

Міністерство освіти і науки України

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

КАРПАШ АНДРІЙ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 622.691.4:539.4.014

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ
МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ДОВГОТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
(НА ПРИКЛАДІ АГНКС)**

Спеціальність 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2018

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Тацакович Назарій Любомирович
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Офіційні опоненти: доктор технічних наук
Говдяк Роман Михайлович
Інжинірингова компанія «МАСЕКСПОРТ»,
генеральний директор,
м.Київ

кандидат технічних наук
Драгілев Андрій Володимирович
Приватне підприємство «ІНЖИНІРІНГОВІ
ТЕХНОЛОГІЇ», директор,
м.Київ

Захист відбудеться « 04 » липня 2018р. о 13⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 при Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою:
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15)

Автореферат розісланий 31 травня 2018 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент



Пилипів Л. Д.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У процесі тривалої експлуатації обладнання насосних і компресорних станцій в умовах автомобільних газонаповнювальних компресорних станцій (АГНКС) одним із основних завдань забезпечення їх надійної роботи у різних умовах і режимах експлуатації є інформація про фактичний технічний стан (ФТС) конструкцій, а особливо посудин різного призначення, що працюють під тиском (ПТТ). Сучасний підхід до оцінювання ФТС конструкцій ПТТ у процесі технічної діагностики вимагає одержання даних як про дійсні значення всіх службових характеристик конструкцій, так і про стан металу конструктивних елементів. Це пояснюється інтенсифікацією виробничих процесів, зростанням рівня експлуатаційних навантажень, що зумовлюють нові вимоги до експлуатованого обладнання, нормативний ресурс якого часто є відпрацьованим або знаходиться на межі свого закінчення.

Забезпечення довговічності роботи вказаних об'єктів неможливе без урахування зміни рівня напружень у стінках посудин як основного параметру, що характеризує результат усіх силових факторів впливу на посудину чи резервуар. Залишкові напруження в металі стінки посудини під тиском виникають ще в процесі виготовлення і постійно набувають змін у процесі їх експлуатації. Урахування чинників, що характеризують зміну напруженого стану металу посудин під тиском компресорних і насосних станцій, дасть можливість збільшити достовірність визначення параметрів ФТС ПТТ й іншого технологічного обладнання.

Важливу роль у технічному діагностуванні конструкцій, що працюють під тиском, відіграють методи і засоби, які надають оперативну і достовірну інформацію про контрольований параметр без порушення цілісності металу, конструктивних і технічних параметрів досліджуваного об'єкта. Існуючі на сьогодні нормативні методи та засоби визначення величини напружень є трудомісткими, дорогі, обмеженими у польовому використанні, потребують спеціалізованого персоналу, а також ґрунтуються здебільшого на одному фізичному параметрі. Тому для підвищення достовірності визначення рівня зміни напружень ПТТ із максимальним урахуванням чинників впливу та інформації про зміну механічних властивостей металу, набутих під час тривалої експлуатації, необхідно оперувати комплексом інформативних параметрів, одержаних шляхом інструментального діагностування.

У зв'язку з цим проблема дослідження нових методів технічної діагностики за комплексом інформативних параметрів з можливістю урахування напруженого стану ПТТ є актуальною і її вирішення дасть можливість достовірно визначати залишковий ресурс обладнання насосних і компресорних станцій, що працюють під тиском.

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

Дисертаційна робота виконувалася в рамках науково-дослідних робіт:

- держбюджетна Д-11-16-Ф «Розроблення наукових основ виявлення та контролю переддефектного стану потенційно небезпечних металоконструкцій довготривалої експлуатації» Міносвіти та науки (№РК0116U003609);

- держбюджетна Д-1-13-Ф «Розроблення наукових основ багатопараметрового контролю технічного стану металоконструкцій довготривалої експлуатації за фактичними значеннями фізико-механічних характеристик їх матеріалу та типом і розмірами дефектів Міносвіти та науки (№0113U001099);

- держбюджетна Д-11-11-П «Розроблення новітніх неруйнівних методів діагностики та моніторингу деградації матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації» Міносвіти та науки (№0111U002999).

Мета роботи полягає у вирішенні актуального науково-практичного завдання в галузі підвищення якості технічного діагностування в процесі експлуатації посудин, що працюють під тиском, шляхом розроблення нових підходів і технологій контролю і визначення рівня напруженого стану посудин, що працюють під тиском, через урахування комплексу інформативних параметрів, чутливих до зміни фізико-механічних характеристик металевих матеріалів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати сучасний стан розвитку способів, методів і засобів визначення напруженого стану (НС) металевих конструкцій технологічного обладнання компресорних і насосних станцій з метою підбору технологій контролю і визначення рівня НС, основним результатом якого буде встановлення фізичних інформативних параметрів, чутливих до зміни напружень, для подальшого комплексного їх застосування в ході оцінювання ФТС обладнання;

- провести математичне моделювання напружено-деформованого стану ППТ і процесу деформування посудини під час її тривалої експлуатації під дією внутрішнього тиску з метою встановлення аналітичної залежності зміни НС від чинників силового впливу на конструкцію; теоретично дослідити характер взаємозв'язків між зміною фізичних параметрів і НС під впливом навантаження та розробити підхід до аналітичного опису взаємозв'язку між цими чинниками впливу та напруженнями, що дасть можливість одержати кількісні характеристики несиметричних напружень, що виникають у ППТ;

- провести експериментальні дослідження для визначення оптимальної кількості інформативних параметрів, необхідних для контролю зміни напруженого стану, що відбувається у металі досліджуваного експериментального зразка; експериментально встановити наявність і характер аналітичного зв'язку між обраними фізичними інформативними параметрами та НС ППТ; підвищити точність визначення НС за рахунок використання апроксимованої функції зв'язку між обраними параметрами та напруженням.

- на основі встановлених закономірностей розробити методіку визначення НС металу навантажених елементів ППТ шляхом використання комплексу інформативних параметрів і провести її промислову апробацію.

Об'єктом дослідження є процес визначення напруженого стану металевих конструкцій ППТ в експлуатаційних умовах.

Предметом досліджень є методи та засоби оцінки і визначення напруженого стану металевих конструкцій ППТ за комплексом встановлених інформативних параметрів.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених завдань у дисертаційній роботі використовувались методи теоретичного аналізу видів контролю та способів

визначення НС металоконструкцій ППТ, процесів незворотної зміни механічних властивостей металу, зумовленої тривалою експлуатацією. Для теоретичних досліджень використано методи графічного моделювання, методи скінченних елементів, алгоритми штучних нейронних мереж, методи диференціальної геометрії, механіки суцільного середовища та методи апроксимації функцій. Експериментальні дослідження НС металоконструкцій та узагальнення результатів передбачали застосування методів планування експерименту, теорії вимірювань, числового опрацювання результатів експерименту. Міцнісні розрахунки здійснювались із застосуванням кореляційного аналізу, методу асоціативного аналізу та сучасних методів статистичного опрацювання експериментальних і довідкових даних.

Наукова новизна одержаних результатів. Науковий результат дисертаційної роботи полягає у новому підході до технічної діагностики металевих конструкцій ППТ з урахуванням їх НС, що визначається комплексом визначених фізичних інформативних параметрів. Наукова новизна визначається наступними пунктами:

- вперше аналітично встановлено та експериментально підтверджено характер зв'язку між комплексом фізичних інформативних параметрів (питомим електричним опором, коерцитивною силою, твердістю та магнітним параметром) і напруженим станом металу посудин, що працюють під тиском;

- на основі теоретичних досліджень процесу деформування посудин, що працюють під тиском, запропоновано визначення параметрів напружено-деформованого стану без інформації про сили та навантаження, що діють на посудини протягом тривалого часу за розробленою математичною моделлю;

- на основі використання встановлених закономірностей між вимірними фізичними інформативними параметрами (питомим електричним опором, магнітним параметром, коерцитивною силою і твердістю) та напруженнями набув подальшого розвитку комплексний метод визначення рівня напруженого стану металевих конструкцій посудин, що працюють під тиском, який дав можливість підвищити точність визначення фактичного технічного стану.

Положення, які захищаються:

1. Удосконалений підхід до оцінки та визначення рівня напруженого стану металевих конструкцій посудин, що працюють під тиском, за комплексом структурно-чутливих фізичних інформативних параметрів;

2. Математичні залежності між комплексом фізичних інформативних параметрів і напруженням металу, одержані апроксимацією результатів експериментальних досліджень алгоритмами штучних нейронних мереж, що є інструментом для оцінки фактичного технічного стану посудин, що працюють під тиском, з урахуванням їх напруженого стану.

Практичне значення одержаних результатів полягає у впровадженні та реалізації розробленої методики оцінки і визначення рівня НС металоконструкцій ППТ промислового значення на прикладі накопичувальних акумуляторів АГНКС.

