв'язком, стохастичністю і корельованістю багатьох одночасно триваючих фізичних процесів, складністю конструкцій основних вузлів обладнання та умов експлуатації, принциповими труднощами одержання достовірної інформації, необхідної для розпізнання несправностей і оцінки технічного стану.

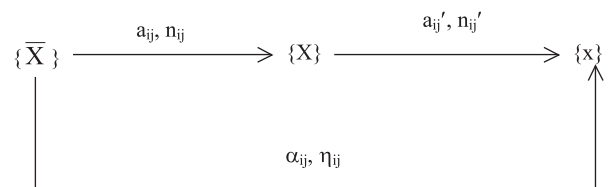
Окрім того, на сучасному етапі розвитку науки і техніки України необхідно вирішувати завдання не тільки локалізації та виявлення вже наявних дефектів типу порушення суцільності матеріалу, але й такі проблеми: контроль за утворенням та розвитком до критичного стану тріщини; контроль напружено-деформованого стану матеріалу; вимірювання зміни фізико-механічних характеристик металу в процесі експлуатації, що дасть можливість через вимірювання цих параметрів вийти на оцінку залишкового ресурсу об'єктів довготривалої експлуатації та розробити принципово нові методи, способи і технології оцінки фактичного фізичного (технічного) стану металоконструкцій [5].

Першим етапом у вирішенні поставленої проблеми є розробка нових та удосконалення існуючих методів математичного моделювання взаємодії зовнішніх фізичних полів з об'єктами контролю для достатньої кількості та достовірності діагностичної інформації. Особливо складним об'єктом для дефектоскопічного контролю є трубні вироби та їх різьбові з'єднання, оскільки вони мають складну геометричну форму, матеріал часто знаходиться під дією значних напружень, а розміри типових дефектів пропорційні розмірам витків різьби.

Розроблено новий підхід до дослідження поширення ультразвукових коливань у матеріалах, за яким використовується зведення ефективного середовища за модулями пружності, залежними від просторового розподілу попередніх напружень.

Вирішення цього завдання має суттєве значення для розвитку методів акустичного контролю взагалі і для однієї з найбільш актуальних проблем – контролю якості різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту – зокрема.

Розглянемо загальний випадок трьох станів пружного анізотропного середовища:



Тут $\{\bar{X}\}$ - стан ненапруженого середовища, $\{X\}$ - стан, який відрізняється від $\{\bar{X}\}$ наявністю скінчених неоднорідних напружень, які супроводжуються параметрами деформацій:

$$a_{ij} = \partial X_i / \partial \bar{X}_j = \delta_{ij} + U_{ij}; \quad (1)$$

$$n_{ij} = 0,5 \cdot (a_{mi} \cdot a_{mj} - \delta_{ij}) = 0,5 \cdot (U_{ij} + U_{ji} + U_{ij} \cdot U_{ji}), \quad (2)$$

де $\delta_{ij} = 1, i = 1, i \neq j$;

$$U_{ij} = \frac{\partial (X_i - \bar{X}_i)}{\partial X} \text{ – тензор дисторсій.}$$

Перехід зі стану $\{X\}$ в стан $\{x\}$ описується інфінітезимальними тензорами \hat{a} , \hat{n} . Параметри деформацій \hat{a} , \hat{n} , $\overset{\wedge}{\alpha}$, $\overset{\wedge}{\eta}$ визначаються аналогічно (1) та (2).

Виходячи із визначення термодинамічного потенціалу одиниці маси, покажемо, що константи пружності другого порядку у стані

{X} можуть бути представлені як розклад по дисторсіях U_{mn} у лінійному наближенні:

$$C_{ijkl}(X) = C_{ijkl}^o + U_{mn} \times \begin{pmatrix} C_{njkl}^o \cdot \delta_{im} + C_{inkl}^o \cdot \delta_{jm} + \\ + C_{ijnl}^o \cdot \delta_{km} + C_{ijkn}^o \cdot \delta_{lm} - \\ - C_{ijkl}^o \cdot \delta_{mn} + C_{ijklmn}^o \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де C_{ijkl}^o, \dots – константи пружності у ненапруженому стані {X}.

Аналогічні вирази можуть бути одержані для констант пружності вищих порядків. Звідси випливає, що пружні властивості однорідного, але неоднорідно деформованого середовища можуть змінюватися внаслідок неоднорідності дисторсій U_{mn} . Уже на цьому етапі дослідження в першому наближенні можна було б, використовуючи залежні від координат пружні константи (3) у стандартних рівняннях руху пружного середовища, запропонувати метод дослідження поширення пружних хвиль у попередньо напружених середовищах. Але більш точний підхід полягає у виведенні рівнянь руху в стані {x} і переведенні цього рівняння до координат ненапруженого стану {X}. В результаті вказаних перетворень одержимо рівняння руху у переміщеннях стандартного вигляду

$$\rho^o \ddot{\bar{w}} = \mu^* \cdot \bar{\nabla}^2 \cdot \bar{w} + (\lambda + \mu)^* \cdot \bar{\nabla} \cdot (\bar{\nabla} \cdot \bar{w}) \quad (4)$$

з пружними константами, залежними від координат. Це рівняння еквівалентне системі рівнянь Гельмгольца:

$$\bar{\nabla}^2 \Phi(\bar{x}) + K_{ot}^2 n_t^2(\bar{x}) \Phi(\bar{x}) = 0, \quad (5)$$

$$\bar{\nabla}^2 \bar{\Psi}(\bar{x}) + K_{ot}^2 n_t^2(\bar{x}) \bar{\Psi}(\bar{x}) = 0, \quad (6)$$

де Φ і $\bar{\Psi}$ – скалярний та векторний пружні потенціали; $\bar{w} = W \cdot e^{-i\omega t}$; $i = \sqrt{-1}$; $\bar{W} = \bar{\nabla} \cdot \Phi + \bar{\nabla} \cdot \bar{\Psi}$; $\omega = 2\pi\nu$ – кругова частота; $k_{ol} = \omega / C_{ol}$; $k_{ot} = \omega / C_{ot}$; $n_t(\bar{x}) = C_{ol} / C_t(\bar{x})$;

$n_t(\bar{x}) = C_{ol} / C_t(\bar{x})$; C_{ol}, C_{of} – деякі фіксовані швидкості поздовжніх і поперечних хвиль відповідно, $C_t(\bar{x}), C_l(\bar{x})$ – їх локальні значення; \bar{x} – координати ненапруженого стану.

