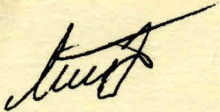


656.13.06

Л 96

Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу



Лютак Ігор Зіновійович

656.13.06(043)

УДК 622.691.4.002.5

Л 96

**РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ТА ПРИСТРОЮ ДЛЯ КОНТРОЛЮ
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ
АВТОМОБІЛЬНИХ ГАЗОНАПОВНЮЮЧИХ КОМПРЕСОРНИХ
СТАНЦІЙ**

05.11.13 – Прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертацією є рукопис

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



Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор

Кісіль Ігор Степанович,

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,

завідувач кафедри методів та приладів контролю якості і сертифікації продукції.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Копей Богдан Володимирович,

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, викладач кафедри нафтогазового обладнання.

кандидат технічних наук, доцент

Вашкурак Юрій Зеновійович,

Національний університет "Львівська політехніка",

викладач кафедри автоматизації хіміко-технологічних процесів.

Провідна установа: Науково-дослідний інститут "Система" Державного комітету технічного регулювання та споживчої політики (м. Львів).



За 00 год. на засіданні спеціалізованої

вч національному технічному

ун ТЕХНІЧНИЙ

76 І ГАЗУ

3 на ськ,

ву

Ав

Вч М.

кал

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для забезпечення надійності експлуатації обладнання газонаповнюючих компресорних станцій (АГНКС) розроблені заходи, які регламентуються нормативними документами, але вони недостатні, так як не враховують усіх структурних факторів впливу.

Сучасні вимоги до експлуатаційної надійності трубопроводів диктують необхідність комплексного підходу як до проектування і будівництва трубопроводів АГНКС, так і до їх технічного обслуговування, діагностики, ремонту при експлуатації. Не дивлячись на вдавану простоту конструкції технологічних трубопроводів АГНКС, вихід їх із ладу (відмова, руйнування) під час експлуатації в поєднанні з високим в них тиском газу може призвести до великих матеріальних збитків, забруднення навколишнього середовища, людських жертв, так як зона розподілу наслідків руйнування може поширитися на великі віддалі.

Існує багато деструктивних впливів, що змінюють технічний стан АГНКС, таких як старіння металу, вібрація трубопроводів, корозія металу стінок труб, просідання фундаментів компресорних установок, зсуви ґрунту, які діють в експлуатаційних умовах. Об'єктивна дія вище вказаних чинників і тривалий термін експлуатації приводить до зміни технологічних параметрів обладнання. Визначення рівня вібрацій трубопроводів, контроль товщини їх стінок, дефектоскопія зварних з'єднань, що проводиться згідно нормативних документів є недостатнім для забезпечення надійної експлуатації АГНКС, так як вказані параметри дуже опосередковано характеризують технічний стан. Тому важливим напрямком цілісної оцінки технічного стану обладнання АГНКС є контроль фізико-механічних параметрів трубопроводів високого тиску, основним із яких є їх напружено-деформований стан (НДС). Варто зазначити, що наявність інформації про величину напруження в стінках металу труб, порівняння його з допустимим значенням вирішує проблему надійності самих трубопроводів та компресорної станції в цілому.

Завдяки розробці і впровадженню нової методики і технічних засобів діагностування технологічного обладнання АГНКС в експлуатаційних умовах можна забезпечити їх конструктивну надійність та збільшити термін експлуатації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась згідно з планами науково – дослідного інституту нафтогазових технологій Івано – Франківського національного технічного університету нафти і газу (госпдоговірна тема № 5/2000 "Контроль напружено – деформованого стану трубопроводів високого тиску" згідно з договором Управління магістральних трубопроводів "Черкаситрансгаз").

Мета роботи полягає в розробці методики та пристрою для проведення контролю технічного стану технологічних трубопроводів АГНКС.

Для досягнення
– проаналізуват
стану трубопроводів п



но вирішити такі **задачі**:
йнівного контролю технічного
ічних навантажень;

– розробити математичну модель контролю НДС технологічних трубопроводів АГНКС, яка враховує динамічні та статичні навантаження визначені ультразвуковим методом;

– удосконалити метод вимірювання часу поширення ультразвуку для підвищення його точності;

– провести теоретичні та експериментальні дослідження характеристик електроакустичного тракту ультразвукового первинного перетворювача та взаємозв'язку форми його діаграми направленості від параметрів акустичного поля в режимі випромінювання в дальній зоні;

– дослідити залежності геометричних та фізичних параметрів акселерометра для підвищення точності контролю параметрів вібрації;

– розробити методику та пристрій контролю НДС технологічних трубопроводів АГНКС ультразвуковим методом для визначення оптимальних параметрів їх експлуатації;

– розробити алгоритми та програмне забезпечення для обчислення статичних та динамічних напружень технологічних трубопроводів АГНКС;

– провести лабораторні та натурні дослідження НДС трубопроводів АГНКС розробленими методикою та пристроєм для визначення їх залишкового ресурсу.

Об'єкт дослідження є технологічні трубопроводи АГНКС.

Предмет дослідження є методи та засоби контролю технічного стану технологічних трубопроводів АГНКС.

Методи дослідження. Встановлення взаємозв'язків між часом поширення ультразвуку та НДС технологічних трубопроводів АГНКС здійснювалось за допомогою методів теорії акустопружності. При розробці технічних засобів використовувались методи схемо- та системотехніки. Дослідження процесів, які відбуваються при статичних та динамічних навантаженнях ґрунтуються на методах опору матеріалів. Дослідження характеристик первинних п'єзоелектричних перетворювачів ґрунтуються на методах фізичної акустики.

Наукова новизна отриманих результатів:

– вперше розроблена математична модель контролю напружено-деформованого стану технологічних трубопроводів АГНКС під дією **статичних** навантажень ультразвуковим методом, яка дозволяє **визначати** існуючі статичні напруження для оцінки міцності й залишкового ресурсу даних трубопроводів в експлуатаційних умовах без використання зразків металу труб з визначенням їх механічних характеристик;

– вперше розроблена математична модель контролю напружено-деформованого стану технологічних трубопроводів АГНКС, яка враховує як статичні, так і динамічні навантаження, що дозволяє визначати максимальні діючі напруження в даних трубопроводах;

– дістав подальшого розвитку метод **визначення** часу поширення ультразвуку, що дозволяє підвищити точність та чутливість вимірювання;

– вперше отримано аналітичну залежність, яка пов'язує електричні параметри збуджуючого імпульсу, луносигналу та такі акустичні характеристики, як чутливість по тиску, акустичні імпеданси демпфера, чутливого елемента, протектора і об'єкта контролю, що дає можливість розробляти п'єзоелектричні перетворювачі з оптимальними характеристиками цих конструктивних елементів;

– вперше отримані аналітичні залежності власної частоти акселерометра від його геометричних і фізичних параметрів, що дає можливість підвищити точність контролю параметрів вібрації при визначенні динамічних навантажень на технологічні трубопроводи АГНКС;

– вперше створено математичну модель акустичної прозорості контактних меж між п'єзоелектричним перетворювачем і поверхнею об'єкта контролю, що дає можливість врахувати вплив шорохуватості та товщини контактного шару при визначенні часу поширення ультразвуку.