На основі отриманих закономірностей між інформативними параметрами та напруженнями розроблено методику, що передбачає апроксимацію результатів вимірювання комплексу фізичних інформативних параметрів штучними нейронними мережами для вирішення завдання багатопараметрової діагностики за

максимальною кількістю інформативних чинників оцінювання силових факторів впливу, які безпосередньо діють на об'єкт контролю і викликають накопичування залишкових напружень у металі під час тривалої експлуатації. Це дає змогу точніше визначати фактичний технічний стан ППТ компресорних і насосних станцій з урахуванням рівня залишкових напружень у металі.

Методика визначення рівня НС металоконструкцій ППТ пройшла успішну промислову апробацію на виробничих об'єктах ПАТ «УКРАВТОГАЗ» (акт промислової апробації від 17.02.2017р.) та ПАТ «УКРСПЕЦТРАНСГАЗ» (акт промислової апробації від 02.03.2017р.). Також результати дисертаційної роботи успішно впроваджені у виробничий процес на ДП «Карпатський експертно-технічний центр» (акт впровадження від 15.06.2017р.).

Розроблено проект нормативного документа типу СОУ «Визначення напружень у стінках посудин, що працюють під тиском. Методика», який регламентує порядок проведення комплексу робіт, а також опрацювання результатів, одержаних у результаті технічного діагностування для оцінювання фактичного технічного стану металу з урахуванням рівня напружень і прогнозування граничного терміну експлуатації посудин, що працюють під тиском.

Достовірність результатів роботи і зроблених висновків ґрунтується на використанні основних фізичних тверджень руйнування матеріалів конструкційного призначення, сучасних методах числового розрахунку, коректно поставленому завданні експериментального дослідження, порівнянні узагальнених і виокремлених результатів із відомими даними, використанні в експериментальних дослідженнях нових інформативних параметрів і технічних засобів.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. У працях, написаних у співавторстві, автору належить:

- проведення аналізу відомих методів визначення та оцінки ФТС металоконструкцій різних галузей промисловості [19-22];
- проведення аналізу низки нормативних документів, які регламентують оцінку та визначення ФТС з урахуванням контролю НС [112, 113];
- проведення математичного моделювання процесу зміни напруженого стану ППТ з урахуванням максимальної кількості силових факторів впливу та інформації про зміну просторової конфігурації в процесі тривалої експлуатації [119, 120];
- розрахунок, моделювання та виготовлення експериментальних моделей ППТ; підготовка і проведення експериментальних досліджень та опрацювання експериментальних результатів, встановлення наявності і характеру зв'язку між вимірними фізичними інформативними параметрами та НС [26, 121, 137];
- розроблена методологія визначення та оцінки НС металоконструкцій ППТ на основі комплексу інформативних параметрів (магнітного параметру, електричного опору, коерцитивної сили і твердості) [145], висвітлені шляхи реалізації розробленої методології контролю та оцінки і визначення НС [150].

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на II всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми, 2012 р.), міжнародній конференції «Дни неразрушающего контроля 2012» (Болгарія, м. Созополь, 2012 р.),

міжнародній конференції «Дни неразрушающего контроля 2013» (Болгарія, м. Созополь, 2013 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика-2013» (м. Івано-Франківськ, 2013 р.), IV міжнародній науково-технічній конференції «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування» (м. Тернопіль, 2015 р.), міжнародній конференції «Дни неразрушающего контроля 2016» (Болгарія, м. Созополь, 2016 р.), XIII національній науково-технічній конференції з неруйнівного контролю та технічної діагностики UkrNDT-2016 (м. Київ, 2016 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика-2017» (м. Івано-Франківськ, 2017 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 13 друкованих праць, із них 4 – статті у фахових наукових виданнях, затверджених ДАК України (2 одноособові); 4 – закордонні статті; 5 – тез доповідей на конференціях.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, списку використаних джерел і додатків. Дисертація викладена на 139 сторінках. Окрім того, робота проілюстрована 45-а рисунками, наведено 22 таблиці, список використаних джерел із 150 найменувань і 7 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено загальну характеристику дисертаційної роботи. Розкрито суть і стан науково-технічної проблеми визначення та оцінки НС металоконструкцій ППТ, що експлуатуються на об'єктах АГНКС, з урахуванням силових чинників, умов і режимів їх експлуатації. Обґрунтовано актуальність теми, що дало можливість сформулювати мету й основні завдання дослідження. Висвітлено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено відомості про особистий внесок здобувача та апробацію роботи.

У першому розділі проведено детальний аналіз металоконструкцій ППТ АГНКС, а також описано умови та режими їх експлуатації. Зокрема, розглянуто і проаналізовано чинники впливу, що діють на них і викликають незворотні зміни фізико-механічних характеристик їх металу.

Проведено аналіз існуючих методів і технічних засобів визначення та оцінки фізичних параметрів, які опосередковано характеризують НС металевих конструкцій ППТ АГНКС. Встановлено, що найбільш інформативним буде результат визначення рівня НС металоконструкцій ППТ АГНКС із застосуванням багатопараметрової діагностики, що передбачає визначення інформативних параметрів, тісно пов'язаних із механічними властивостями та структурним станом металу.

Вчені, які займалися і займаються дослідженням ФМХ матеріалу, а також НС як основного параметру для визначення ФТС, є: Єгоров Є. А., Заміховський Л. М., Крижанівський Є. І., Никифорчин Г. М., Олійник А. П., Шлапак Л. С., Ориняк І. В., Тороп В. М., Троїцький В. О., Карпаш М. О., Тацакович Н. Л., Доценко Є. Р., Миндюк В. Д., та закордонні вчені, зокрема: Бабичев Д. А., Галєєв В. Б., Дегтярьов П. О., Іванов В. А., Лебєдєв В. Д., Ніколаєв М. В., Новосьолов В. В., Потапов А. Ю., Розенштейн І. М., Тарасенко О. О., Тороп В. М., Хоперський Г. Г., Buchwalter J. L., Dake L. P., Garcia A., Gilbert S., Hillis R., Iqbal G. M., MacBeth C., Tenthorey E., Vidal-Satter A. й інші. Проте їх увага зосереджувалась в основному на одержанні загальних

висновків про ФТС металевих конструкцій та їх міцність без урахування всіх можливих чинників впливу, режимів та умов експлуатації, а також на розробленні або удосконаленні одного методу контролю (наприклад, магнітного, акустичного, електромагнітного, тощо) із застосуванням одного інформативного параметра ФТС конструкції. У багатьох випадках розроблені або удосконалені методи застосовні для певної групи чи навіть окремої марки сталей, що обмежує сферу їх використання.

Методи контролю, що регламентовані нормативно-технічною документацією для визначення НС як основного параметра ФТС посудин під тиском, за їх індивідуального застосування, володіють низькою точністю: відносна похибка контролю часто перевищує 10%, а їх комплексне застосування не регламентується через відсутність чітко визначеної кількості інформативних параметрів для оцінки напружень під час одночасного їх застосування.

Висвітлено необхідність нового підходу до виявлення, оцінки та визначення рівня НС посудин під тиском, що застосовуються як технологічні об'єкти АГНКС, спрямованого на розроблення комплексних методів, особливість яких полягає в урахуванні декількох інформативних параметрів, що відносяться до різних типів фізичних полів, і, одночасно, складають основу багатопараметрового контролю. Сформовано завдання, що потребують вирішення в роботі, та визначено напрямки подальших досліджень.

У другому розділі формалізовано оцінку НС ППТ за даними про переміщення точок поверхні як некоректну задачу відновлення фізико-механічного поля за його значенням на частині поверхні циліндричних ППТ. Під час експлуатації посудини, що працюють під тиском (ППТ), зазнають дії комплексу силових чинників, які

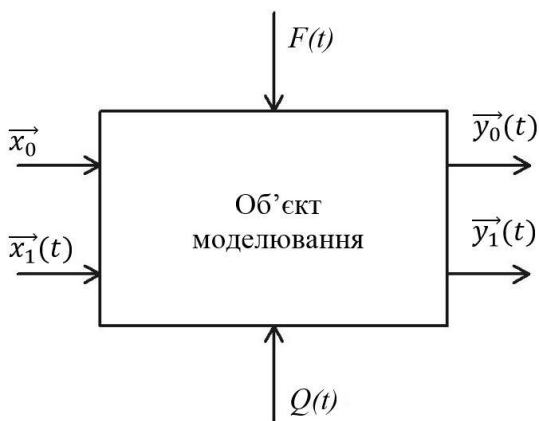


Рисунок 1 – Основні характеристики об'єкта моделювання

зумовлюють зміну їх просторової конфігурації, фізико-механічних параметрів матеріалу, електричних властивостей та інших характеристик.

