

(681.179.1 + 681.518)

R2B

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**

**Івано-Франківський національний технічний університет  
нафти і газу**

Карпаш Максим Олегович



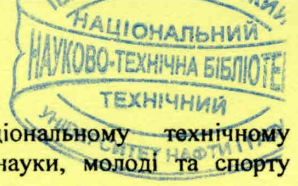
УДК 622.692.4:539.4

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ, ЗАСОБІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ  
БАГАТОПАРАМЕТРОВОГО КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ  
МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ**

05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Івано-Франківськ – 2013



**Дисертацією є рукопис**

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

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук  
**Уніговський Леонід Михайлович**,  
ТОВ «Нафтогазбудінформатика», генеральний директор

доктор технічних наук  
**Банахевич Юрій Володимирович**,  
ДК «Укртрансгаз» НАК «Нафтогаз України»,  
м.Київ, начальник відділу;

доктор технічних наук, професор  
**Никифорчин Григорій Миколайович**,  
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН  
України, Львів, завідувач відділу

Захист відбудеться "1" березня 2013 р. о 10<sup>30</sup> год. 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

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15)

Автореферат розісланий "24" січня 2013 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04,  
кандидат технічних наук, доцент

Пилипів Л.Д.



## АГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Україна, відповідно до Енергетичної стратегії до 2030 року, планує нарощувати обсяги видобування нафти і газу. Нафтогазова галузь України, що має понад столітню історію, характеризується сукупністю особливих чинників експлуатації своїх об'єктів: складні умови експлуатування; значна частка (більше 70%) устаткування відпрацювала нормативний ресурс і через хронічне недофінансування не оновлюється; відсутня єдина ефективна система технічного діагностування та обслуговування.

Особливої уваги потребують магістральні трубопроводи різного призначення, загальна протяжність яких сягає 100 тис. км в Україні, а термін експлуатування перевищує 30 років. Експлуатування трубопроводів супроводжується деградуванням фізико-механічних характеристик, корозійними пошкодженнями та втомними явищами, які передують відмовам та аваріям технологічного характеру. Як свідчить світовий та вітчизняний досвід найбільш ефективним шляхом виходу із ситуації, що склалась, є розроблення та впровадження засобів і систем діагностування технічного стану об'єктів, що забезпечили б своєчасне виявлення трубопроводів з дефектами та їх подальший ремонт або вилучення з експлуатації.

В останні роки розвиток цих методів та технологій контролю технічного стану в нафтогазовій галузі був зосереджений на удосконаленні методів контролю технічного стану трубопроводів за одним із параметрів: товщиною стінки конструкцій, твердості матеріалу, наявністю дефектів тощо.

Значний вклад у розвиток методів та засобів контролю технічного стану трубопроводів внесли вітчизняні Грудз В.Я., Банахевич Ю.В., Уніговський Л.М., Капцов І.І., Петрина Ю.Д., Копей Б.В., Заміховський Л.М., Шлапак Л.С., Семенов Г.Н., Яцун М.А., Карпаш О.М., Троїцький В.О., Назарчук З.Т., Скальський В.Р., Крижанівський Є.І., Шлапак Л.С., Никифорчин Г.М., Снарський А.О., Фомічов С.К., Кісіль І.С. та зарубіжні вчені Горкунов Е.С., Щербінін В.Е., Бобров В.Т., Гурвич А.К., Мужичий В.Ф., Мігун Н.П., Гумеров А.Г., С.Беднаж, А.Мітра, Б.Венкатраман, Б.Бісо, Дж.Зекоскі, Т.Степінські та інші.