– вперше отримано аналітичну залежність між формою акустичного поля чутливого елемента ультразвукового первинного перетворювача в режимі випромінювання в дальній зоні та формою зондуючого імпульсу, що дає можливість регулювати форму поля випромінювання перетворювача в залежності від акустичних характеристик об'єкта контролю.

Практичне значення отриманих результатів. У результаті проведеної теоретичної, методологічної та експериментальної роботи були отримані наступні практичні результати:

– розроблено пристрій "Сігма-5" для контролю напружень у технологічних трубопроводах АГНКС, який реалізовує запропоновану методику контролю;

– розроблено програмне забезпечення мовами Visual C++, Franklin C та Assembler, за допомогою якого реалізуються алгоритми обчислення статичних і динамічних напружень у стінках технологічних трубопроводів АГНКС; запам'ятовування результатів контролю; передача даних від пристрою до персонального комп'ютера; представлення результатів контролю в графічній та табличній формах;

– проведено контроль технічного стану трубопроводів АГНКС №1 та №2 (м. Кременчук). Результати оцінки НДС, висновки і розроблені рекомендації представлені в Управління магістральних газопроводів "Черкаситрансгаз";

– розроблена методика впливу окремих факторів на величину НДС трубопроводів високого тиску;

– отримані теоретичні та практичні результати роботи використовуються в навчальному процесі при курсовому і дипломному проектуванні із студентами спеціальності 7.090903 – "Методи та прилади контролю якості і сертифікації продукції" з дисципліни "Акустичний контроль".

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно:

– проаналізовано методи і засоби неруйнівного контролю технічного стану трубопроводів під дією статичних і динамічних навантажень;

– розроблено математичну модель контролю НДС технологічних трубопроводів АГНКС, яка враховує динамічні та статичні навантаження визначені ультразвуковим методом [3, 4, 6, 8, 11, 14];

– удосконалено метод вимірювання часу поширення ультразвуку для підвищення його точності [5, 7, 10];

– проведено теоретичні та експериментальні дослідження характеристик електроакустичного тракту ультразвукового первинного перетворювача та взаємозв'язку форми його діаграми направленості від параметрів акустичного поля в режимі випромінювання в дальній зоні [9];

– розроблено математичну модель акустичної прозорості контактних меж між п'єзоелектричним перетворювачем і поверхнею об'єкту контролю [2];

– отримано аналітичні залежності власної частоти акселерометра від його геометричних і фізичних параметрів, що дає можливість підвищити точність контролю параметрів вібрації при визначенні динамічних навантажень на технологічні трубопроводи АГНКС [1];

– розроблено методику та пристрій контролю НДС технологічних трубопроводів АГНКС ультразвуковим методом для визначення оптимальних параметрів їх експлуатації [10, 12, 15];

– розроблено ультразвуковий первинний перетворювач для вимірювання швидкості поширення ультразвуку [9, 13];

– розроблено алгоритми та програмне забезпечення для обчислення статичних та динамічних напружень технологічних трубопроводів АГНКС;

– проведено лабораторні та натурні дослідження НДС трубопроводів АГНКС розробленими методикою та пристроєм для визначення їх залишкового ресурсу.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні та експериментальні результати обговорювались на науково – технічних конференціях “Сучасні прилади, матеріали і технології для НК і ТД промислового обладнання” (м. Івано - Франківськ, 1999 р.), “VIII науково-технічна конференція. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах” (м. Хмельницький, 2001 р.), “Прилади НК і ТД” (м. Славське, Львівської обл., 2000 р.), “Приладобудування 2002: підсумки і перспективи” (м. Київ, 2002 р.), “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання”, (м. Івано-Франківськ, 2002 р.), “Нафта і газ України 2002” (м. Київ, 2002), на наукових семінарах кафедри МПКЯ і СП ІФНТУНГ (2000 - 2002 рр.).

Публікації. Результати роботи опубліковувались у 7 статтях фахових наукових журналів (1 стаття одноособова); у 5 збірниках матеріалів і тез н/т конференцій, двох патентах України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, що налічує 98 найменувань і 18 додатків. Основний зміст дисертації викладено на 153 сторінках. Робота містить 15 таблиць, 47 рисунків і 18 додатків, які займають 19 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі показано актуальність теми дисертації, її зв'язок з дослідними програмами, сформульовано мету та визначено задачі дослідження, висвітлено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, подано відомості про особистий внесок здобувача та апробацію результатів роботи.

В першому розділі дано загальні положення оцінки технічного стану технологічних трубопроводів АГНКС. Охарактеризовано умови роботи (метал трубопроводу протягом всього терміну експлуатації є під дією значних навантажень двохосного напруженого стану з різними відношеннями кільцевих і поздовжніх напружень, у ньому практично неминуче присутні різні концентратори напружень, трубопроводи сприймають велику кількість енергії газу, що перекачується, та зумовлює їх високу схильність до руйнувань, особливо під дією динамічних навантажень) та фактори впливу на технічний стан технологічних трубопроводів АГНКС (великого градієнту температур, перепадів тиску від 0,6 до 24,5 МПа).

В даному розділі проведено аналіз відомих методів контролю технічного стану трубопроводів. В результаті проведеного аналізу показано, що існуючі методи контролю технічного стану трубопроводів АГНКС мають ряд недоліків, так як не враховують залишкових напружень, динамічних навантажень та не є достатньо точними. Розробка нових методик для контролю технічного стану технологічних трубопроводів АГНКС є важливою задачею.

В роботі проаналізовано основні пристрої та показано, що їх застосування не дає можливості створити достовірну модель технічного стану технологічних трубопроводів АГНКС в експлуатаційних умовах.

В другому розділі розроблено методику оцінки НДС технологічних трубопроводів в експлуатаційних умовах. Дана методика дозволяє оцінити як статичну, так і динамічну складову НДС технологічних трубопроводів АГНКС.

Для адекватного аналізу основних параметрів, що визначають працездатність технологічних трубопроводів АГНКС, враховано чинники, які характеризують умови навантаження, а саме:

- рівень, спосіб та швидкість прикладеного зусилля;
- вплив температурного поля;
- вплив середовища.