Посудини під тиском (цистерни, газові балони, газгольдери, резервуари, високого тиску, тощо), як об'єкт моделювання (ОМ), розглянуті схемою моделі їх функціонування з визначенням вхідних і вихідних характеристик об'єктів, а також з урахуванням чинників, які зумовлюють зміну властивостей об'єкта (деформації, зміна фізико-механічних властивостей та інших його характеристик) (рис.1). У процесі функціонування

ППТ виділено: \vec{x}_0 – початкові характеристики

об'єкта (геометрія, конструктивна схема, фізико-механічні властивості матеріалу на етапі виготовлення, наявність зварних з'єднань, тощо) стаціонарного характеру; $\vec{x}_1(t)$ – змінні в числі характеристики об'єкта, які характеризують постійно діючі динамічні чинники, погодні умови, режими експлуатації, тощо; $Q(t)$ – чинники, які постійно діють на ППТ під час експлуатації (власна вага, реакції опор, можливі дефекти, різного роду помилки у процесі проектування); $F(t)$ – чинники тимчасового впливу (зсуви ґрунтів, землетруси, порушення конструктивної схеми, зміна фізико-

механічних, оптичних та інших властивостей ППТ і поверхонь, комплексний вплив непроектованих силових чинників); \vec{y}_0 – змінені характеристики ППТ, які в початковий момент характеризувалися \vec{x}_0 ; $\vec{y}_1(t)$ – змінні в часі характеристики об'єкта, які в початковий період експлуатації характеризувались функціями $\vec{x}_1(t)$.

Усі наведені характеристики можна об'єднати в єдиний узагальнений показник, який вважається пріоритетним для оцінки технічного ресурсу ППТ – їх напружено-деформованого стану (НДС).

Найбільш детальним і загальним функціональним рівнянням, яке описує роботу ППТ, є співвідношення:

$$\begin{Bmatrix} \vec{y}_0 \\ \vec{y}_1(t) \end{Bmatrix} = A(Q(t), F(t), \vec{x}_0, \vec{x}_1(t)) \begin{Bmatrix} \vec{x}_0 \\ \vec{x}_1(t) \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

де $A(Q(t), F(t), \vec{x}_0, \vec{x}_1(t))$ – деякий оператор, який враховує вплив на досліджуваний об'єкт початкових характеристик \vec{x}_0 , $\vec{x}_1(t)$ та збудовуючих чинників $Q(t)$ та $F(t)$. З математичної точки зору невідомі величини \vec{y}_0 , $\vec{y}_1(t)$ визначаються в процесі розв'язання коректно поставленої математичної задачі, яка вимагає, наприклад, рівняння рівноваги для ППТ в певній системі координат з новим комплексом заданих на всій поверхні ППТ граничних і початкових умов. Практично такий коректний підхід є суттєво обмеженим у використанні, оскільки дуже рідко вдається формалізувати величини $Q(t)$ та $F(t)$ і структуру оператора A . Фактично (1) – це система точного опису ППТ як ОМ з деякими модельними функціями $Q(t)$ та $F(t)$ переважно на етапі його моделювання під час проектування.

Для оцінки зміни НДС застосовується методика визначення компонента тензора напружень і деформацій за відомими координатами певної множини точок поверхні об'єкта, для якого відомим є параметричне подання його як тривимірного деформованого тіла в початковий та контрольний момент часу. При цьому компоненти тензора напружень і деформацій обчислюються без використання невідомої інформації про сили та навантаження, що зумовлюють зміну просторової конфігурації. У початковий (не деформований) момент часу для координат точок поверхні посудини справедливе параметричне подання у сферичній та циліндричній (для верхньої частини) системах координат (2).

Варто зазначити, що до закінчення циліндричної частини подання проводиться у циліндричній системі координат, а для сферичної частини у сферичній, при чому кут θ_0 задає кут спряження цих двох частин. Координати r для цих двох частин задовольняють умовам спряження:

$$\begin{aligned} R_{BH} &= R'_{BH} \cos \theta, \\ R_3 &= R'_3 \cos \theta. \end{aligned}$$

$$\begin{cases} x = r \cos \varphi, & 0 \leq \varphi \leq r_{cm} \\ y = r \sin \varphi, & R_{BH} \leq r \leq R_s \\ z = S, & 0 \leq S \leq L \end{cases}$$

$$\begin{cases} x = r \sin \theta \cos \varphi, & \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \theta_0 \\ y = r \sin \theta \sin \varphi, & R'_s \leq r \leq R'_{BH} \\ z = r \cos \theta, & 0 \leq \varphi \leq 2\pi \end{cases} \quad (2)$$

У контрольний момент часу подання (2) набуває іншого виду:

$$\begin{cases} x = X_L - Rn_x + \rho(S, \varphi, r, t) \cos \omega(S, \varphi, r, t) b_x + \rho(S, \varphi, r, t) \sin \omega(S, \varphi, r, t) n_x + \psi(S, \varphi, r, t) \tau_x \\ y = Y_L - Rn_y + \rho(S, \varphi, r, t) \cos \omega(S, \varphi, r, t) b_y + \rho(S, \varphi, r, t) \sin \omega(S, \varphi, r, t) n_y + \psi(S, \varphi, r, t) \tau_y \\ z = Z_L - Rn_z + \rho(S, \varphi, r, t) \cos \omega(S, \varphi, r, t) b_z + \rho(S, \varphi, r, t) \sin \omega(S, \varphi, r, t) n_z + \psi(S, \varphi, r, t) \tau_z \end{cases} \quad (3)$$

де: $\rho(S, \varphi, r, t), \omega(S, \varphi, r, t), \psi(S, \varphi, r, t)$ – функції, що задають переміщення точок у радіальному, тангенціальному і в повздовжньому напрямках; $\vec{r}_L(X_L Y_L Z_L)$ – координати точок на осі труби; $\vec{n}(n_x n_y n_z); \vec{b}(b_x b_y b_z); \vec{\tau}(\tau_x \tau_y \tau_z)$ – компоненти векторів нормалі, бінормалі та дотичної до осі труби.

У контрольний момент часу координати циліндричної частини описуються за (2). Для опису сферичної частини посудини приймається або друге подання, наведене в (2), або перераховують радіуси кривизни сферичної частини R'_s, R'_{BH} за результатами експериментальних вимірювань координат верхньої частини. Якщо позначити $\vec{R}_0(S, \varphi, r, t)$ радіус-вектором кожної точки недеформованої посудини, що працює під тиском, в початковий момент часу, а $\vec{r}(S, \varphi, r, t)$ радіус-вектором у контрольний момент, то описаними залежностями можна визначити такі величини:

- компоненти векторів локальних базисів:

$$\begin{aligned} \vec{\mathcal{E}}_0^i &= \frac{\partial \vec{R}_0}{\partial x_i} \quad x_1 = S; \quad x_2 = \varphi; \quad x_3 = r \\ \vec{\mathcal{E}}^i &= \frac{\partial \vec{r}}{\partial x_i} \quad x_1 = S; \quad x_2 = \varphi; \quad x_3 = r \end{aligned} \quad (4)$$

- компоненти метричного тензора у два моменти часу:

$$\begin{aligned} g_{ij}^0 &= \vec{\mathcal{E}}_0^i \vec{\mathcal{E}}_0^j, \quad j, i = 1, 2, 3 \\ g_{ij} &= \vec{\mathcal{E}}^i \vec{\mathcal{E}}^j \end{aligned} \quad (5)$$

- компоненти тензора деформацій:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (g_{ij} - g_{ij}^0) \quad (6)$$

- компоненти тензора напруження в рамках моделі пружних деформацій:

$$\sigma_{ij} = \lambda I_1(\varepsilon) g_{ij}^0 + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (7)$$

де λ і μ параметри Ламе матеріалу, $I_1(\varepsilon)$ – перший інваріант тензора деформації:

$$I_1(\varepsilon) = \sum_{i,j=1}^3 \varepsilon_{ij} g^{ij} \quad (8)$$

де g^{ij} – компоненти матриці оберненої до g_{ij}^0 .

Одержані за методикою (2) – (8) значення механічних напружень характеризують реальні напруження, це в тому випадку коли можна вважати, що в початковий момент часу напруження в посудині, що працює під тиском, дорівнюють нулю. Якщо у початковий момент напруження є невідомими, то одержані значення характеризуватимуть зміну напруженого стану посудини, що працює під тиском.