Проте, без належної уваги дослідників залишився ряд задач – контроль зміни фізико-механічних характеристик трубопроводів, можливість оцінки їх технічного стану за кількома параметрами контролю тощо. Тому розроблення нових підходів до технічної діагностики лінійної частини магістральних трубопроводів довготривалої експлуатації, розвиток їх наукового підґрунтя, а також методів, засобів та технологій їх застосування є актуальною науково-технічною проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі технічної діагностики та моніторингу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу відповідно до плану понад 30 науково-дослідних робіт університету в межах

госпдоговірних, держбюджетних тем та грантів, в яких здобувач був науковим керівником, відповідальним виконавцем чи виконавцем, основними з яких є наступні:

- держбюджетна Д-2-07-Ф «Дослідження нових методів визначення фактичних фізико-механічних властивостей металоконструкцій тривалої експлуатації неруйнівними методами» (№ держреєстрації 0107U001559);

- договір НЧ/409-2007 «Розроблення нових методів та технічних засобів визначення фізико-механічних характеристик технологічних об'єктів довготривалої експлуатації для створення банків даних про фізико-механічні властивості конструкційних матеріалів» (№ держреєстрації 0107U008068);

- договір М/88-2008 «Дослідження мікроструктурних змін в матеріалах, які використовуються в нафтогазовій галузі, неруйнівними методами» (№ держреєстрації 0108U005809);

- договір 5/2009 «Оцінка напружено-деформованого стану МГП "Союз" на переході р. Айдар (1239 км.), визначення активності зсуву ґрунтів на ділянці 1152-1154 км. та оцінка залишкового ресурсу досліджених ділянок» (№ держреєстрації 0109U004632);

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

- грант Президента Ф32/259-2011 «Розроблення нового методу ідентифікації типів дефектів при неруйнівному контролі металоконструкцій довготривалої експлуатації» (№ держреєстрації 0111U008229).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є вирішення актуальної науково-технічної проблеми в галузі удосконалення методів експлуатації лінійної частини магістральних трубопроводів довготривалої експлуатації шляхом розроблення теоретичних основ, методів та засобів їх багатопараметрової технічної діагностики та розвитку відповідної технічної та нормативної бази. Для досягнення цієї мети поставлено такі задачі:

- аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку зарубіжних та вітчизняних досягнень у галузі розвитку методів та засобів контролю технічного стану лінійної частини магістральних трубопроводів;

- розроблення теоретичних основ багатопараметрової технічної діагностики лінійної частини магістральних трубопроводів;

- дослідження нових інформативних параметрів, що визначають технічний стан лінійної частини магістральних трубопроводів та нових методів визначення фізико-механічних характеристик, встановлення характеру взаємозв'язку мікроструктури та фізико-механічних характеристик матеріалу лінійної частини трубопроводів для розроблення нових методів контролю їх технічного стану;

- розроблення теоретичних основ методу ідентифікації дефектів типу порушення суцільності матеріалу лінійної частини магістральних

трубопроводів та підвищення чутливості виявлення таких дефектів у процесі внутрішньотрубною діагностики;

– розроблення та впровадження комплексу технічних засобів та нормативної бази для реалізації багатопараметрового контролю лінійної частини магістральних трубопроводів та забезпечення їх впровадження у нафтогазову галузь.

**Об'єктом досліджень** є процес зміни технічного стану лінійної частини магістральних трубопроводів.

**Предмет досліджень.** Методи та засоби оцінки технічного стану лінійної частини магістральних трубопроводів.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження базуються на розв'язанні нелінійних задач встановлення кореляційних зв'язків між інформативними параметрами неруйнівного контролю та досліджуваними характеристиками (ознаками наявності/відсутності дефектів, фізико-механічними характеристиками, значеннями товщини виробів, властивостями речовин), а також на числових методах розв'язання систем лінійних та нелінійних рівнянь, що побудовані на основі аналізування та експериментальних даних роботи багатопараметрових вимірювальних систем; методах відбирання та оброблення первинної інформації, в т.ч. призначених для оброблення великих обсягів інформації; алгоритми штучних нейронних мереж для нелінійної апроксимації параметрів технічного стану трубопроводів як функції кількох параметрів неруйнівного контролю.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Основний науковий результат дисертації полягає у нових теоретичних основах багатопараметрової технічної діагностики лінійної частини магістральних трубопроводів. Наукова новизна визначається наступними положеннями:

1. Вперше розроблено наукові основи визначення оптимального, з огляду на чутливість контролю, склад та кількість, комплексу інформативних параметрів, що характеризують технічний стан магістральних трубопроводів і можуть бути вимірними технічними засобами, що складає теоретичне підґрунтя для розроблення нових засобів та технологій технічної діагностики як лінійної частини магістральних трубопроводів, так й інших металоконструкцій довготривалої експлуатації.