Суттєвий вплив на режими експлуатації, надійність роботи АГНКС вносить рух газу, що транспортується по технологічних трубопроводах, який створює динамічні зусилля. У випадку резонансу за рахунок відношення прямої та відбитої хвилі інтенсивність коливань різко зростає. Хвильові процеси проходять біля рівня середніх складових потоку газу і змінюють його параметри: тиск, температуру та швидкість, які визначаються сумою середньої (стаціонарної) і динамічної складової. Для математичного опису динамічних напружень, які є наслідком описаних вище процесів в технологічних трубопроводах АГНКС, використано модель розрахунку плоскої рами. При

цьому допускається, що технологічні трубопроводи мають одну степінь свободи. В результаті, отримано математичну модель для опису динамічних напружень:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{д}} &= k_o(\sigma_r + \sigma_z) = \\ &= k_o \left(\frac{4}{\sqrt{2} \cdot \pi(D^2 - d^2)} \left(\frac{10^2 P}{R \cdot T \cdot k_c} \cdot \frac{4V^2}{36\pi(D^2 - d^2)} + P \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{c \cdot E \cdot A_0}{4L} \cdot \frac{\pi \cdot D^4}{64} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right) \right) \cdot (\sin(\theta \cdot t) + \sin(\theta \cdot t)) \end{aligned} \quad (1)$$

де c – коефіцієнт способу кріплення трубопроводу; A_0 – амплітуда коливання трубопроводу; t – час; V – витрата газу; P – тиск газу; R – газова стала; T – температура стиснутого газу; k_c – коефіцієнт стискування газу; D, d – зовнішній та внутрішній діаметри труби відповідно; L – довжина стійки ступені АГНКС; E – модуль пружності; θ – частота збуджуючої сили; k_d – коефіцієнт динамічності; σ_i – напруження, які виникають в результаті згину ступені технологічного трубопроводу АГНКС; σ_r – напруження, які виникають від дії збуджуючої сили.

Поряд із динамічними, в стінах технологічних трубопроводів АГНКС діють статичні поперечні напруження σ_i та кільцеві напруження σ_r :

$$\sigma_i = P \frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2}, \quad \sigma_r = P \cdot \quad (2)$$

Сумарне напруження, що діє в стінках технологічних трубопроводів, має такий вигляд:

$$\sigma_{\text{заг}} = \sigma_i^2 + \sigma_r^2 + \sigma_{\text{д}}^2 - \sigma_i \cdot \sigma_r - \sigma_r \cdot \sigma_{\text{д}} - \sigma_i \cdot \sigma_{\text{д}} \quad (3)$$

Графік залежності (3) для: $D = 70$ мм, $d=46$ мм, коефіцієнту способу кріплення $c=28$, тиску газу 20 МПа, температури газу 150 °С, частоти обертів валу 490 об/хв, $A_0=4$ мм представлено на рис. 1.

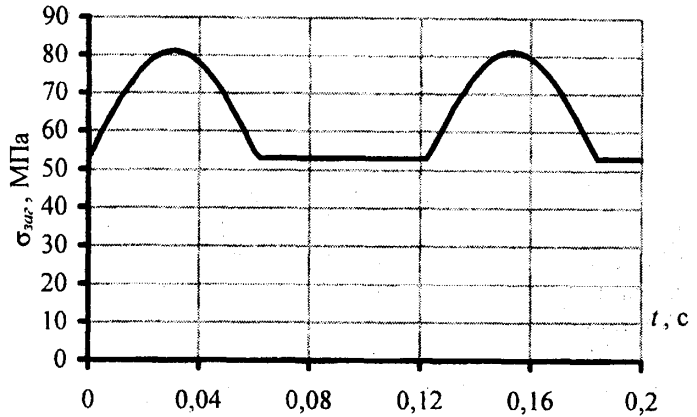
Як видно із графіка (рис. 1) динамічні зусилля, що діють на технологічний трубопровід, складають значну частину загальних навантажень, що не можна не враховувати при контролі НДС технологічних трубопроводів.

При визначенні часу проходження ультразвуку необхідно досягнути мінімального розсіювання енергії акустичного поля. Це досягається шляхом звуження діаграми направленості первинного п'єзоелектричного перетворювача (ПЕП). Як правило діаграму направленості визначають на етапі проектування (ПЕП) шляхом підбору геометричних розмірів та матеріалу чутливого елемента при визначеній формі розподілу акустичного тиску на його поверхні.

Розраховано розподіл акустичного тиску на поверхні чутливого елемента в залежності від форми заданої діаграми направленості в дальній зоні для створення необхідного акустичного поля розробленим первинним ультразвуковим перетворювачем. В загальному, розрахунок розмірів випромінювача відносно функції направленості акустичного поля був здійснений та експериментально підтверджений для радіолокаційної техніки. В даному випадку використано подібний підхід для ПЕП, який полягає в

розрахунку акустичного тиску на поверхні ПЕП із заданою діаграмою направленості.

Рис. 1. Напруження, що діють у стінках технологічних трубопроводів.



Нехай поле акустичного тиску P , розробленого ПЕП, в довільній точці (r , z) буде мати такий вигляд:

$$P(r, z, t) = -\frac{jk \exp(j\omega t)}{4\pi} \int_0^A \int_0^A P(\rho) \exp(-jkr) \left(1 + \frac{z}{r_0}\right) \rho \cdot d\rho d\varphi, \quad (4)$$

де ρ , φ , z – циліндричні координати; k – хвильове число; t – час проходження ультразвуком відстані до заданої точки; ω – кутова частота; A – довжина та ширина п'єзопластини; $r_0 = \sqrt{r^2 + z^2 + \rho^2 - 2r\rho \cdot \cos(\varphi)}$ – відстань між точкою випромінювання та спостереження.

Для того, щоб розв'язати рівняння (4), представимо його в вигляді суми функцій Бесселя першого роду, згідно методу Фредгольма для інтегральних рівнянь першого роду:

$$P(\rho) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{J_0\left(\alpha_n \frac{\rho}{A}\right)}{J_1(\alpha_n)}, \quad (5)$$

де J_1 – функція Бесселя першого роду першого порядку; α_n – n -й корінь рівняння $J_0(\alpha) = 0$, тобто $\alpha_1 = 2,4$, $\alpha_2 = 5,5$, $\alpha_3 = 8,6$.

Характеристику направленості $D(\theta)$ запишемо у вигляді:

$$D(\theta) = NA^2 A_0 \frac{J_1(kA \cdot \sin(\theta))}{kA \cdot \sin(\theta)} + NA^2 \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \begin{cases} \frac{\alpha_n J_0(kA \cdot \sin(\theta))}{\alpha_n^2 - k^2 A^2 \sin^2(\theta)}, & \alpha_n \neq kA \sin(\theta), \\ 0,5 \cdot J_1(\alpha_n), & \alpha_n = kA \sin(\theta) \end{cases}, \quad (6)$$

де N – фактор нормування. Коефіцієнти A_n можна обчислити лише числовими методами за допомогою ЕОМ.