У випадку високих частот доцільно застосувати променевий метод. Тому розв'язок системи (5), (6) шукаємо у вигляді рядів Дебая:

$$\Phi(\bar{x}) = e^{iK_{ol}S} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} A_m(\bar{x}) / (ik_{ol})^m, \quad (7)$$

$$\bar{\Psi}(\bar{x}) = e^{iK_{ol}\bar{S}} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \bar{B}_m(\bar{x}) / (ik_{ol})^m, \quad (8)$$

де невідомі фази S, \bar{S} та амплітуди A_m, \bar{B}_m можуть бути знайдені з рівнянь ейконалу

$$(\bar{\nabla}S)^2 = n_t^2, \quad (\bar{\nabla}\bar{S})^2 = n_t^2 \quad (9)$$

та переносу

$$2\bar{\nabla}A_m \bar{\nabla}S + A_m \bar{\nabla}^2 S = -\bar{\nabla}^2 A_{m-1}; \quad (A_m = 0, m < 0); \quad (10)$$

$$2\bar{\nabla} \cdot \bar{B}_m \bar{\nabla} \cdot \bar{S} + \bar{B}_m \bar{\nabla}^2 \bar{S} = -\bar{\nabla}^2 \bar{B}_{m-1}; \quad (\bar{B}_m = 0, m < 0); \quad (11)$$

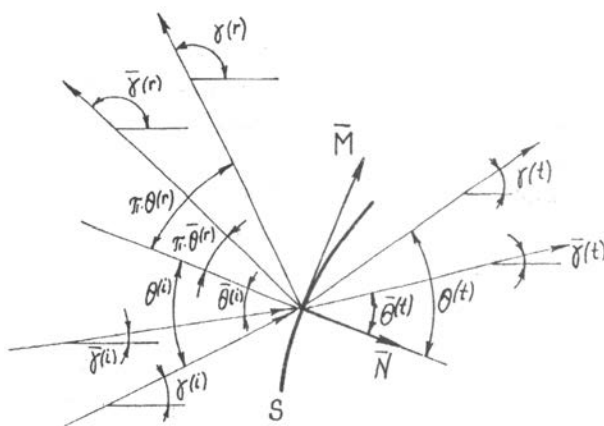


Рис. 2. Схема відбиття та заломлення високочастотних хвиль на криволінійній границі розподілу: (i), (t), (r) – індекси падаючих, заломлених та відбитих хвиль відповідно; N – вектор, нормальний до границі розділу, M – вектор, дотичний до границі розділу

Розгляд задачі завершується прикладом застосування розвинутого методу до знаходження траєкторій променів і хвильових полів від зосереджених джерел у середовищах з плоско- та циліндрично-сферичним розподілом поперечних напружень [5].

Була також досліджена можливість застосування методу променевих рядів Дебая до поширення, відбиття і заломлення пучків високочастотних хвиль (рис. 2) при поперечному поширенні у циліндричних хвилеводах.

На відміну від більш складних умов попередньої задачі у випадку плоских задач для однорідного середовища вдається знаходити довільну кількість членів променевих рядів і таким чином одержувати більш точні розв'язки, які залишаються придатними і для нижчих частот (до довжин хвиль, порівнюваних з характерними розмірами задачі), а також більш точно враховувати вплив кривизни хвильових пучків і границь.

Таким чином, нами отримані аналітичні вирази для знаходження довільної кількості амплітуд A_m , B_m променевих рядів Дебая. Розглянута геометрія падаючих, відбитих і заломлених променів на криволінійній гра-

ниці розподілу двох середовищ та граничні умови на них [6].

Проведений аналіз характеру поширення ультразвукових коливань в пружних середовищах дає можливість зводити задачі про поширення хвиль у середовищах з неоднорідним напружено-деформованим станом до задач поширення хвиль у слабо неоднорідних середовищах, а також використовувати променевий метод для дослідження закономірностей поширення пружних хвиль у середовищах з плоско- та циліндрично-сферичним розподілом напружень [5].

Отримані результати були використані при дослідженні особливостей поширення ультразвукових коливань у різбових частинах труб, що давало можливість:

- обчислювати параметри способу контролю для певної відомої або очікуваної орієнтації поверхні відбиття (дефекту, зони спряження, витка різьби тощо) без графічних побудов [6];
- забезпечувати мінімум втрат ультразвукової енергії створенням найкращих умов відбиття УЗК площини дефекту, що стало основою для розробки способів

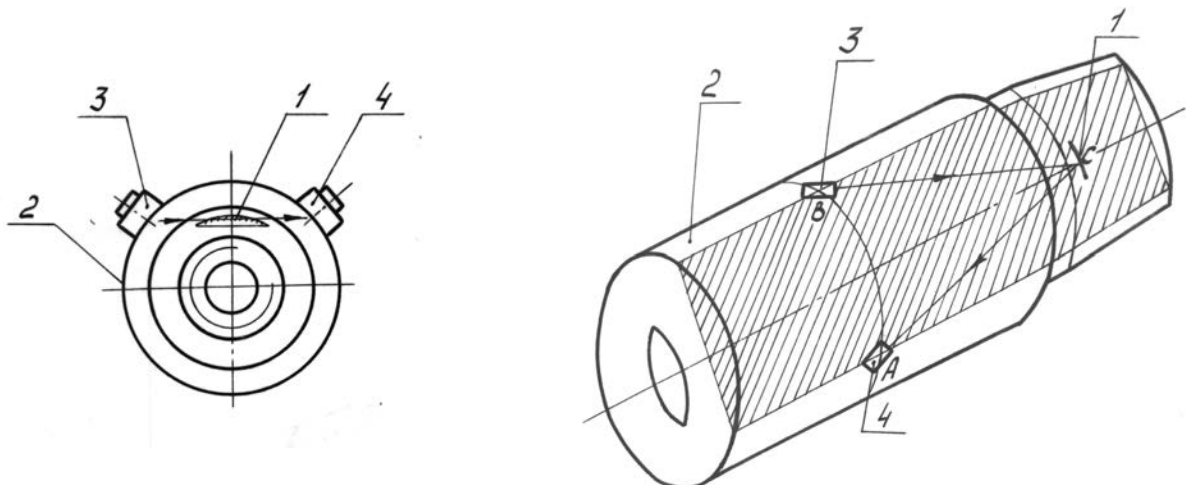


Рис. 3. Схема контролю ніпельної частини ОБТ луно-дзеркальним способом: 1 – дефект, 2 – ніпельна частина ОБТ, 3, 4 – випромінюючий та приймаючий п'єзоперетворювачі

- контролю товстостінних труб, які неможливо контролювати іншим чином через значне затухання УЗК в товщі металу;
- розробити спосіб, який вперше дав змогу здійснювати дефектоскопію замкових різьбових з'єднань ОБТ усіх типорозмірів у згвинченому стані [6].