Як було зазначено вище, одержані значення напружень (або характеристики їх зміни) одержуються без використання математично формалізованих значень сил і навантажень різної природи, що діють на об'єкті. Для знайдених компонентів можна записати:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^T + \sigma_{ij}^H, \quad (9)$$

де σ_{ij} – напруження знайдені за (2) – (8); σ_{ij}^T – значення напружень, які можна визначити теоретично (кільцеві напруження від дії внутрішнього тиску, температурних перепадів, тощо). Переважно вказані напруження є однаковими в кожній точці тіла або функціями просторових координат; σ_{ij}^H – залишкові, неформалізовані напруження, природа яких часто залишається невідомою.

Наведені формули стосуються лише основних, найлегше формалізованих напружень. Для оцінки напружень σ_{ij}^H необхідно розробити спеціальні підходи, які б дали змогу визначити чинники, що впливають на НДС ППТ, та експериментально-розрахунковим методом встановити ступінь цього зв'язку.

У третьому розділі наведено методику експериментальних досліджень, мета яких полягала у дослідженні можливості застосування структурно чутливих фізичних інформативних параметрів у комплексі для визначення рівня напружень (радіальних та осьових) посудин під тиском, що є складовими технологічного обладнання АГНКС.

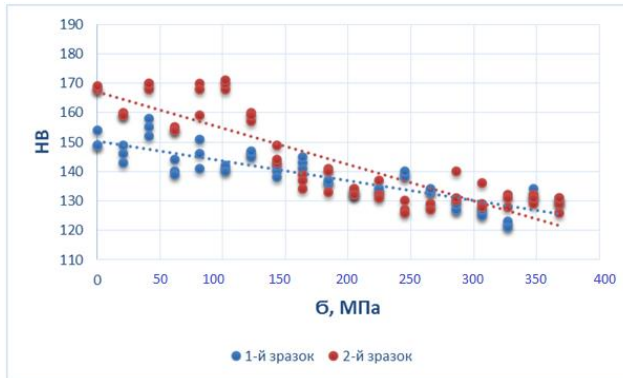
Експериментальні дослідження проводились у два етапи. **I етап** полягав у визначенні характеру зв'язку відомих з літературних джерел фізичних інформативних параметрів із рівнем напружень у металі. **II етап** досліджень передбачав встановлення достатнього мінімуму кількості обраних на I-ому етапі досліджень інформативних фізичних параметрів для визначення напруження в металі ППТ, а також для математичного виразу характеру зв'язку між інформативними параметрами і напруженням.

Для реалізації I-го етапу було виготовлено два плоскі пропорційні зразки з конструкційної сталі 17Г1С, що використовується для виготовлення трубних

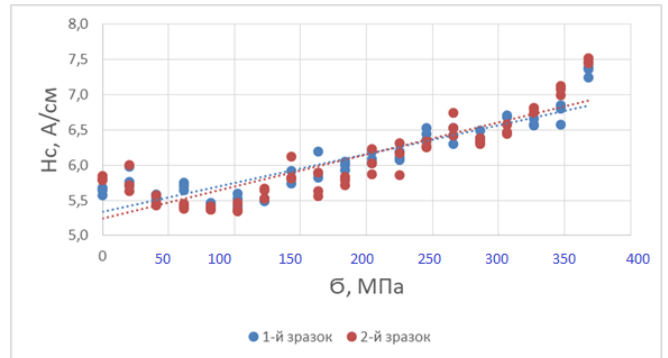
конструкцій і подальших випробувань на одновісний розтяг. З метою коректного проведення експерименту й одержання достовірних результатів було розроблено методику і відповідну їй схему вимірювань інформативних параметрів на трьох ділянках кожного зразка технічними засобами, що передбачають можливість проведення подібних вимірювань на ППТ в умовах АГНКС. Дискретні вимірювання здійснювались під час покрокового одновісного розтягу зразків на розривній машині типу Р-50 від нульового і до досягнення граничного значення 20000 кгс з кроком 500 кгс. Після проведення експерименту було проведено кореляційний та графічний аналіз результатів вимірювань з метою визначення наявності зв'язків між виміряними фізичними параметрами та осьовими напруженнями. Результати аналізу наведено в табл.1 і зображено на рис.1 - 6.

Таблиця 1 – Коефіцієнти кореляції між виміряними фізичними структурно-чутливими властивостями сталі 17Г1С та осьовими напруженнями

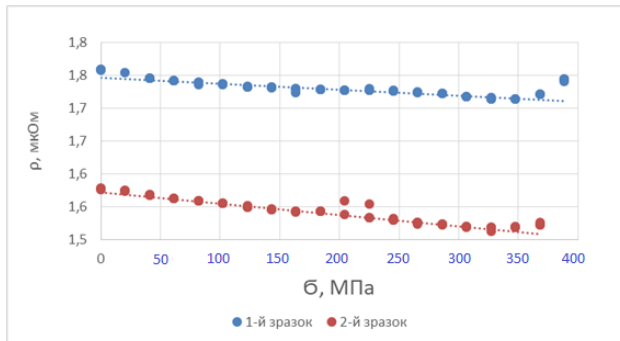
№ зразка	Інформативні параметри						
	Твердість	Коерцитивна сила	Питомий електричний опір	Магнітний параметр I_1	Магнітний параметр I_2 (25кГц)	Магнітний параметр I_2 (13кГц)	Швидкість поширення УЗ-хвиль
Коефіцієнти кореляції							
σ (зр.1)	-0,73	0,90	-0,94	-0,3	0,89	0,07	-0,1
σ (зр. 2)	-0,77	0,87	-0,84	-0,8	0,83	0,2	0,3



а) $HB=f(\sigma)$



б) $H_c=f(\sigma)$



в) $\rho=f(\sigma)$



г) $I_1=f(\sigma)$

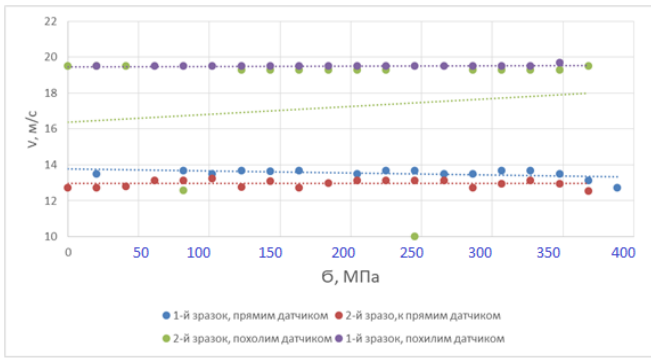
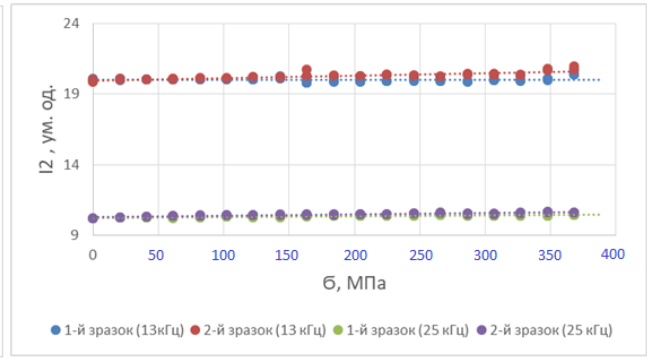
д) $V=f(\sigma)$ е) $I2=f(\sigma)$

Рисунок 2 – Графіки залежностей вимірних значень фізичних структурночутливих параметрів від зміни напружень в досліджуваних зразках сталі 17Г1С

Результати кореляційного та графічного аналізу свідчать про наявність близького зв'язку твердості, коерцитивної сили, електричного опору та магнітного параметра $I2$ (25кГц) з осьовим напруженням у металі. Низькі значення коефіцієнтів

кореляції решти вимірних під час експерименту фізичних характеристик вказують на практично відсутню їх зміну зі зміною осьового напруження в металі.

Для вивчення поведінки фізичних інформативних параметрів, що корелюють з напруженнями в металі, під час виникнення радіальних і кільцевих напружень у металі стінок ППТ від внутрішнього тиску газу у процесі експлуатації на АГНКС на другому етапі досліджень було виготовлено два експериментальні зразки, що моделювали конструкцію акумуляторів газу АГНКС, – зразки ППТ №1 і №2 (рисунок 3).