Використовуючи залежності (5) та (6) можна розрахувати будь-яку форму акустичного поля в дальній зоні. Проте приходимо до висновку, що чим вузькіший головний пелюсток діаграми направленості акустичного поля та менші величини бічних, тим більші будуть значення доданків у формулі (5), отже, і гостріше за амплітудою акустичне поле на поверхні п'єзоелементу. Тому форму пелюстків діаграми направленості акустичного поля ПЕП необхідно задавати, виходячи з умови можливості практичної реалізації $P(\rho)$ на поверхні п'єзоелементу.

Було розраховано нормалізовану діаграму направленості квадратного чутливого елемента зі стороною 5 мм, виготовленого з кварцу Y -зрізу, частотою 5 МГц. Із збільшенням кількості доданків у формулі (6), тобто при звуженні діаграми направленості стає складнішою функція розподілу тиску на поверхні п'єзоелементу.

Для спрощення проектування акустичного поля ПЕП за допомогою залежностей (5) та (6) введено критерій вузькості Q діаграми направленості:

$$Q = \frac{D(\theta)|_{\theta=0}}{\alpha/2 \int_0 D(\theta) d\theta} \quad (7)$$

Критерій Q збільшується при звуженні головного та зменшенні величини бічних пелюстків діаграми направленості. Акустичне поле ПЕП можна розрахувати, знаходячи коефіцієнти A_n в формулі (6) при максимальному значенні Q .

Даний підхід дозволив вибрати оптимальні геометричні розміри чутливого елемента на етапі його проектування, що суттєво зменшує недоліки та час розробки. Для розробленого ПЕП даний підхід дозволяє добитись максимально ефективного розподілу акустичного поля, а також регулювання форми акустичного поля в залежності від умов проведення контролю.

Зменшення розсіювання енергії ПЕП дало можливість оптимізувати процес контролю НДС технологічних трубопроводів АГНКС.

Запропоновано новий підхід визначення головних напружень за допомогою ультразвукового методу для діючих трубопроводів обв'язки компресора. В запропонованому методі для визначення механічних коефіцієнтів A і B в рівнянні (8) використано зміну параметрів трубних сталей.

У трубопроводах обв'язки компресора завжди є необхідність підвищення тиску газу від нульового значення до максимального. Внаслідок такої зміни внутрішнього тиску газу буде змінюватися величина напружень та деформацій у стінках трубопроводу. Величину деформації при визначених значеннях тиску газу можна визначити за допомогою тензометричного методу контролю в напрямку двох осей: Ox та Oy . Зміну напруження в стінці трубопроводу, що відповідає значенням вимірної тензометричним методом деформації, одночасно визначаємо за допомогою ультразвукового методу. Враховуючи те, що трубопровід, внаслідок протікання по ньому стисненого газу, знаходиться в

температурному полі, вимірюють значення температури і відповідний цьому час проходження ультразвуку через стінку труби зразу після закінчення подачі газу в трубопровід, коли напружень від тиску та руху газу немає. Таким чином, отримано декілька значень виміряного часу проходження поперечної ультразвукової хвилі та, відповідно, значень деформацій та температур.

Залежність напруження від виміряного часу проходження ультразвуку в металі стінки труби тоді матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} - \sigma_{yy} &= \left(\frac{T_{xx} - T_{x0}}{T_{x0}} - \frac{T_{yy} - T_{y0}}{T_{y0}} \right) A, \\ \sigma_{xx} + \sigma_{yy} &= \left(\frac{T_{xx} - T_{x0}}{T_{x0}} + \frac{T_{yy} - T_{y0}}{T_{y0}} \right) B,\end{aligned}\quad (8)$$

$$T_{x0} = T_0 + \varepsilon_{ix}, \quad T_{y0} = T_0 + \varepsilon_{iy}, \quad T_{xx} = T_{x0} + \varepsilon_{\theta}, \quad T_{yy} = T_{y0} + \varepsilon_{\theta},$$

де T_{x0}, T_{y0} – виміряний час проходження ультразвуковими поперечними хвилями, які поляризовані вздовж координатних осей; T_{xx}, T_{yy} – час проходження ультразвуку в навантаженому металі без врахування температури; T_{x0}, T_{y0} – час проходження поперечними хвилями в ненавантаженому металі труби, які поляризовані в напрямку координатних осей; T_0 – час проходження поперечної хвилі без врахування анізотропії; $\varepsilon_{ix}, \varepsilon_{iy}$ – добавки до часу поширення поперечних хвиль, викликаного початковою анізотропією до моменту виникнення напружень у металі труби; ε_{θ} – добавка до часу поширення поперечних хвиль, що викликана температурним полем.

За допомогою тензодавачів величина напружень через деформації при зміні тиску газу в трубопроводі визначається так:

$$\left. \begin{aligned}\sigma_{xx} - \sigma_{yy} &= \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy} + \mu(\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx})) \\ \sigma_{xx} + \sigma_{yy} &= \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \mu(\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{xx}))\end{aligned}\right\} \quad (9)$$

де μ – постійна Ляме; E – модуль Юнга; $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}$ – деформації; σ_{xx}, σ_{yy} – напруження

Коефіцієнти A та B із врахуванням (9) тоді будуть такими:

$$A = \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{\frac{\Delta T_{xx}}{T_{x0}} - \frac{\Delta T_{yy}}{T_{y0}}}, \quad B = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{\frac{\Delta T_{xx}}{T_{x0}} + \frac{\Delta T_{yy}}{T_{y0}}}. \quad (10)$$

Таким чином, є можливість градуувати швидкість поширення ультразвуку для досліджуваного металу трубопроводу без використання зразків, що важливо при контролі НДС в експлуатаційних умовах АГНКС.

Третій розділ містить розробку пристрою для контролю швидкості поширення ультразвуку, дослідження ультразвукового первинного

перетворювача. оцінку похибки розробленого пристрою і результатів контролю НДС технологічних трубопроводів АГНКС.

В роботі проаналізовано основні переваги та недоліки використання різних п'єзо матеріалів для ультразвукових первинних перетворювачів. Обґрунтовано використання кварцу для виготовлення п'єзоперетворювача, який має лінійну залежність від температури та стабільні характеристики в часі. Не менш важливу роль у роботі первинного перетворювача відіграє механічний демпфер, який подавляє інерційні властивості п'єзоелементу. Матеріал демпфера повинен мати характеристичний імпеданс, який повинен дорівнювати хвильовому опору п'єзоелементу та великий коефіцієнт загасання для проходження ультразвукової хвилі. В роботі розглянуто основні матеріали демпферів, приведені їх акустичні характеристики.