Наступним етапом досліджень було встановлення характеру розподілу радіальних та кільцевих напружень в околі різьбового з'єднання, оскільки є необхідність не тільки виявляти дефекти в різьбових з'єднаннях, але й контролювати їх якість та герметичність.

Над даною проблемою (відповідно до важливості найбільш вразливих ділянок) працювало багато відомих вчених. Так, *С. Ф. Білик* [7] 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. У результаті проведених досліджень були знайдені закономірності для вибору оптимальних конструкцій різьбових з'єднань, профілів різьб та ін.

Проведені дослідження напружено-деформованого стану в зоні різьбового з'єднання дають також 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 діаметра муфти ΔD_3 різьбового з'єднання, яку можна виразити через радіальне переміщення U_r наступним чином:

$$\Delta D_3 = 2 \cdot U_r \Big|_{r=r_3} = 2A_1 r \cdot \frac{1-\nu}{\mu_2 r_3}. \quad (12)$$

З урахуванням одержаної залежності були проведені розрахунки зміни зовнішнього

діаметра 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. За більшого або меншого натягу, 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 діаметра з'єднання.

Одержано аналітичні вирази для визначення величини напружень, що виникають у різьбовому з'єднанні, а також для зміни при цьому його геометричних розмірів [5].

На основі одержаних вище результатів були розроблені та реалізовані нові підходи до оцінки якості різьбових з'єднань бурового обладнання на різних етапах його експлуатації, які полягають не тільки у виявленні засобами неруйнівного контролю дефектів типу порушення суцільності металу (тріщини, раковини, непровари, включення), але й у вимірюванні параметрів, що визначають його експлуатаційні характеристики на міцність і герметичність.

Як відзначалось раніше, традиційний підхід до забезпечення якості згвинчування різьбових з'єднань на практиці не задовольняє повною мірою зростаючі вимоги до міцності та герметичності різьбових з'єднань трубних колон. Так, у [7] було показано, що одним з найбільш об'єктивних параметрів, котрі характеризують стан різьбового з'єднання, є значення контактних тисків, які виникають у спряжених поверхнях. Було запропоновано спосіб оцінки якості різьбового з'єднання шляхом визначення величини контактного тиску акустичним методом [8, 9]. Але застосувати такий спосіб для контролю якості процесу згвинчування різьбових з'єднань в багатьох випадках важко. Це можна пояснити такими причинами:

- 1) необхідністю мати великий банк даних результатів експериментальних дослід-

жень (для всіх типорозмірів різьбових з'єднань), які описують залежність параметрів акустичного методу (амплітуди, швидкості поширення, затухання тощо) від кількості обертів та величини контактних тисків. Крім того, при цьому необхідно враховувати вплив конструктивних та технологічних факторів;

- 2) складністю реалізації такого способу контролю.

Нами запропонований спосіб контролю якості процесу згвинчування, що базується на його фізичній суті, яка полягає в особливостях залежності крутильного моменту згвинчування від величини контактного тиску та необхідності забезпечення в з'єднанні після його згвинчування певного значення радіальної деформації [10, 11].

На основі проведених досліджень встановлено, що за нові інформаційні діагностичні ознаки якості різьбових з'єднань необхідно брати: під час згвинчування – момент досягнення в найбільш навантажених елементах різьбового з'єднання напружень, близьких до межі плинності матеріалу; після згвинчування і в процесі експлуатації – величину фактичної площі дотику та рівень радіальних деформацій в з'єднаних елементах. Завдяки цьому були виконані роботи з оцінки напружено-деформованого стану різьбових з'єднань, одержані аналітичні вирази для розрахунку напружень і переміщень у різьбовому з'єднанні, розроблений новий підхід до поширення пружних хвиль у попередньо напружених матеріалах. Обґрунтована доцільність застосування акустичного методу неруйнівного контролю для вимірювання цих параметрів. Теоретично та експериментально встановлено характер взаємозв'язку між експлуатаційними характеристиками різьбових з'єднань і параметрами акустичного методу контролю.

Одержали подальший розвиток і методи визначення фізико-механічних характерис-

тик (ФМХ) металевих конструкцій тривалої експлуатації. Зокрема, питанням розробки технології та технічних засобів неруйнівного контролю конструкційних матеріалів присвячена значна кількість робіт вітчизняних та зарубіжних авторів. Найбільш відомі роботи Інституту доктора Ферстера (Німеччина), російських науковців *В. Г. Герасімова, Е. С. Горкунова, М. Н. Міхеєва, Н. Н. Зацепіна, М. А. Мельгуя, А. Л. Дорофєєва, С. В. Вонсовського, А. І. Нікітіна, М. Ю. Натикана*, наших співвітчизників *Б. В. Копея, Л. А. Бахтаннікова, М. А. Яцуна, С. М. Маєвського, А. С. Чернова, М. І. Сухого, О. П. Осташа, А. Я. Тетерка, В. М. Учаніна* та ін.

У роботах названих авторів було показано, що найефективнішими методами контролю ФМХ феромагнітних матеріалів є електромагнітний вихорострумний та магнітний методи, які широко реалізовані в приладах для вимірювання зазвичай твердості різноманітних матеріалів. Але описані в публікаціях технічні засоби контролю практично не можуть бути застосовані для контролю нафтогазового обладнання в умовах експлуатації через наявні недоліки, а саме: необхідність забезпечення електричного контакту з контрольованим об'єктом; високі вимоги до чистоти обробки ($R_z = 40$) поверхні деталі, що підлягає контролю; неможливість контролю виробів з криволінійними поверхнями [11, 12, 13, 14, 15].