2. Вперше встановлена можливість вимірювання фактичних значень основних механічних характеристик (границя плинності/міцності, ударна в'язкість) матеріалів магістральних трубопроводів в експлуатаційних умовах, що полягає в одночасному визначенні значень нормативних параметрів сталей, які раніше для цієї цілі не використовувалися – теплопровідності, питомого електричного опору, твердості та електромагнітного інформативного параметра та застосуванні штучних нейронних мереж для оброблення вимірювальної інформації.

3. Вперше встановлена можливість оцінки зміни мікроструктури матеріалу лінійної частини магістральних трубопроводів шляхом вимірювання теплопровідного інформативного параметра та питомого електричного опору, що

дає змогу на ранніх стадіях виявляти зміни фізико-механічних характеристик та прогнозувати місця виникнення потенційно небезпечних дефектів.

4. Запропоновано новий метод виявлення та ідентифікації типів дефектів, який дозволяє за високих рівнів завад (відношення сигнал/шум менші 1) надійно виявляти та визначати типи дефектів у процесі внутрішньотрубно́ї діагностики трубопроводів залежно від їх виробничого чи експлуатаційного походження.

5. Отримала подальший розвиток методологія використання алгоритмів штучних нейронних мереж у сфері технічної діагностики лінійної частини магістральних трубопроводів, що створило передумови для спрощення конструкції технічних засобів технічної діагностики та підвищення їх точності.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено та впроваджено нові технічні засоби, технології та нормативні документи, що реалізують розроблені методи багатопараметрового контролю технічного стану магістральних трубопроводів:

– розроблено та виготовлено: інформаційно-вимірювальну систему ФМХ-2, що дозволяє визначати границю плинності сталей трубопроводів за вимірними значеннями теплопровідності та твердості; прилад ІВС-І2 для визначення ударної в'язкості сталей магістральних трубопроводів за комплексом параметрів твердості та частоти електромагнітних коливань спеціалізованого перетворювача; інформаційно-вимірювальну систему для визначення границі плинності та границі міцності конструкційних сталей за значеннями питомого електричного опору та твердості;

– розроблено та погоджено із ННЦ «Інститут метрології», ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» та Карпатським експертно-технічним центром «Методику виконання вимірювань границі плинності конструкційних (трубопровідних) сталей» та «Методику виконання вимірювань ударної в'язкості сталей трубопровідного сортаменту»;

– створено та наповнено інформаційні бази даних «Інформативні параметри та засоби вимірювань для визначення фізико-механічних характеристик» та «Фізико-механічні характеристики матеріалів устаткування, що використовуються в нафтогазовій галузі»;

– розроблено та впроваджено понад 20 нормативних документів різних категорій, основними з яких є:

1) СОУ 60.3-31570412-027:2007 Магістральні нафтопроводи. Нафтоперекачувальні станції, морські термінали, технічний огляд, експертне обстеження технологічного обладнання і трубопроводів. Методи та методики;

2) СОУ 60.3-30019801-067:2009 Магістральні газопроводи. Оцінка фактичного технічного стану потенційно небезпечних дільниць. Методи і методики;

3) СОУ 60.3-31570412-028:2007 Магістральні нафтопроводи. Нафтоперекачувальні станції, продовження терміну експлуатування технологічного обладнання і трубопроводів за результатами технічного огляду, експертного обстеження. Правила та порядок;

4) ДСТУ EN ISO 13703:2008 Нафтова і газова промисловість. Проектування і встановлення трубопровідних систем на морських експлуатаційних платформах. Загальні вимоги.