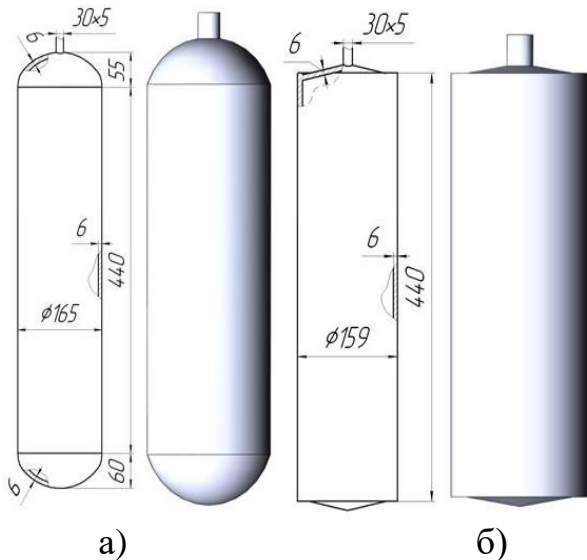


Рисунок 3 – Експериментальні зразки ППТ:
а) №1 і б) №2

Експериментальні зразки посудин були виготовлені з конструктивних

елементів із конструкційних низьколегованих сталей, а саме: з 09Г2С – посудина №1 і 17Г1С – посудина №2. Термін експлуатації заготовок становив ~ 20 років. Вихідні матеріали для виготовлення зразків ППТ був надані експлуатаційними підрозділами ПАТ «УКРТРАНСГАЗ».

Перед початком випробувань внутрішнім тиском було визначено значення гранично допустимих напружень у металі та внутрішніх тисків рідини для виготовлених зразків ППТ розрахунковими чисельними методами та методом скінченних елементів у програмному пакеті Solidworks 2014 SPO, за допомогою якого також одержано візуалізацію розподілу напружень у стінках посудин на визначених значеннях внутрішнього тиску. Результати розрахунку гранично допустимих напружень тисків наведено і таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунку граничних значень $[\sigma]$ та P за ГОСТ 14249-89

№	параметр	посудина №1	посудина №2
1	$[\sigma]$, МПа	273	255
2	P , МПа	17,27	16,77

Результати розрахунку та візуалізація напружень металу у стінках експериментальних зразків посудин, одержаних методом скінченних елементів з використанням програмного пакета Solidworks 2014 SPO зображено на рисунку 4.

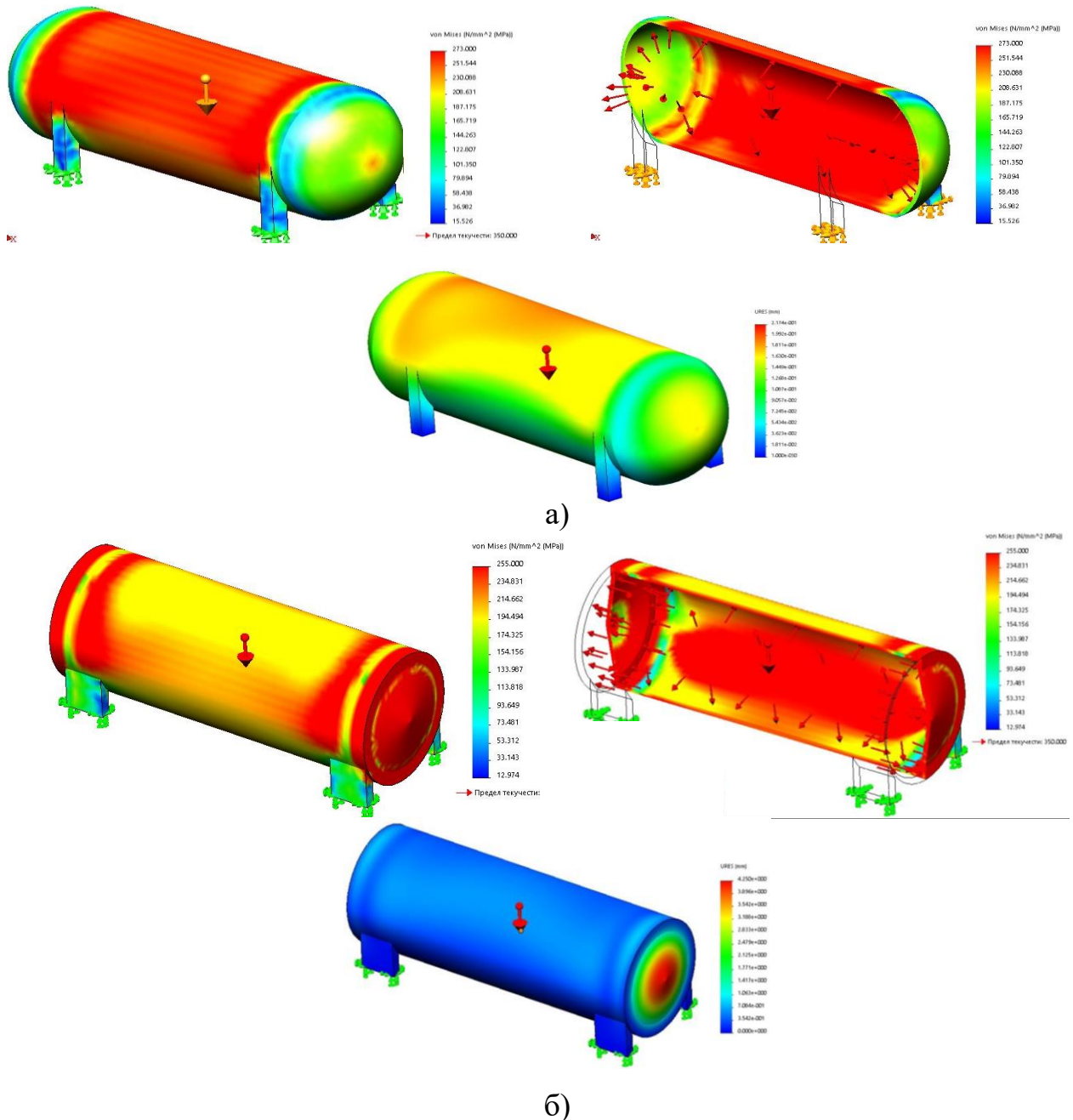


Рисунок 4 – Візуалізація розподілу напружень, деформації та переміщення в стінках посудин №1 (а) і №2 (б)

Для забезпечення достовірності одержаних значень і коректності експериментальних досліджень було розроблено циклічну послідовність операцій навантаження тиском і вимірювання інформативних параметрів, схеми

розташування ділянок для вимірювання та вимоги до технічних засобів вимірювань. Вимірювання інформативних параметрів у процесі покрокового навантаження зразків посудин проводилися за попередньо розробленим алгоритмом збільшення або зменшення навантаження (табл.3).

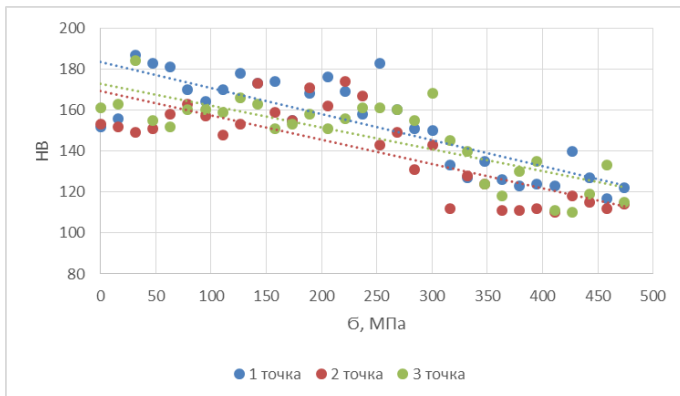
Таблиця 3 – Циклічність випробувань експериментальних зразків посудин

№ циклу	Навантаження, кгс/см ²																		
	Посудина №1																		
1	1-310 (крок збільшення навантаження 10)																		
Посудина №2																			
1	0	20	0																
2	0	20	40	0															
3	0	20	40	60	0														
4	0	20	40	60	80	0													
5	0	20	40	60	80	100	0												
6	0	20	40	60	80	100	120	50	0										
7	0	20	40	60	80	100	120	140	50	0									
8	0	20	40	60	80	100	120	140	150	100	50	0							
9	0	20	40	60	80	100	120	140	150	160	150	130	100	50	0				
10	0	20	40	60	80	100	120	140	150	160	170	150	130	100	50	0			
11	0	20	40	60	80	100	120	140	150	160	170	180	150	130	100	50	0		
12	0	20	40	60	80	100	120	140	150	160	170	180	190	150	130	100	50	0	
13	0	20	40	60	80	100	120	140	150	160	170	180	190	200	150	130	100	50	0
14	0	20	40	60	80	100	120	140	150	160	170	180	190	200	210	150	130	100	50

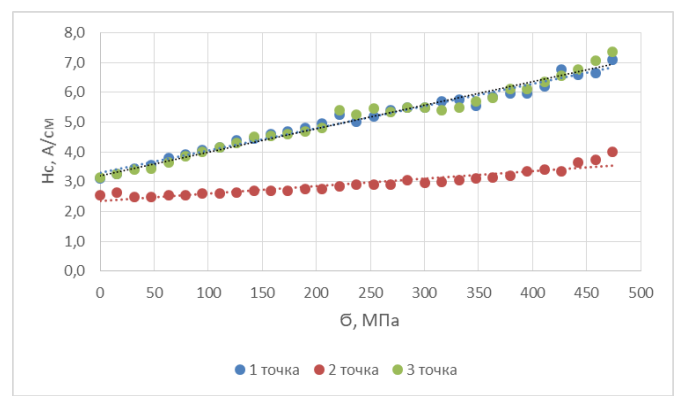
Після вимірювань було проведено кореляційний (табл.4) та графічний аналіз (рис. 5 і 6) результатів вимірювань для встановлення наявності і характеру зв'язку між вимірними параметрами та величиною напружень у стінках посудин.