Необхідно зазначити, що на сьогодні існує широке коло невирішених питань, які виникають під час контролю виробів:

- немає методик ідентифікації марок сталей та груп міцності обладнання, що пройшло ремонт;
- відсутні методики визначення фактичного технічного стану металоємних виробів (наприклад, бурових веж) з великим терміном експлуатації за визначеними поточними ФМХ;

- недостатньо вивчене питання зміни ФМХ в залежності від терміну та умов експлуатації обладнання.

Тому на сучасному етапі розвитку нафтогазової галузі необхідні нові підходи до розробки технології та технічних засобів, що повинні забезпечувати неруйнівний контроль основних ФМХ обладнання на протязі всього періоду їх експлуатації і визначення за його результатами фактичного технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу нафтогазового інструмента і обладнання.

Першим кроком у вирішенні поставленої задачі є розробка технічних засобів, за допомогою яких можна було би набрати достатній експериментальний матеріал для виявлення характеру залежностей між окремими ФМХ та інформативними параметрами неруйнівних методів контролю [16, 17].

У процесі розробки приладу для контролю межі плинності обладнання як базовий був взятий вихорострумний прилад типу СІГМА-Т, призначений для контролю груп міцності труб нафтового сортаменту (ТНС) діаметрами 60–168 мм. Перевагою модернізованого приладу є те, що контроль здійсню-

ється без попередньої підготовки контрольованої поверхні (очищення від бруду, мастил, окалини, іржі і т. ін.), що досягається за рахунок вибору оптимального моменту відбору інформації з кривої власних затухаючих коливань вихідного сигналу вихорострумного перетворювача (ВСП) – вершина першої півхвилі другого півперіоду при максимальному усуненні впливу зазору між перетворювачем та поверхнею контрольованих труб [18].

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що в даному випадку найбільш доцільним є застосування накладного диференційного трансформаторного ВСП, який дає можливість компенсувати вихідну напругу перетворювача, зумовлену первинним та вторинним електромагнітними полями. Однак асиметрія параметрів ВСП, зумовлена основними та "паразитними" параметрами (впливом взаємної індуктивності обмоток, їх ємностей і т. п.) і конструктивними особливостями ВСП (неідентичністю першої та другої первинних та вторинних обмоток, їх неспіввісністю та перекосами котушок) обмежує глибину компенсації. У зв'язку з цим було поставлене завдання одержати кількісну оцінку впливу кожного з вищезазначених пара-

$$\begin{aligned}
 K_{1-4(s)} = & \left\{ \frac{M_1}{sL_1L_2} \left[\left(s(C_1 + C_1') + \frac{1}{sL_1} + \frac{1}{sL_1'} \right) \left(s(C_2 + C_2') + \frac{1}{sL_2} + \frac{1}{sL_2'} \right) - \right. \right. \\
 & - \left(sC_2 + \frac{1}{sL_2} \right) \left(s(C_1 + C_1') + \frac{1}{sL_1} + \frac{1}{sL_1'} \right) - \left(sC_1 + \frac{1}{sL_1} \right) \left(s(C_2 + C_2') + \frac{1}{sL_2} + \frac{1}{sL_2'} \right) - \\
 & \left. \left. - \left(sC_1 + \frac{1}{sL_1} \right) \left(s(C_2 + C_2') + \frac{1}{sL_2} + \frac{1}{sL_2'} \right) \right] + \left(sC_1' + \frac{1}{sL_1} \right) \left(sC_2 + \frac{1}{sL_2} \right) \left(\frac{M_1}{L_1L_2} - \frac{M_1'}{sL_1L_2'} \right) \right\} \times \\
 & \times \left[\left(sC_2 + \frac{1}{sL_2} \right) \left(sC_2' + \frac{1}{sL_2'} \right) \left(s(C_1 + C_1') + \frac{1}{sL_1} + \frac{1}{sL_1'} \right) \right]^{-1},
 \end{aligned} \tag{13}$$

де s – оператор Лапласа; L_1, L_1', C_1, C_1' – відповідно індуктивності та паразитні ємності першої та другої первинних обмоток ВСП; L_2, L_2', C_2, C_2' – відповідно індуктивності та паразитні ємності першої та другої вторинних обмоток ВСП; M_1 – взаємна індуктивність між первинними та вторинними обмотками ВСП.

метрів. Це дасть можливість виявити ті параметри, які мають найбільший вплив на глибину компенсації і вжити необхідних заходів для його зменшення на стадіях проектування і виготовлення ВСП.

Оскільки перетворювач працює на високій частоті і довжина проводу обмоток у нього невелика, то для спрощення розрахунку вплив активного опору на асиметрію основних і паразитних параметрів ВСП не враховувався. Для оцінки впливу асиметрії основних та паразитних параметрів ВСП було визначено коефіцієнт передачі з входу на вихід ВСП за допомогою методу графів. У результаті було отримано вираз для передавальної функції ВСП (див. (13)).

Тут не врахована прохідна ємність між першими і другими первинними та вторинними обмотками C_{π} , оскільки аналіз її впливу проводився окремо.

На підставі виразу (34) показано, що за повної симетрії ВСП, тобто, якщо $C_1 = C_1'$; $C_2 = C_2'$; $L_1 = L_1'$; $L_2 = L_2'$, передавальна функція $K_{1-4(s)} = 0$. Отже, наявність паразитних параметрів не впливає на глибину компенсації, а впливає асиметрія як основних так і паразитних параметрів.

З урахуванням виразу (13) була проведена оцінка впливу окремих факторів на коефіцієнт передачі з вузла 1 у вузол 4 для накладного диференціального трансформатор-

ного перетворювача. При цьому припускалося, що інші фактори не діють.

Результати оцінки впливу окремих факторів на модуль коефіцієнта передачі наведено на рис. 4. Аналіз показав, що найбільший вплив має асиметрія індуктивностей (*лінія 1*), причому із зростанням частоти цей вплив збільшується. Дещо менше впливає прохідна ємність (*лінія 2*) і асиметрія взаємних індуктивностей ΔM (*лінія 3*). Найменший вплив має асиметрія паразитних ємностей (*лінія 4*). Сумарний вплив усіх факторів на коефіцієнт передачі (*лінія 5*) є значно меншим від впливу деяких окремих факторів. Очевидно, що тут відбувається взаємна компенсація впливів.