5) Тимчасовий технологічний регламент «Контроль якості кільцевих зварників з'єднань трубопроводів під час укладання підводного газопроводу БК-1 Одеського ГР-МСП-4 Голіциньського ГКР з трубеукладальної баржі» (ПАТ «Державне акціонерне товариство «Чорноморнафтогаз», надано чинності 15.06.2012р.).

Результати роботи успішно апробовані та впроваджені у виробництво в умовах ДК «Укртрансгаз» (Богородчанське ЛВУМГ УМГ «Прикарпаттрансгаз», Новопсковське ЛВУМГ УМГ «Донбастрансгаз»), ВАТ «Укртрансгаз», ДАТ «Чорноморнафтогаз», ДК «Укргазвидобування», ДП «Укрхімтрансміа» тощо.

Матеріали дисертації використовуються у навчальному процесі навчання студентів напрямків підготовки «Нафтогазова справа» та «Зварювання» ІФНТУНГ. Результати досліджень увійшли до двох навчальних посібників з грифом МОНмолодьспорту України.

#### **Положення, що виносяться на захист:**

1) встановлення можливості використання нормативних характеристик сталей – теплопровідності, питомого електричного опору та спеціально електромагнітного параметра для визначення таких фізико-механічних характеристик матеріалу лінійної частини магістральних трубопроводів як границі плинності, границі міцності та ударна в'язкість безпосередньо в експлуатаційних умовах;

2) визначення місць виникнення потенційних дефектів (передруйнівного стану) у матеріалах лінійної частини магістральних трубопроводів шляхом встановлення взаємозв'язків між типом мікроструктури матеріалу та значеннями питомого електричного опору і теплопровідності;

3) новий метод виявлення та ідентифікування типів дефектів виробничого та експлуатаційного походження в лінійній частині магістральних трубопроводів.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові положення та результати, які становлять суть дисертації, отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить: розроблення методології комплексного контролю фізико-механічних характеристик сталей та шляхи її практичної реалізації [5,6,16,45-47]; використання алгоритмів штучних нейронних мереж для задач контролю технічного стану трубопроводів [26]; розроблено способи контролю ударної в'язкості [38,49,51] та границі плинності [39] сталей трубопровідного сортаменту; удосконалення методу контролю границі плинності за теплопровідним параметром [7]; обґрунтування вибору питомого електричного опору як інформативного параметра контролю границі плинності сталей [8-11,48,50]; доведення зв'язку фізико-механічних характеристик сталей зі структурно чутливими параметрами [12-15] для підвищення точності визначення фізико-механічних характеристик сталей [52-54]; порядок апробації розроблених технічних засобів в нафтогазовій галузі [22-24,27-29,58,59] для контролю фізико-

механічних характеристик сталей [42,43,60]; методи ідентифікації типів дефектів, виявлених засобами неруйнівного контролю [25, 44,55,57]; оцінка ефективності методів контролю корозійних пошкоджень [3]; способи технічної реалізації ультразвукового методу контролю [56]; методологія контролю фізико-хімічних показників природного газу [20,21]; нейромережевий метод підвищення чутливості ультразвукового контролю трубопроводів [4,17-19,40,41]; шляхи інформаційного [30,31] та нормативного забезпечення [32-37,61] у галузі контролю технічного стану об'єктів нафтогазового комплексу.