Таблиця 4 – Результати кореляційного аналізу результатів досліджень експериментальних зразків посудин

№ зразка	Інформативний параметр			
	Твердість	Коерцитивна сила	Питомий електричний опір	Магнітний параметр I-2 (25кГц)
Коефіцієнти кореляції				
σ (зр.1)	-0,86	0,98	-0,55	-0,51
σ (зр.2)	-0,83	0,93	-0,49	-0,57



$$HV = f(\sigma)$$



$$Hc = f(\sigma)$$

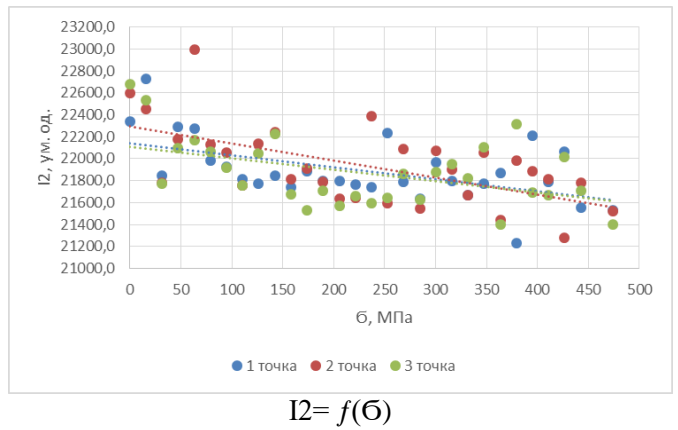
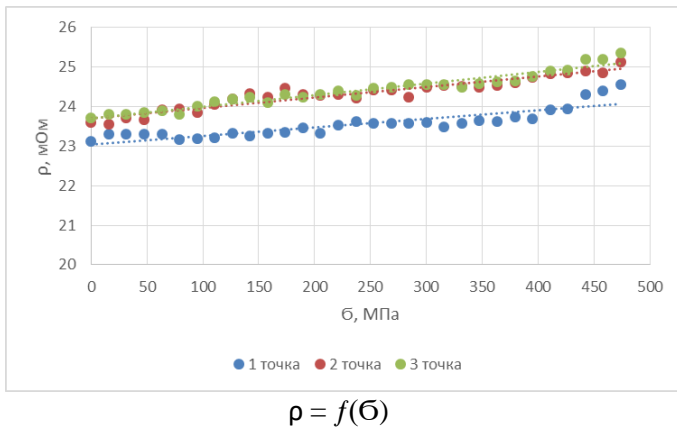


Рисунок 5 – Графіки залежностей вимірних фізичних параметрів від напружень в стінках зразка посудини №1

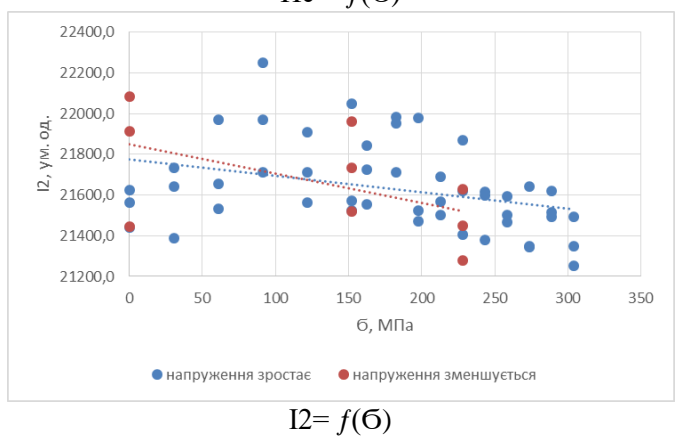
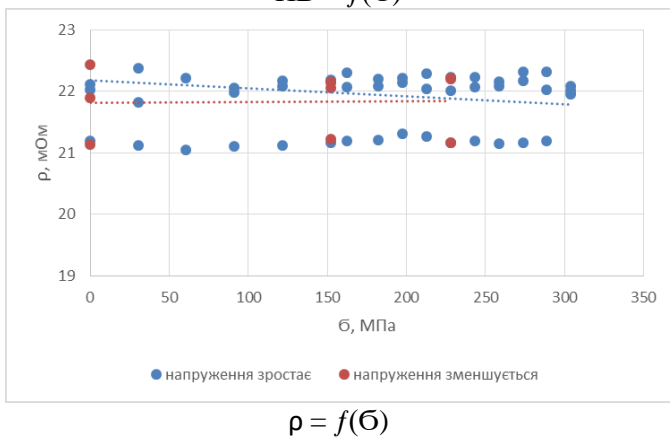
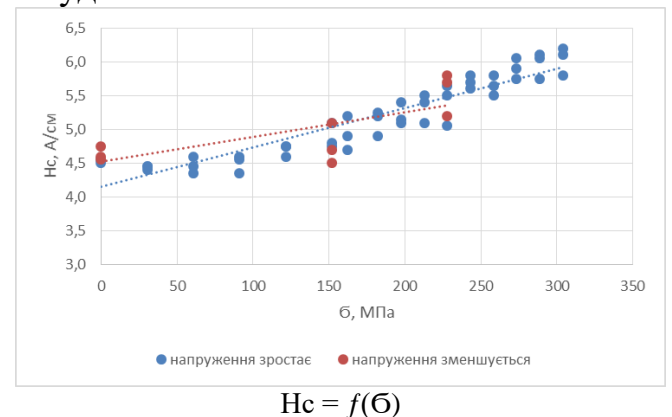
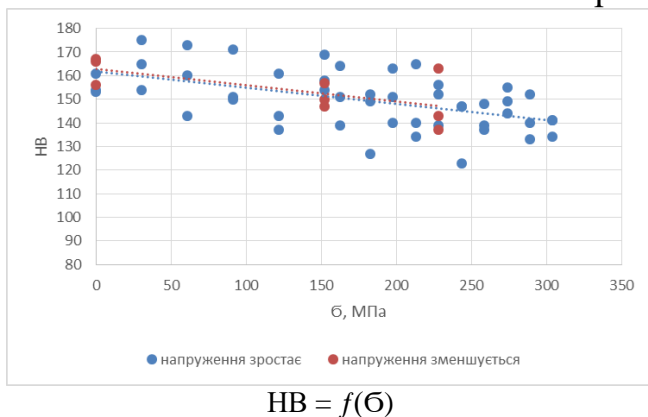


Рисунок 6 – Графіки залежностей вимірних фізичних параметрів від напружень в стінках зразка посудини №2

Результати графічного та кореляційного аналізу фізичних інформативних параметрів показали наявність тісного зв'язку коерцитивної сили і твердості та менш вираженого зв'язку електричного опору і магнітного параметру з радіальними напруженнями у стінці дослідних зразків посудини. Оскільки зв'язки між обраними фізичними інформативними параметрами та напруженнями носять нелінійний характер, то для підвищення інформативності виявлення та визначення величини зміни напружень у стінках ППТ доцільно використовувати їх у комплексі.

Для апроксимації функції взаємозв'язку між інформативними параметрами та напруженнями було використано алгоритми штучних нейронних мереж, мета яких

полягала в одночасному використанні як діагностичну інформацію кількох інформативних параметрів, що дало можливість більш точно оцінити напружений стан ППТ АГНКС, а також встановити мінімальну кількість інформативних діагностичних параметрів для підвищення точності визначення величини напружень.