На базі отриманих результатів розроблені:

- завадостійкий прилад для визначення межі плинності нафтогазового обладнання та інструмента "СІГМА-5Т" [18];
- методика ідентифікації марки сталі і групи міцності обладнання на основі визначених ФМХ та твердості і відсоткового вмісту вуглецю на базі теоретичних підходів нечіткої логіки;
- нова конструкція накладного ВСП, завдяки якій вплив асиметрії основних і паразитних параметрів на його вихідний сигнал виключається вже на стадії конструювання перетворювача;
- методика визначення допустимого навантаження на бурову вежу на основі визначених у процесі експлуатації фактичних ФМХ матеріалу.

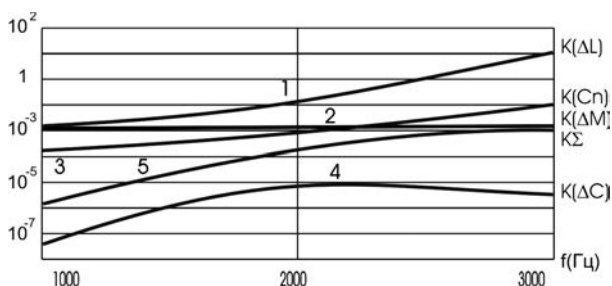


Рис. 4. Результати оцінки впливу окремих факторів на модуль коефіцієнта передачі ВСП

3. ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Результати викладених вище теоретичних та експериментальних досліджень реалізовані в комплексі технічних засобів і технологій неруйнівного контролю обладнання, які виконувались у відповідності до "Національної програми "Нафта і газ України" до 2010 року" [19] та галузевих науково-технічних програм

Інновації при видобуванні та транспортуванні природного газу

на 1997–2001 рр. та 2002–2007 рр. "Створення, освоєння серійного випуску та впровадження у виробництво комплексу технічних за-

собів і технологій неруйнівного контролю та технічної діагностики (НКтаТД) трубних колон, бурового та нафтогазопромислового об-



а)



б)

Рис. 5. Пересувна лабораторія ПЛНК-2 (а) та її внутрішній бар'єр (б)



а)



б)

Рис. 6. Пересувна лабораторія ПЛНК-5 (а) та її внутрішній бар'єр (б)



а)

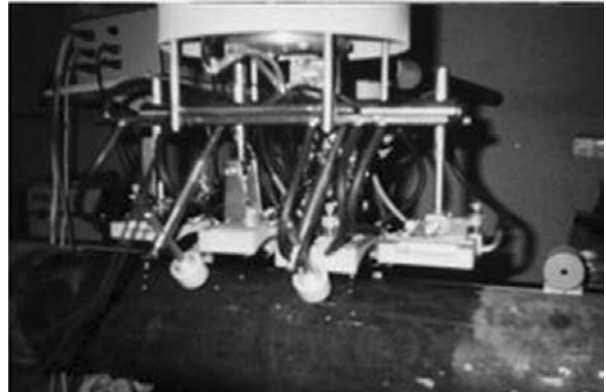


б)

Рис. 7. Автоматичний комплекс неруйнівного контролю АКНК-1 (а) та пульт управління (б)



а)



б)

Рис. 8. Стационарна дефектоскопічна установка для комплексного механізованого контролю обсадних труб COT-1 (*а*) та сканер для неї (*б*)

ладнання та інструмента при розробці нафтогазових родовищ на суші та морських акваторіях". Виходячи з вимог виробництва, технічні засоби розроблялися в різних конструктивних варіантах, а саме: стаціонарні, пересувні, переносні, окремі прилади та сервісні пристрої. Так, для районів буріння, де свердловини розташовані відносно компактно і є можливість автомобільного зв'язку, раціонально застосовувати пересувні лабораторії (рис. 5, 6) на базі автомобілів з двома ведучими мостами (УАЗ-3741, ГАЗ-66 та ін.) – лабораторії ПЛНК-2, ПЛНК-5 [16, 17].

Для баз виробничого обслуговування були розроблені стаціонарні установки (рис. 7, 8),

які дають можливість проводити комплексний неруйнівний контроль якості труб нафтового сортаменту-установки COT-1 [18] та АКНК-1 [21].

Стаціонарна установка COT-1 (рис. 9) призначена для неруйнівного контролю в таких режимах:

режим автоматичного сканування:

- виявлення дефектів поперечної та поздовжньої орієнтації в тілі труб;
- безперервне вимірювання товщини тіла труб;

режим ручного сканування:

- виявлення дефектів поперечної орієнтації в різбовій ділянці COT;



Рис. 9. Переносна установка контролю якості згинчування різбових з'єднань УКС-1



Рис. 10. Переносна установка контролю герметичності різбових з'єднань обсадних труб Контакт-1

- визначення ФМХ (груп міцності) обсадних труб.

Установка складається з електромеханічної (механізм обертання і подачі труб та пульт управління) та електронно-акустичної (акустичні прилади для неруйнівного контролю, блок сигналізації та блок обробки і реєстрації на базі промислового комп'ютера) частин.

Внаслідок збільшення об'ємів глибокого буріння у важкодоступних нафтогазовидобувних районах Сибіру, Середньої Азії, Кавказу, на континентальному шельфі, де використання пересувних лабораторій, а також стаціонарних установок типу СОТ-1 недоцільне, виникла необхідність виготовляти пе-



а)



б)

Рис. 11. Прилад для визначення ФМХ сталених бурильних і насосно-компресорних труб СІГМА-Т (а) та товщиномір-приставка ПТУ-2 (б)

реносні мобільні установки, які можна було б доставляти до місця розробок будь-яким видом транспорту (вертоліт, катер, тягач). Тому були розроблені переносні малогабаритні установки типу "Зонд", УКС-1 [20, 21], "Контакт-1" [21, 22, 23] (рис. 9 та 10 відповідно).

У процесі теоретичних і експериментальних робіт арсенал засобів і технологій контролю постійно поповнювався. Розроблені на їх основі прилади використовувалися для комплектації раніше виготовлених пересувних лабораторій та переносних установок.