При дослідженні робочих характеристик розробленого первинного перетворювача вхідними даними є механічні, електромеханічні й електричні параметри використаних матеріалів при відповідних умовах їх застосування. Необхідно також знати ресурс роботи і зміну характеристик матеріалів у процесі експлуатації первинного перетворювача. У багатьох випадках потрібно проводити коригування параметрів вторинних приладів у процесі експлуатації системи контролю відповідно до зміни характеристик перетворювача. Тому досліджено режим роботи первинного перетворювача, а саме його амплітудно-частотну характеристику.

Існує два підходи з метою визначення амплітудно-частотної характеристики первинного перетворювача. Метод хвильового рівняння вимагає вирішення системи алгебраїчних рівнянь, отриманих із граничних умов. Більш раціональним є використання методу, який описує поширення пружних акустичних хвиль за допомогою використання еквівалентних схем перетворювача, зокрема схеми електричних аналогів його складових частин. Перевага даного методу полягає в тому, що розв'язок хвильових рівнянь з заданими граничними умовами замінюють на розрахунок електричної схеми і на подальший аналіз її роботи з використанням розробленої теорії електротехніки. Для розрахунку амплітудно-частотної характеристики первинного перетворювача в режимі приймання використано електричну схему-аналог у вигляді шестиполісника з зосередженими постійними, на одній парі затискачів яких реєструються в режимі приймання та задаються в режимі випромінювання електричні величини, а на другій парі – механічні.

В результаті проведеного розрахунку побудовано залежність амплітудно-частотної характеристики акустичного тракту первинного перетворювача, в якого імпеданс демпфера дорівнює $7 \cdot 10^6$ Па·с/м, імпеданс узгоджувального шару - $11 \cdot 10^6$ Па·с/м, площа п'єзопластини - $1,2 \cdot 10^{-4}$ м², товщина п'єзопластини - 0,5 мм, товщина узгоджувального шару - 10 мм (рис. 2). Як чутливий елемент, використаємо кварц Y-зрізу квадратної форми з геометричними розмірами 10x10 мм. На осі Oy буде нормоване значення напруги холостого ходу U_{xx} , а на осі Ox - відношення частот ω і резонансної частоти чутливого елемента ω_0 , яка дорівнює 5 МГц. Отримана послідовність розрахунку дозволяє підібрати відповідні матеріали демпфера, п'єзопластини та узгоджувального шару в

відповідності до вхідного характеристичного імпедансу контрольованого типу матеріалу.

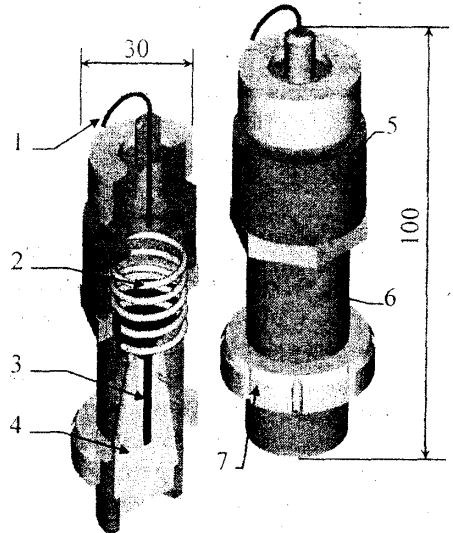
Рис. 2. Амплітудно-частотна характеристика тракту первинного перетворювача.



Конструкція первинного перетворювача зображена на рис. 3.

Рис. 3. Конструкція ультразвукового первинного перетворювача:

- 1 – з'сднувальний кабель,
 2 – пружина, 3 – шток,
 4 – демпфер, 5 – обойма,
 6 – стакан, 7 – гайка.



Вхідні дані для визначення динамічної складової навантажень на технологічні трубопроводи АГНКС отримують шляхом вимірювання параметрів вібрації з використанням акселерометра.

З метою оптимального використання акселерометра при контролі динамічних складових напружень (частота та амплітуда вібрації) в умовах АГНКС досліджено характеристики акселерометра (рис. 4). На даному рисунку наведені отримані залежності нижчих власних частот чутливого елемента від його геометричних параметрів: внутрішній радіус посадки п'єзопластини в корпусі $r_0 = 0,4$ мм, зовнішній радіус несучої пластини $r_2 = 4$ мм та її товщина $L_2 = 0,45$ мм, зовнішній радіус п'єзопластини $r_1 = 3,561$ мм та її товщина

$L_1 = 0,25$ мм, інерційна маса $m = 3$ г, матеріал п'єзокераміки ЦТС-19, його параметри: $S_{11} = 15,1 \cdot 10^{-12}$ м²/Н, $S_{12} = 5,5 \cdot 10^{-12}$ м²/Н, $d_{31} = 120 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н.

На рис. 4а представлена залежність першої власної частоти чутливого елементу від інерційної маси. Найбільш значна зміна власної частоти відбувається при збільшенні інерційної маси від 0 до 4 г. На рис. 4б наведена залежність першої власної частоти від відношення товщини шарів при зберіганні загальної товщини постійною. Показано, що із збільшенням цього відношення відбувається незначне зменшення власної частоти ν . При зміні L_1/L_2 від 0,1 до 3 ν зменшується від 2,98 кГц до 2,83 кГц, тобто на 5%. Це відбувається внаслідок того, що зменшення товщини несучої пластини призводить до зниження згинної жорсткості всього чутливого елементу.

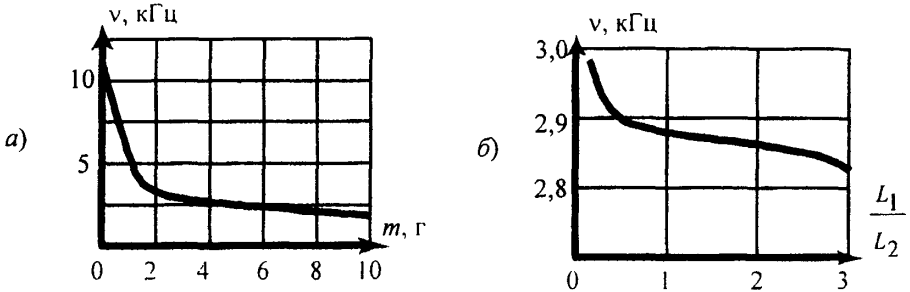


Рис. 4. Залежність власної частоти від геометричних і фізичних параметрів акселерометра.