Робота з нейронними мережами передбачала такі етапи:

1. Підготовки даних: опрацювання та набір даних з експериментальних результатів;

2. Формування і тренування: формування навчальних пар із 3-х параметрів – твердості, коерцитивної сили та питомого електричного опору, та 4-х параметрів – твердості, коерцитивної сили, питомого електричного опору, магнітного параметра I_2 із відповідними розрахунковими значеннями напружень; створення нейромережі для типових задач та архітектур для 3-х та 4-х параметрів (рис.7); процес тренування, що проводився на навчальних парах, сформованих із даних для посудини №1;

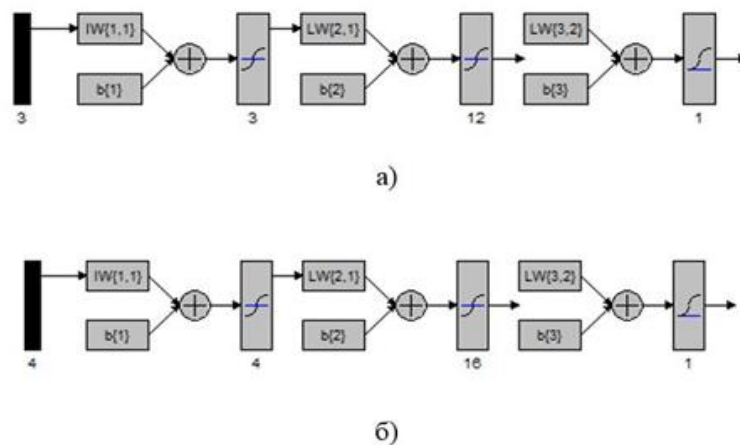


Рисунок 7 – Архітектура нейромережі для визначення напружень:

а) за 3-ма вхідними параметрами;

б) за 4-ма вхідними параметрами

3. Тестування натренованих нейромереж, яке проводилося на нових даних із іншої ділянки контролю експериментальної посудини №1, що не використовувалися під час тренування.

4. Перевірка нейромережі, що проводилась на невідомих даних сформованих пар для експериментальної посудини №2.

Результати тестування та перевірки роботи нейромережі наведено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Значення абсолютних і відносних похибок результатів тестування та перевірки нейромережі

К-ть вхідних параметрів	Середня абсолютна похибка, МПа	Відносна похибка, %
В режимі тестування		
3	30,20	6,04
4	44,99	9,01
В режимі перевірки		
3	59,98 МПа	12,0%
4	53,15	10,6%.

Одержаний рівень похибок є цілком прийнятним для виробничої практики за умови відсутності інших підходів і методик. Похибка тестування нейронних мереж із використанням чотирьох параметрів вища, ніж трьох, а у випадку верифікації – навпаки, тому, що присутня значна стохастичність інформативних параметрів у випадку верифікації нейромережі, а саме є недостатня репрезентативність результатів вимірювань, використаних для верифікації. Різниця відносних похибок (в межах 1,5%) не є значною для таких досліджень і ніяким чином не спростовує обґрунтованості запропонованого підходу.

Одержана апроксимована залежність виду $\sigma = f(Hb, Hc, \rho)$ у символічному вигляді – матричне рівняння з функціями перетворення та ваговими коефіцієнтами, що змінюються в процесі навчання нейронної мережі має вигляд:

$$Sigma = \frac{500}{1 + e^{-2(\sum_{n=1}^{12} - (LW\{2,3\} \cdot 1 + e^{-2(\sum_{n=1}^{12} - (LW\{2,1\} \cdot \left[\frac{2}{-2 \cdot \sum_{n=1}^{12} (IW\{1,1\} \cdot \left(\frac{HB}{200} \right) \cdot \left(\frac{HC}{8} \right) \cdot \left(\frac{RO}{27} \right) \right]^{b\{1\}}) - 1 \right)^{b\{2\}})}}} + b\{3\}} \quad (10)$$

де *Sigma* – напруження, МПа; *HB* – твердість за шкалою Брінеля; *HC* – коерцитивна сила, А/см; *RO* – питомий електричний опір, мкОм; *IW*{1,1}, *LW*{2,1}, *LW*{2,3}, *b*{2}, *b*{3} – матриці вагових коефіцієнтів..

Одержана формула (10) дає можливість визначати напруження, що діють у стінках ППТ під час роботи на АГНКС, за комплексом параметрів, виміряних методами і технічними засобами неруйнівного контролю, що є важливим в ефективності технічного діагностування посудин.

У четвертому розділі наведено практичну реалізацію методології виявлення, оцінки і визначення рівня НС металоконструкцій ППТ АГНКС з урахуванням зовнішніх чинників і режимів експлуатації за комплексом вимірюваних фізичних параметрів.

Розроблена методологія передбачає проведення таких технологічних операцій діагностування ФТС ППТ в умовах АГНКС: перед початком вимірювань виведення обладнання на робочі режими; підготовки місць і точок вимірювання на поверхні посудини; вимірювання контрольованих параметрів; реєстрація та опрацювання одержаних результатів вимірювання за допомогою програмного забезпечення на базі *Matlab*. Програма розрахунку містить розрахунковий модуль на основі алгоритмів штучних нейронних мереж, який дає змогу виконати чотирипараметрову апроксимацію функції величини напруження від комплексу виміряних інформативних параметрів – твердості, коерцитивної сили, питомого електричного опору, магнітного параметра *I2*.

Для практичної реалізації розробленої нової методології контролю НС металоконструкцій ППТ АГНКС було розроблено проект НД (СОУ) – «Визначення напружень у стінках посудин, що працюють під тиском. Методика».

ВИСНОВКИ

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішено важливе науково-практичне завдання в галузі підвищення якості методів оцінки та забезпечення надійності експлуатації ППТ АГНКС шляхом розроблення нових підходів і технологій контролю та визначення рівня НС ППТ з урахуванням комплексу фізичних інформативних параметрів, чутливих до зміни фізико-механічних характеристик (ФМХ) матеріалу.

1. Аналіз відомих методів і засобів визначення НС металевих конструкцій технологічного обладнання нафтогазового комплексу показав, що існуючі методи неруйнівного контролю, регламентовані діючою нормативно-технічною документацією, не дають змоги достатньо точно визначати НС, який є основним параметром для визначення ФТС технологічного обладнання під час їх індивідуального застосування. Обґрунтовано необхідність розроблення нової методології контролю та оцінки НС ППТ у різних режимах та умовах експлуатації, яка буде враховувати комплекс фізичних інформативних параметрів, що представляють окремі ФМХ матеріалу. До перспективних методів віднесено акустичні, магнітні, електричні та контроль твердості.

2. Встановлено закономірності процесу деформування посудини за її тривалій експлуатації на основі проведених теоретичних досліджень за запропонованою математичною моделлю оцінки НДС ППТ, яка зводиться до необхідності побудови алгоритму відновлення фізико-механічного поля за його значеннями на частині поверхні ППТ. Одержано методику визначення чинників суттєвого впливу на зміну НДС ППТ, на основі апарата асоціативного аналізу та встановлення аналітичної структури даної залежності, що дає можливість, на відміну від існуючих підходів, проводити інтегральну оцінку параметрів НДС ППТ без деталізації чинників силового впливу та величин і характеристик просторового розподілу несиметричних напружень у матеріалі ППТ.

3. За результатами експериментальних досліджень визначено достатню кількість фізичних інформативних параметрів контролю, які пов'язують фізичні властивості металу з його НС. Експериментально підтверджено наявність кореляційного зв'язку між обраними фізичними інформативними параметрами та напруженнями на зразках ППТ. За рахунок використання штучних нейронних мереж апроксимовано функцію зв'язку між напруженнями та комплексом фізичних інформативних параметрів металу стінки ППТ (твердість, коерцитивна сила, електричний опір, магнітний параметр), а також підвищено точність визначення НС ППТ – відносна похибка запропонованої методології складає 6,04% на відміну від 10% для існуючих методів контролю напружень.