Нижче ми наводимо технічні засоби, призначені для неруйнівного контролю ряду основних показників якості бурового і нафтогазового обладнання й інструмента, а саме:

- дефектів типу порушення суцільності металу (тріщини, в т. ч. і корозійновтомні; раковини; пори; непровари та ін.);
- геометричних характеристик (товщина стінки; ступінь зносу, в т. ч. корозійного; овальність тощо);
- ФМХ (межа плинності; твердість; коерцитивна сила; магнітна проникність та ін.);
- міцності та герметичності різьбових з'єднань з натягом.

Для реалізації розроблених способів неруйнівного контролю трубних колон було розроблено ряд засобів (ПТУ-2, СІГМА-5Т, ряд сканерів та п'єзоперетворювачів), які дають змогу виявляти дефекти поздовжньої та поперечної орієнтації в тілі труб та дефекти поперечної орієнтації в різьбовій частині труб.

Прилад для визначення ФМХ сталених бурильних і насосно-компресорних труб СІГМА-5Т (рис. 11, а) призначений для проведення надійного безконтактного неперервного контролю груп міцності і визначення межі плинності нових і тих, що були в експлуатації сталених бурильних і насосно-компресорних труб з умовним діаметром від 60 до 140 мм [18].

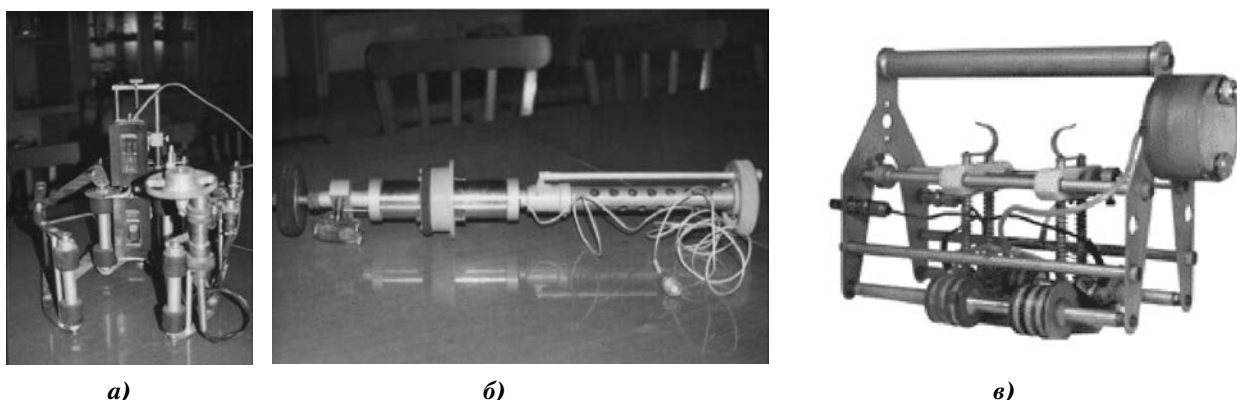
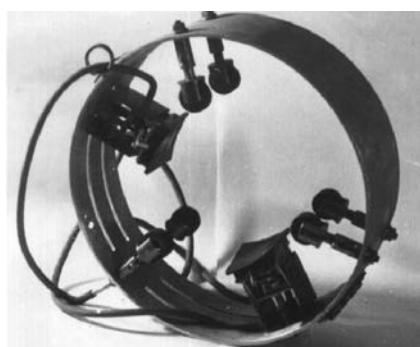


Рис. 12. Сканер для контролю якості згинчування різьбових з'єднань (а); блок акустичний АБ-ВБТ-РЖ (б); сканер для контролю герметичності різьбових з'єднань насосно-компресорних труб (в)

Товщиномір-приставка ПТУ-2 (рис. 11, б) розроблений для роботи разом з ультразвуковим дефектоскопом УД2-12, що дає можливість одночасно проводити і вимірювання



а)



б)

Рис. 13. Сканери різної конструкції для кріплення ультразвукових перетворювачів

товщини стінки виробу, і контроль наявності корозії його внутрішньої поверхні, а також дефектів заводського та експлуатаційного походження, що недоступні для візуального спостереження [29]. Можливість спостереження ехо-сигналів на екрані ультразвукового дефектоскопу дає змогу оператору підвищити достовірність оцінки якості контролюваного виробу (конструкції). Для автономної перевірки працездатності і налагодження приладу передбачено імітатор товщини. Приставка ПТУ-2 має аналоговий вихід для підключення стандартного реєструючого пристрою. Як контактна рідина використовується технічна вода.

На рис. 12, а показано сканер для контролю якості згинчування різьбових з'єднань [24, 25], на рис. 12, б – акустичний блок АБ-ВБТ-Р, що використовується для дефектоскопії зсередини різьбових кінців ВБТ [27].

Сканер для контролю герметичності різьбових з'єднань насосно-компресорних труб (рис. 12, в) призначений для проведення контролю ультразвуковим луно-імпульсним методом герметичності різьбових з'єднань гладких та з висадженими назовні кінцями НКТ і муфт до них.

Сканери різної конструкції (рис. 13) служать для розміщення і закріплення в них

п'єзоперетворювачів (ПЕП) під час контролю труб різних типорозмірів і для забезпечення надійного акустичного контакту шляхом щільного притискання робочої поверхні ПЕП до труби [32, 33].

Описані засоби впроваджені практично на всіх бурових і нафтогазовидобувних підприємствах України та на підприємствах нафтогазового комплексу країн СНД.

4. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ НК І ТД

Неруйнівний контроль ґрунтовно увійшов у практику оцінки якості нафтогазового та бурового обладнання і інструмента як штатна

операція. Якість НК і ТД – це забезпечення достовірності отриманої в процесі контролю інформації, яка ґрунтується на високому рівні:

- методик проведення контролю, що встановлюють вимоги до показників якості і критеріїв відбракування проконтрольованого обладнання;
- засобів контролю, їх технічного стану, в т. ч. стандартних зразків і технологічних матеріалів;
- кваліфікації фахівців, що проводять контроль;
- організації та мотивації праці.