Розроблено пристрій для визначення НДС металу "Сігма-5" (рис. 5). В основі пристрою лежить ультразвуковий метод контролю часу поширення ультразвуку з обробкою луносигналу при переході його через часову вісь способом синхрокільця. Це дало можливість підвищити точність вимірювання незалежно від величини амплітуди луносигналу (рис. 6).

Вибраний період луноімпульсу інвертується і відрізається на певному рівні, як результат отримуємо два значення часу T_k^1 та T_k^2 , різниця яких є симетричною відносно переходу вибраного періоду через нуль. Таким чином ми позбуємося похибки Δt (рис. 6а), яка створюється при обробці різних амплітуд луносигналу (наприклад, U_1 та U_2), і суттєво впливає на точність вимірювання значення часу проходження ультразвуку.

Сумарна похибка розробленого пристрою "Сігма-5", яка реалізовує запропоновану методику становить 5,4 %, інструментальна – 0,28 %.

В четвертому розділі приведено результати лабораторних досліджень пристроєм "Сігма-5" для контролю НДС металу труб.

Для достовірності результатів досліджень акустичним методом використано теоретичний розрахунок напружень і тензометричний метод визначення деформацій. При цьому напруження металу визначались через деформації з врахуванням механічних постійних першого і другого порядків.

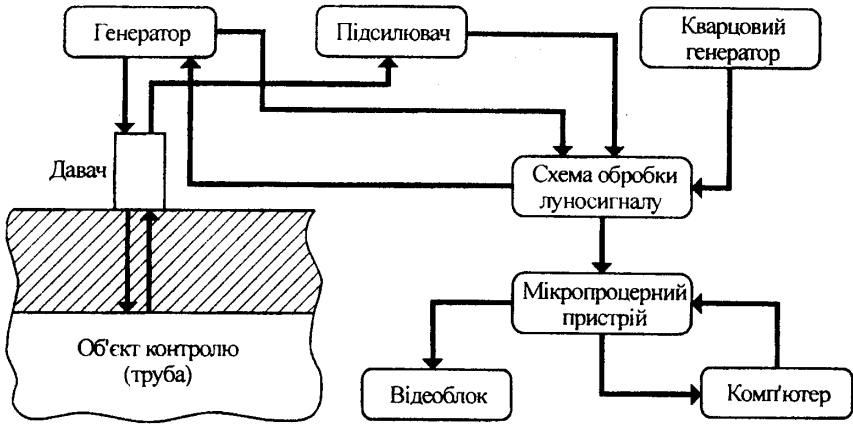


Рис. 5. Структурна схема пристрою "Сігма-5".

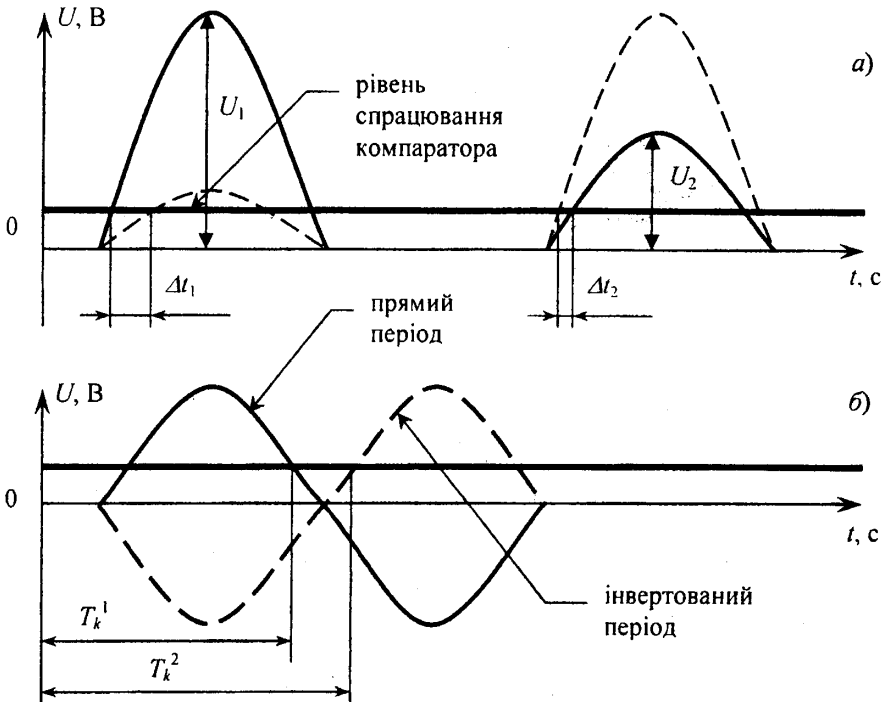


Рис. 6. Часові діаграми роботи пристрою для вимірювання часу поширення ультразвуку.

Для визначення механічних властивостей сталей у лабораторних умовах застосовувався метод випробування на розтяг 5-ти зразків. Умови виконання таких досліджень регламентуються стандартом.

Були виготовлені стандартні зразки з трубної сталі Ст20 розмірами 165x40x8. На зразок були наклеєні тензорезистори в двох взаємоперпендикулярних напрямках, під'єднані до приладу ИДЦ-1, для наклеювання використовувався клей БФ-2. На зразок був встановлений п'єзоперетворювач, закріплений магнітним замком. Даний зразок розтягувався на машині Р-50.

Усереднені результати порівняльного аналізу представлено на рис. 7.

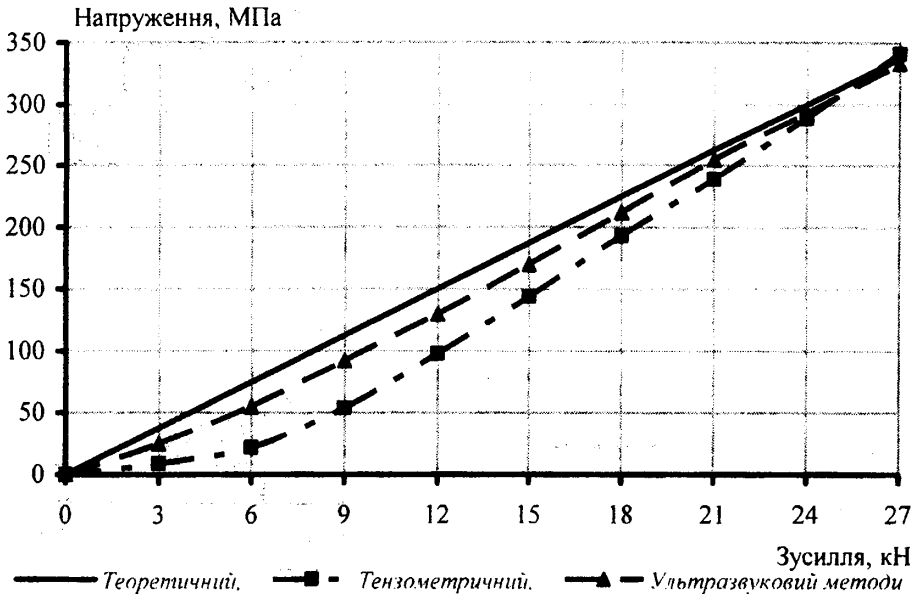


Рис. 7 Залежність напруження від прикладеного зусилля, визначено різними методами.