4. Розроблено методику визначення напружень у стінках ППТ за результатами вимірювання комплексу фізичних інформативних параметрів та їх опрацювання в програмному середовищі. Проведено успішну промислову апробацію розробленої методології визначення напружень у стінках ППТ на об'єктах АГНКС-Львів з РВУ «ЛЬВІВАВТОГАЗ» ДП «УКРАВТОГАЗ» та ПАТ «УКРСПЕЦТРАНСГАЗ». Результати дисертаційного дослідження впроваджено в умовах ДП «Карпатський експертно-технічний центр».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Карпаш А.М. Аналіз відомих методів контролю фізико-механічних характеристик металу. Нафтогазова енергетика. 2012. №1(17). С. 70-82. (фахове видання України)
2. Ващишак С.П., Карпаш А.М. Современные подходы к определению физико-механических характеристик металлов объектов нефтегазового комплекса. NDT days 2012: SCIENTIFIC PROCEEDINGS. XXVII, №1 (133). 2012. С. 260-264. (зарубіжне наукове періодичне видання)
3. Тацакович Н.Л., Карпаш А.М., Карпаш О.М. Проблемы технического диагностирования технологического оборудования автомобильных газонаполнительных компрессорных станций. NDT days 2013: SCIENTIFIC PROCEEDINGS. (28), №2 (139). 2013. С. 40-43.(зарубіжне наукове періодичне видання)
4. Карпаш А. М. Особливості експериментальних модельних об'єктів та постановка експерименту для визначення напружено-деформованого стану металоконструкцій за комплексом інформативних параметрів. Нафтогазова енергетика. 2016. №1(25). С. 91-101. (фахове видання України)
5. Карпаш А.М., Тацакович Н.Л., Доценко Е. Р. Особенности применения современных методов контроля для определения напряженно-деформированного состояния металлических конструкций. NDT days 2016: SCIENTIFIC PROCEEDINGS. (31), №1(187). 2016. С.319-324.(зарубіжне наукове періодичне видання)
6. Карпаш А.М., Тацакович Н.Л., Карпаш М.О. Удосконалення методу визначення напруженого стану трубо-проводів та посудин, що працюють під тиском. Техническая диагностика и неразрушающей контроль. 2017. №2. С. 12-20. (фахове видання України)
7. Карпаш А.М., Олійник А.П. Математичні моделі процесу деформування та напруженого стану посудин, що працюють під тиском. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2017. №2(63). С. 97-101. (фахове видання України)
8. Karpash A., Oliinyk A. Mathematical model's choice reasoning and its implementation for the evaluation of the strength of technological vessels. EUREKA: Physics and Engineering. 2017. №4. P. 61-72. (індексується науковометричними базами)
9. Карпаш А.М. Аналіз методів контролю фізико-механічних характеристик металоконструкцій. Сучасні технології в промисловому виробництві: II Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція. 2012. С. 159-160.
10. Карпаш А.М., Тацакович Н.Л. Проблеми нормативного забезпечення робіт з технічного діагностування автомобільних газонаповнювальних компресорних станцій. Нафтогазова енергетика 2013: матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 7-11 жовтня 2013 р. Івано-Франківськ. 2013. С. 301-304.
11. Карпаш А. М. Експериментальні дослідження та практика визначення залишкового ресурсу металоконструкцій довготривалої експлуатації з врахуванням напруженого стану. Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2016: матеріали 8-ї Національної науково-технічної конференції, 22-24 листопада 2016 р. м. Київ: УТ НКТД. 2016. С. 193-196.
12. Миндюк В. Д., Карпаш А.М. Оцінка якісних змін мікроструктури сталей тривало-експлуатованих об'єктів за комплексом їх фізичних властивостей. Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і

прогнозування: IV міжнародна науково-технічна конференція, 21-24 вересня 2015р. м. Тернопіль. 2015. С. 106-110.

13. Карпаш А.М., Тацакович Н.Л., Карпаш М.О. Визначення напружень у стінках посудин, що працюють під тиском. Нафтогазова енергетика 2017: матеріали 6-ї міжнародної науково-технічної конференції, 15-19 травня 2017 р. Івано-Франківськ. 2017. С. 383-385.

АНОТАЦІЯ

Карпаш А. М. Удосконалення методів контролю напруженого стану металоконструкцій довготривалої експлуатації (на прикладі АГНКС). – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 2018.

Дисертація присвячена питанню контролю напруженого стану тривало експлуатованих металоконструкцій посудин АГНКС, що працюють під тиском.

Проведено аналіз конструкцій посудин, що працюють під тиском на автомобільних газонаповнювальних компресорних станціях України, а також їх умови та режими експлуатації, чинники впливу, що викликають зміну фізичних і механічних властивостей металу. На основі детального аналізу методів і технічних засобів контролю, діагностики та визначення основних параметрів, що характеризують напружений стан металу посудин під тиском, обґрунтовано необхідність нового підходу до діагностики фактичного технічного стану за рівнем напружень у металі з урахуванням декількох інформативних діагностичних параметрів одночасно. Побудовано математичну модель процесу деформування та виникнення напружень різних просторових конфігурацій за відомими переміщеннями певної множини точок поверхні посудин під тиском з урахуванням діючих нормативних напружень, а також напружень, що мають несиметричний характер і природа виникнення яких потребує подальшого вивчення. Проведені експериментальні дослідження характеру взаємозв'язків між інформативними параметрами методів неруйнівного контролю та різними видами напружень дали можливість встановити мінімальний набір фізичних параметрів, комплексне застосування яких дає можливість підвищити точність визначення величини напружень металу стінок посудин під тиском. Для одержання функції апроксимації напруження (МПа) від комплексу параметрів: коерцитивної сили, питомого електричного опору, магнітного параметру I_2 з частотою вимірювання $f = 25$ кГц, і твердості в символічному виразі було застосовано алгоритм штучних нейронних мереж. Рівняння апроксимації знайшло практичне застосування в розробленій методології визначення та оцінки напруженого стану металу як одного з критеріїв фактичного технічного стану посудин високого тиску об'єктів АГНКС, затвердженої нормативним документом - СОУ «Визначення напружень у стінках посудин, що працюють під тиском. Методика».

Ключові слова: напруження, посудини, що працюють під тиском, АГНКС, багатопараметрична діагностика, фізико-механічні характеристики, ресурс.

ABSTRACT

Karpash A.M. Methodology improvement for the monitoring of stress state in metal structures of long-term operation (by the example of NGVFS). - Manuscript.

Candidate of Technical Sciences dissertation of specialty 05.15.13 - Pipeline transportation, oil and gas storage reservoirs - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2018.

The dissertation focuses on the stress state monitoring of NGVFS pressure vessels' metal structures of long-term operation.

The analysis was conducted, concerning the design of pressure vessels at NGV filling stations of Ukraine, as well as their service and operating conditions, factors of influence, causing the change in physical and mechanical properties of the metal. Based on the detailed analysis of methods and technical means of monitoring, diagnostics and sizing, characterizing the stress state of pressure vessels metal, the necessity of the new approach to diagnosing the actual technical state by the level of stresses in the metal, taking into account several informative diagnostic parameters at the same time, is substantiated. The mathematical model was developed, describing the process of deformation and stresses formation of various spatial configurations based on known displacements of a certain set of points of the pressure vessels surface with allowance for the operating standard stresses and stresses with the asymmetrical nature and the occurrence of which requires further study. The conducted experimental research of interrelations nature between informative parameters of nondestructive testing methods and various types of stresses allowed to establish the minimal set of physical parameters, the complex application of which allows to increase the accuracy of stress value determination in the metal of pressure vessel walls. To obtain the function of stress approximation (MPa) from the complex of parameters: coercive force, specific electric resistance, magnetic parameter I_2 with a measurement frequency $f = 25$ kHz, and hardness in symbolic expression, the algorithm of artificial neural networks was applied. Equations of approximation were applied in the developed methodology for the determination and evaluation of the stress state of metal as one of the criteria for the actual technical condition of high-pressure vessels of NGVFS objects, and approved by the normative document - SOU «Determination of stresses in the walls of pressure vessels. Methodology»

Key words: stress, pressure vessels, NGVFS, multiparameter diagnostics, physical and mechanical properties, resource.

АННОТАЦИЯ

Карпаш А. М. Совершенствование методов контроля напряженного состояния металлоконструкций длительной эксплуатации (на примере АГНКС). - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 - Трубопроводный транспорт, нефтегазохранилища - Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, г. Ивано-Франковск, 2018.

Диссертация посвящена вопросу контроля напряженного состояния длительно эксплуатируемых металлоконструкций сосудов АГНКС, работающих под давлением.

Проведено анализ конструкций сосудов, работающих под давлением на автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях Украины, а также их условия и режимы эксплуатации, факторы влияния, вызывающие изменение физических и механических свойств металла. На основе детального анализа методов и технических средств контроля, диагностики и определения основных параметров, характеризующих напряженное состояние металла сосудов под давлением, обоснована необходимость нового подхода к диагностике фактического технического состояния по уровню напряжений в металле с учетом нескольких информативных диагностических параметров одновременно.

Построена математическая модель процесса деформирования и возникновения напряжений различных пространственных конфигураций по известным перемещениям определенного множества точек поверхности сосудов под давлением с учетом действующих нормативных напряжений, а также напряжений несимметрического характера и природа возникновения которых требует дальнейшего изучения. Проведенные экспериментальные исследования характера взаимосвязей между информативными параметрами методов неразрушающего контроля и различными видами напряжений позволили установить минимальный набор физических параметров, комплексное применение которых позволяет повысить точность определения величины напряжений металла стенок сосудов под давлением. Для получения функции аппроксимации напряжения (МПа) от комплекса параметров: коэрцитивной силы, удельного электрического сопротивления, магнитного параметра I_2 с частотой измерения $\Gamma = 25$ кГц и твердости в символьном выражении был применен алгоритм искусственных нейронных сетей. Уравнения аппроксимации нашло практическое применение в разработанной методологии определения и оценки напряженного состояния металла как одного из критериев фактического технического состояния сосудов высокого давления объектов АГНКС, утвержденной нормативным документом - СОУ «Определение напряжений в стенках сосудов, работающих под давлением. Методика».

Ключевые слова: напряжение, сосуды, работающие под давлением, АГНКС, многопараметрическая диагностика, физико-механические характеристики, ресурс.