Тільки підтримуючи високий рівень якості цих складових, можна досягти високої

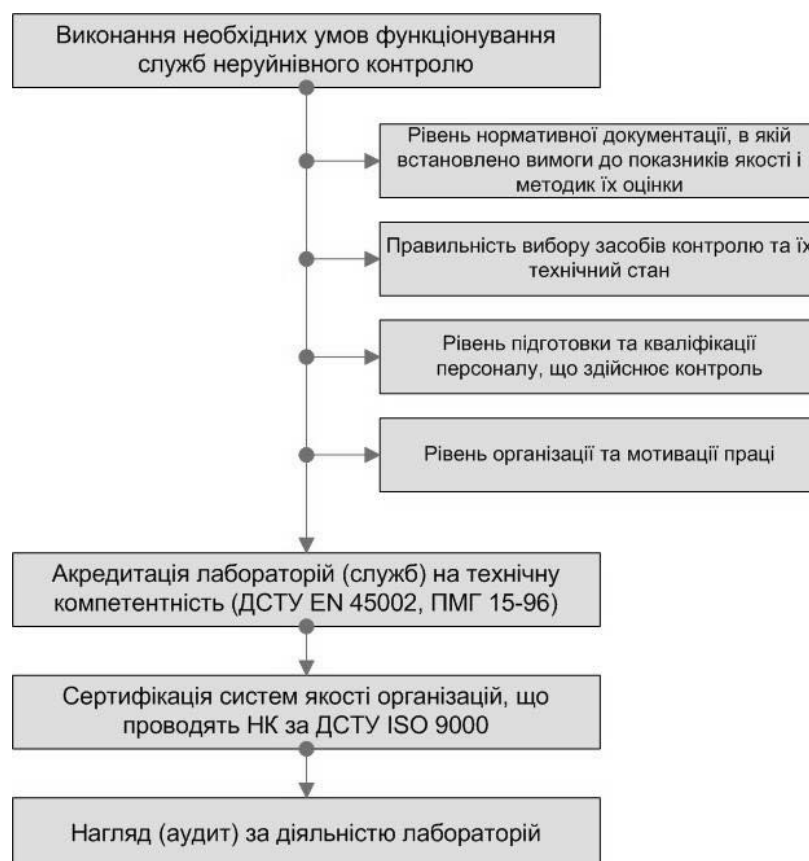


Рис. 14. Схема забезпечення якості неруйнівного контролю

ефективності застосування засобів неруйнівного контролю. Загалом комплекс заходів по забезпеченню якості неруйнівного контролю зображено на схемі (рис. 14).

4. МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Нами розроблено, затверджено та впроваджено у виробництво понад 30 нормативних документів різного рівня, які регламентують технологію проведення неруйнівного контролю основних видів нафтогазового обладнання.

Цими документами регламентовано:

- бракувальні критерії по кожному об'єкті контролю;
- методи та обладнання для контролю;
- методики контролю всіх типів труб, що знаходяться в експлуатації;
- періодичність НР;
- методи ідентифікації проконтрольованих виробів;
- алгоритм дії персоналу після проведення контролю.

Надаємо перелік діючих основних нормативних документів:

- ДСТУ 320.02829777.001-95 Положення про службу неруйнівного контролю в нафтовій і газовій галузях. – Держнафтогазпром України, 1996;
- ДСТУ 320.02829777.002-95 Інструкція по проведенню неруйнівного контролю на різних трубах нафтового сортаменту в процесі їх експлуатації. – Держнафтогазпром України, 1996;
- ДСТУ 320.02829777.013-99 Рекомендації щодо проведення неруйнівного контролю бурового обладнання. – Міністерство енергетики України, 2000;
- ДСТУ 320.02829777.014-99 Неруйнівний контроль та оцінка технічного стану металоконструкцій бурових веж у розібраному і зібраному станах. – Міністерство енергетики України, 2000.

На даний час в стадії розробки є такі нормативно-технічні документи:

- СТП 320.00135390.069-2002 "Методика технічного діагностування для продовження терміну експлуатації відамортизованого обладнання для видобутку нафти і газу";
- СТП 320.00135390.070-2001 "Методика технічного діагностування для продовження терміну експлуатації технологічного транспорту і спецтехніки";
- СТП 320.00135390.071-2002 "Методика технічного діагностування для продовження терміну експлуатації обладнання для ремонту свердловин";
- СТП 320.00135390.066-2002 "Діагностування фонтанних арматур, колонних головок та іншого гирлового обладнання";
- СТП 320.00135390.067 "Оцінка технічного стану вежових підйомників для збирання баштових веж (ПВК-1, ПВУ-35, ПВ2-45, ПВ-5-60) та механізмів підйому щоглових веж";
- СТП 320.00135390.068 "Оцінка фактичного технічного стану основ бурових веж";
- ДСТУ "Оцінка технічного стану колонної головки та фонтанної арматури з метою продовження строку їх експлуатації";
- СТП "Оцінка технічного стану насосних штанг".
- ДСТУ 4001-2000 "Еталонний зразок для калібрування при ультразвуковому контролі".
- ДСТУ 4002-2000 "Зварні шви по сталі. Еталонний зразок № 2 для ультразвукового контролю зварних швів".
- СОУ 11.1-20077720.:2004 "Арматура фонтана; головки колонні. Контроль технічного стану. Методи неруйнівні".

Впровадження цих технічних засобів і методик на бурових підприємствах і базах виробничого обслуговування підприємств нафтогазової галузі України дали змогу підвищити рівень експлуатаційної безпеки