Як видно з рис. 7, тензометричний метод має велику інерційність на початку шкали вимірювання, що створює додаткову похибку. Використання ультразвукового методу дозволяє більш точно визначити напруження.

В п'ятому розділі проведено натурні дослідження НДС трубопроводів АГНКС № 1 та № 2 м. Кременчук управління магістральних газопроводів "Черкаситрансгаз".

Визначено місця концентрації напружень в технологічних трубопроводах АГНКС.

Розроблена блок-схема алгоритму роботи пристрою і відповідне програмне забезпечення, які реалізують запропоновану методику визначення напружень трубопроводів в експлуатаційних умовах без використання зразків із металу діючих технологічних трубопроводів АГНКС.

Описано порядок роботи з розробленим пристроєм "Сіigma-5". Отримано результати проведених робіт з контролю НДС технологічних трубопроводів АГНКС. Приведено методику обробки результатів контролю, яка полягає у визначенні сумарних напружень через динамічні і статичні. З аналізу отриманих результатів контролю зроблені висновки і дано рекомендації.

ПІДСУМКОВІ ВИСНОВКИ

1. На основі проведеного аналізу відомих методів і приладів контролю технічного стану технологічних трубопроводів сформульовані невіршені задачі. Встановлено, що використання існуючих методик унеможлиблює визначити залишкові напруження трубопроводів, які виникають внаслідок технології виготовлення трубних сталей і зварювання трубопроводів, а також набутих в процесі їх експлуатації. Розглянуто засоби контролю НДС трубопроводів, у результаті чого виявлені недоліки, серед яких слід відмітити низьку точність вимірювання часу поширення ультразвуку для ультразвукових приладів, низька чутливість приладів, зокрема коерцетиметрів, що не дає можливості визначати напружено-деформований стан трубопроводів АГНКС.

2. Розроблена математична модель визначення сумарних - статичних та динамічних напружень технологічних трубопроводів АГНКС дозволяє оцінити їх співвідношення. В результаті досліджень встановлено, що величина динамічних напружень співрозмірна із статичними, і при розрахунках НДС трубопроводів її обов'язково потрібно враховувати. Доведено, що динамічні напруження, які виникають внаслідок руху стиснутого газу досягають максимальної величини при відповідному співвідношенні збуджуючої сили до частоти власних коливань технологічних трубопроводів АГНКС, що важливо при визначенні місць з'єднань трубопроводів для зміни їх частоти коливань.

3. Розроблена методика контролю НДС технологічних трубопроводів, яка дозволяє визначати в них діючі напруження ультразвуковим методом для оцінки міцності й залишкового ресурсу без використання зразків із уточнення фізико-механічних параметрів трубних сталей і градування швидкості поширення ультразвуку, так як їх виготовлення із експлуатаційних трубопроводів недопустима.

4. Доказано, що найбільш точним методом визначення напружень металу трубопроводів АГНКС в експлуатаційних умовах є ультразвуковий луноімпульсний метод контролю з обробкою отриманого сигналу за методом синхрокільця та ідентифікацією параметрів контролю в умовах зміни тиску газу досліджуваних трубопроводів. Для реалізації методу розроблений ПЕП, досліджені його характеристики, що дало можливість оптимізувати його експлуатаційні параметри і підвищити чутливість контролю.

5. Розроблений пристрій контролю часу поширення ультразвуку і програмне забезпечення, яке реалізує запропоновану методику визначення НДС трубопроводів АГНКС. Вказаний пристрій є предметом одноособового патенту, на видачу якого отримано рішення ДП "Український інститут промислової власності".

6. Проведений метрологічний аналіз розробленого пристрою "Сігма-5" контролю НДС технологічних трубопроводів АГНКС. Здійснено аналіз схеми нагромадження похибок, визначено величину кожної з складових інструментальної та методичної похибок. Сумарна похибка визначення напружень складає 5,4 %.

7. Розроблено ультразвуковий первинний перетворювач. Проведено аналіз і класифікацію матеріалів чутливого елемента ПЕП за їх акустичними характеристиками.

8. Досліджені характеристики п'єзоакселерометра дозволили оптимізувати його проектування із заданими параметрами та отримати необхідні значення власної частоти чутливого елемента, а також змінити робочий частотний діапазон давача і показати шляхи до покращення існуючих конструкцій. Це дало можливість підвищити точність контролю параметрів вібрації (частоти та амплітуди) та більш точно визначити динамічні напруження технологічних трубопроводів АГНКС.

9. Проведені лабораторні дослідження методики та пристрою контролю напружено-деформованого стану технологічних трубопроводів, а також промислова їх апробація на АГНКС №1 та №2 м. Кременчук "Управління магістральних газопроводів" Черкаситрансгаз", результати яких підтвердили їх високу ефективність.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лютак І. З., Кісіль І. С. Визначення частотних характеристик двошарового п'єзоелектричного чутливого елемента при осеметричному згині // *Методи та прилади контролю якості.* – 2000. - № 6. – С. 21-24.
2. Лютак І. З., Кісіль І. С. Оцінка впливу контактного шару рідини на точність визначення параметрів трубних сталей акустичним методом // *Методи та прилади контролю якості.* – 2002. - № 8. – С. 10-13.
3. Лютак І. З., Лютак З. П. Вплив фізичних факторів на параметри механічних коливань трубопроводів // *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ.* – 1996. - № 33. – С. 130-134.
4. Лютак З. П., Ніколаєв О. В., Лютак І. З. Метод визначення напруженого стану магістральних трубопроводних конструкцій // *Матеріали доп. на VIII наук.-техн. конф. "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах"* Збірник наукових праць. – Хмельницький: ТУП, 2001. – С. 380-383.
5. Лютак З. П., Ніколаєв О. В., Лютак І. З. Пристрій для контролю технічного стану газопровідних систем в експлуатаційних умовах // *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ.* – 2001. - № 37. – Т. 6 – С. 166-170.
6. Лютак І. З. Особливості експлуатації трубопроводів високого тиску автомобільних газонаповнюючих компресорних станцій // *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ.* – 2001. - № 38. – Т. 8 – С. 123-127.