обладнання шляхом оцінки його фактичного технічного стану та продовження терміну експлуатації, що призвело до зменшення кількості аварій, пов'язаних з відмовами та поломками обладнання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 11.06.2003 р. № 351-р "Про схвалення Концепції Державної програми забезпечення технологічної безпеки в основних галузях економіки".
2. Постанова Кабінету Міністрів України від 8.10.2004 р. № 1331 "Про затвердження Державної науково-технічної програми "Ресурс".
3. Інформація про перше засідання Міжвідомчої комісії з питань науково-технологічної безпеки при Раді національної безпеки і оборони України від 14.02.02 р. // Офіційна веб-сторінка РНБО України (<http://www.rainbow.gov.ua>).
4. Механіка руйнування і міцність матеріалів. // В посібнику: Під загальною ред. **В. В. Панасюка**. – К.: Наук. думка, 1988. – Т. 5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. **З. Т. Назарчука**. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. – 1134 с.
5. **Криничний П. Я., Карпаш О. М., Кійко Л. М.** Ультразвукова дефектоскопія різевих з'єднань об'єктованих бурових труб в зібраному стані. // *Методи та прилади контролю якості*. – 2000. – № 6. – С. 9–12.
6. **Карпаш О. М., Кійко Л. М.** Алгоритм розрахунку параметрів способу контролю конічних з'єднань.: В зб. "Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів". – Київ-Львів: Леотест, 2001. – С. 12–15.
7. **Бильк С. Ф.** Герметичность и прочность резьбовых соединений труб нефтяного сортамента. – М.: Недра. – 1981. – 351 с.
8. **Березовский Л. Б., Химченко Н. В.** О прохождении ультразвуковых колебаний через напряженную слоистую среду: В сб. научн. трудов НИИХИММАША. – М.: Химическое машиностроение – Вып. 67. – 1974. – С. 140–157.
9. **Химченко А. В., Бобров В. А.** Неразрушающий контроль в химическом и нефтяном машиностроении. – М.: Машиностроение, 1978. – 246 с.
10. А. с. 1728782 Способ ультразвукового контроля качества сборки соединений с натягом. // **Карпаш О. М.** – 1992, БИ № 15.
11. **Баштанников Л. А.** Неразрушающий контроль буровых и обсадных колонн в практике отечественного и зарубежного бурения. – М.: ВНИИЭгазпром, 1988. – 40 с. (Обз.информ. Сер. Бурение газовых и газоконденсатных скважин, вып. 1).
12. **Михеев М. Н., Горкунов Э. С.** Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. – М: Наука, 1993. – 252 с.
13. **Горкунов Э. С.** Магнитные приборы контроля структуры и механических свойств стальных и чугуновых изделий (обзор). // *Дефектоскопия* – 1992. – № 10. – С. 3–35.
14. **Сандовский В. А., Уваров А. И.** К вопросу об определении величины зерна вихретоковым методом. // *Дефектоскопия* – 1997. – № 10. – С. 42–43.
15. **Герасимов В. Г., Покровский А. Д., Сухорук В. В.** Неразрушающий контроль.: В кн. 3. Электромагнитный контроль: Практик. пособие. Под ред. **В. В. Сухорукова**. – М.: Высшая школа, 1992. – 312 с.
16. **Молодецкий И. А.** Визначення фізико-механічних характеристик нафтогазового інструмента. // *Методи та прилади контролю якості* – 1997. – № 1. – С. 65–66.
17. Акустические методы контроля физико-механических свойств материалов // *Обзор. Заводская лаборатория* – 1977. – № 10. – С. 1215–1222.
18. **Криничний П. Я., Молодецкий И. А.** Прилад для контролю фізико-механічних характеристик труб нафтового сортаменту СІГМА-5Т. // *Методи та прилади контролю якості* – 1998. – № 2. – С. 9–10.
19. Національна програма "Нафта і газ України" до 2010 року. - К.: 1993. – 62 с.
20. **Карпаш О. М., Криничний П. Я., Молчанов М. О.** Пересувна установка для комплексного НК нафтогазового інструмента та обладнання.: В зб. "Фізичні методи та засоби контролю середовища матеріалів", вип. 5, Київ-Львів, 2000. – С. 28–31.
21. **Карпаш О. М., Крыжановский Е. И., Молодецкий И. А.** Неразрушающий контроль и техническая диагностика бурового и нефтепромыслового оборудования. // XII International scientific-technical conference, Sracow. 21–22 June, vol. 1, 2001. – С. 205–208.
22. **Карпаш О. М., Даниляк Я. В., Молодецкий И. А., Молчанов М. О.** Стационарная установка "Сот-1" для автоматизированного НК стану обсадных труб. // *Техн. диагностика* – 1999. – № 4. – С. 80–83.
23. **Карпаш О. М., Криничний П. Я., Козоріз А. В.** Автоматизированный комплекс неруйнівного контролю бурового інструмента АКНК-1. // *Методи та прилади контролю якості*. – 2000. – № 6. – С. 15–18.
24. **Карпаш О. М., Ильницкий Й. В., Степура А. И.** Ультразвуковое устройство для измерения контактных давлений. – А.с. № 1746297 /СССР/ БИ № 25, 1992 г.

Інновації при видобуванні та транспортуванні природного газу

25. **Карпаш О. М., Даниляк Я. Б., Кийко Л. Н.** Способ разборки замковых соединений бурильных труб. – Патент України, № 2362.
26. **Карпаш О. М., Криничний П. Я., Молчанов М. О., Вісков О. В.** Мобільні засоби комплексного контролю якості труби. // Матеріали 6-ї Міжнародної конференції "Нафта і газ 2000". – Івано-Франківськ, 2000. – С. 206–208.
27. **Карпаш О. М., Бажалук Я. М., Молчанов Н. О., Смерека А. С.** Способ ультразвукового контроля контактных напряжений. – А.с. № 1719980, БИ №14, 1992 г.
28. **Карпаш О. М., Зинчак Я. М., Даниляк Я. Б., Кийко Л. Н.** Способ разборки замковых соединений бурильных труб. – Патент Российской Федерации, № 2039201.
29. **Карпаш О. М., Криничний П. Я.** Прилади для безперервного вимірювання товщини стінки металоконструкції. // Матеріали конференції "Сучасні прилади, методи і технології неруйнівного контролю". – Івано-Франківськ, 1996. – С. 59–60.
30. **Карпаш О. М.** Способ ультразвукового контроля качества сборки соединений с натягом. – А.с. № 1728782 /СССР/ БИ № 23, 1992 г.
31. **Карпаш О. М., Футерко Л. Б., Молчанов Н. А., Зинчак Я. М.** Устройство для ультразвукового контроля труб с внутренней стороны. – А.с. № 1610367 /СССР/ БИ № 44,1990 г.
32. **Карпаш О. М., Ковалив Б. И.** Устройство неразрушающего контроля цилиндрических изделий. – А.с. № 1783417/СССР/, БИ №47, 1992 г.
33. **Карпаш О. М., Ковалив Б. И.** Устройство неразрушающего контроля цилиндрических изделий // – А.с. 1783417/СССР/ БИ № 47,1992.