7. Пат. 50914 А, G 01 Н 5/00. Пристрій для вимірювання швидкості ультразвуку / І. З. Лютак. - № 2001021357, Заявл. 27.02.2001 Оpubл. 15.11.2002, Бюл. № 11.
8. Пат. 32304 А, G 01 С 5/04, G 01 С 9/22. Спосіб визначення відносної зміни висоти і кута нахилу об'єкта / З. П. Лютак, М. Контіала, І. З. Лютак., М. В. Катрич - № 99031287, Заявл. 09.03.1999 Оpubл. 15.12.2000, Бюл. № 7-II.
9. Лютак І. З., Кісіль І. С. Дослідження імпульсного режиму роботи ультразвукового перетворювача // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 2003. - № 1 - С. 42-45.
10. Лютак І. З., Ніколаєв О. В. Прилад для контролю напружено-деформованого стану газопроводів ультразвуковим методом // Матеріали доп. на 7 Міжнарод. наук.-практ. конф. "Нафта і газ України 2002".- Київ, 2002. - С. 32-33.
11. Лютак І. З., Кісіль І. С. Особливості аналізу напружено-деформованого стану трубопроводів автомобільних газонаповнюючих станцій // Матеріали доп. на 3 Міжнарод. наук.-техн. конф. і виставці "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання". - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2002.- С. 62-64.
12. Лютак І. З., Лютак З. П. Принципи побудови системи моніторингу стану газопровідних конструкцій // Тези доп. на наук.-техн. конф. професорсько-викладацького складу університету. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2001.- С. 109-110.
13. Лютак З. П., Ніколаєв О. В., Лютак І. З. Аналіз матеріалів п'єзоелемента ультразвукового первинного перетворювача // Тези доп. на наук.-техн. конф. професорсько-викладацького складу університету. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2002.- С. 130-131.
14. Лютак З. П., Ніколаєв О. В., Лютак І. З. Метод визначення напруженого стану магістральних трубопроводних конструкцій // Міжнародний науково-технічний журнал "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах".- № 1.- 2001.- С. 185-186.
15. Лютак І. З., Кісіль І. С. Використання ультразвукового пристрою для контролю напруженого стану трубопроводів малого діаметру // Тези доп. на наук.-техн. конф. "Приладобудування 2002: підсумки і перспективи". - Київ, 2002.- С. 94-95.

АНОТАЦІЯ

Лютак І. З. Розробка методики та пристрою для контролю технічного стану технологічного обладнання автомобільних газонаповнюючих компресорних станцій. - Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 - Прилади і методи контролю та визначення складу

речовин. - Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 2003.

Дисертація присвячена питанню контролю технічного стану технологічних трубопроводів автомобільних газонаповнюючих компресорних станцій. З цієї метою розроблена методика та пристрій контролю ультразвуковим методом (поперечними хвилями). Запропонована методика дає можливість контролювати напружено-деформований стан металу стінки труби в експлуатаційних умовах без використання зразків. Дана методика враховує як статичні так і динамічні зусилля, що діють на об'єкт контролю.

Розроблено ультразвуковий первинний перетворювач, в якому враховано особливості експлуатації його при підвищених температурах та присутності вібрацій. Проведено метрологічний аналіз розробленого пристрою та первинного перетворювача. Досліджено характеристики роботи акселерометра для експлуатації його в умовах компресорної станції. Проведено порівняльний аналіз розробленого пристрою та відомих методів контролю напружено-деформованого стану металу в лабораторних умовах. Проведено натурні дослідження розробленого пристрою.

Ключові слова: ультразвук, труби високого тиску, контроль, напружено-деформований стан.

АННОТАЦИЯ

Лютак И. З. Разработка методики и прибора контроля технического состояния технологического оборудования автомобильных газонаполняющих компрессорных станций.- Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля та определение состава веществ. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2003.

Диссертация посвящена вопросам контроля технического состояния технологического оборудования автомобильных газонаполняющих компрессорных станций. Для решения данного вопроса разработана методика и прибор контроля ультразвуковым методом (сдвиговыми волнами). Предложенная методика дает возможность контролировать напряженно-деформированное состояние металла стенок трубы в эксплуатационных условиях без использования образцов. Данная методика учитывает как статические, так и динамические усилия, которые приложены к объекту контроля.

Для математического описания динамических напряжений использовано модель расчета плоской рамы, при этом учтено, что технологические трубопроводы автомобильных газонаполнительных компрессорных станций имеют одну степень свободы. Статические и остаточные напряжения измеряются разработанным прибором, которых реализует метод синхрокольца.

Рассчитано форму акустического поля в дальней зоне в зависимости от формы диаграммы направленности. Как результат данного подхода, было получено нужную диаграмму направленности разработанного первичного преобразователя.

Разработан ультразвуковой первичный преобразователь, в котором учтено особенность эксплуатации его при повышенных температурах и присутствии вибраций. Проведен метрологический анализ разработанного прибора и первичного преобразователя. Исследовано характеристики работы акселерометра для эксплуатации его в условиях компрессорной станции. Проведен сравнительный анализ разработанного прибора и известных методов контроля напряженно-деформированного состояния металла в лабораторных условиях. Показано, что ультразвуковой метод, который реализован в разработанном приборе, наиболее точно измеряет напряжения.

Проведены натурные испытания разработанного прибора. Разработана блок-схема алгоритма работы прибора и соответствующе программное обеспечение, которое реализует предложенную методику контроля напряжения в трубопроводах.

Ключевые слова: ультразвук, трубы высокого давления, контроль, напряженно-деформированное состояние

ABSTRACTS

Lytutak I. Z. Working out the method and the device for controlling the technical state of technological equipment of Gas filling compressor plant. – Manuscript.

The thesis for obtaining the scientific degree of Candidate of Engineering Sciences by speciality 05.11.13 – Methods and Devices of Testing and Defining Matter Composition. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2003.

The thesis devoted to solving a problem of defining the technical state of technological pipelines of gas filling compressor plant. To solve this problem the method and the device which based on ultrasound (share waves) have been worked out. Offered method gives the opportunity to test mode of deformation of pipe's metal wall in working condition without using samples. Given method takes into account as statial as dynamical strains which acts on tested object.

Ultrasonic sensing device have been worked up with capabilities to work in higher temperatures and vibration environment. The Metrological analysis of worked up device and sensing device have been realized. Mетроlogical performance of accelerometer have been investigated to exploit it in compressor plant environment. Comparison analysis of worked up device and known testing methods of mode of deformation of metal have been realized in laboratory conditions. Actual test of worked up device have been realized.

Key words: ultrasound, high pressure pipes, testing, mode of deformation.