**Апробація роботи.** Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на понад 40 вітчизняних та закордонних конференціях: 6-й Національній науково-технічній конференції і виставці „Неруйнівний контроль та технічна діагностика”, 2009р., Київ; 9<sup>th</sup> European Conference of Non-destructive testing, Berlin, 2006; 4<sup>th</sup> International Symposium on Hydrocarbons and Chemistry, Ghardaia, Algeria, 2008; Міжнародній науково-технічній конференції „Міцність та надійність магістральних трубопроводів (МТ-2008)”, Київ; 9-14-й Міжнародній науково-технічній конференції „Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів ЛЕОТЕСТ” м.Славське, 2007-2012pp; Международной научной конференции «Научные основы внедрения новых технологий в эпоху нового возрождения», г.Ашгабат (Туркменистан), 2009; 5<sup>th</sup> International Symposium on Hydrocarbons and Chemistry (ISHC5), Sidi Fredj, Algeria, 2010; 10<sup>th</sup> European Conference of Non-Destructive Testing, Moscow (3 секційні доповіді), 2010; 26<sup>th</sup> International Conference “Defectoscopy ‘11”, Varna, Bulgaria, 2011; V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» РДМК-2011, г.Екатеринбург (Россия), 2011; 19-й міжнародній конференції «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики», м.Гурзуф, 2011; VII международной научно-технической конференции «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта», г. Новополоцк (Беларусь), 2011.

**Публікації.** Основні положення дисертації викладені у 61 публікації, у тому числі в 2 колективних монографіях, 30 статтях (із них 2 одноосібних) у фахових наукових виданнях МОНмолодьспорту України, 7 статтях в іноземних журналах, серед яких 2 у журналах, що входять до наукометричної бази даних Scopus, в 4 патентах України та 18 публікаціях (із них 7 закордоном) за матеріалами міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновку, списку використаних джерел (264) та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 383 сторінки. Робота містить 107 рисунків і 54 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі досліджень, викладено наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів дисертаційних досліджень, їх апробацію та публікації.



У першому розділі досліджено сучасні досягнення та тенденції досліджень зарубіжних та вітчизняних вчених, організацій та фірм у галузі контролю якості металокопункцій довготривалої експлуатації, у тому числі магістральних газопроводів, а також стан методичного, технічного та нормативного забезпечення проведення технічного діагностування.

Виконаний аналіз дозволяє стверджувати, що, не дивлячись на велику кількість публікацій та технічних засобів, існуючий стан розвитку методів та засобів контролю технічного стану металокопункцій довготривалої експлуатації характеризується цілим рядом недоліків, що потенційно можуть призвести до загроз технологічної безпеці в нафтогазовому комплексі. Зокрема, було встановлено недостатній розвиток теорії і практики технічної діагностики магістральних трубопроводів за фізико-механічними характеристиками, геометричними характеристиками та результатами дефектоскопії лінійної частини магістральних трубопроводів.

На підставі проведеного аналізу були сформовані основні завдання дисертаційної роботи.

*Другий розділ* присвячений розробленню теоретичних основ багатопараметрової технічної діагностики лінійної частини магістральних трубопроводів методами неруйнівного контролю, суть якої полягає у використанні новітніх генетичних методів, зокрема алгоритмів штучних нейронних мереж для пошуку, вибору та нелінійної апроксимації інформативних параметрів, які раніше для цієї цілі не використовувались. Означена вище проблема характеризується наступними особливостями, що повинні бути враховані під час її вирішення:

- переважна нелінійність зв'язків між інформативними параметрами та цільовими характеристиками;
- значення інформативних параметрів та цільових характеристик можуть різнитись за точністю, достовірністю та ступенями довіри;
- можливі комплекси інформативних параметрів можуть бути взаємнокорельованими.

Найбільшу складність вирішення цієї проблеми становить саме задача вибору інформативних параметрів. Ця задача, здебільшого, не може бути вирішена аналітично. Тому було запропоновано використовувати новітні генетичні методи для вирішення означеної вище проблеми в галузі технічної діагностики та неруйнівного контролю – алгоритми штучних нейронних мереж.

На базі досвіду, накопиченого вітчизняними та закордонними вченими, можна стверджувати про можливість вирішення наступних задач у галузі технічної діагностики систем нафтогазопостачання:

- розпізнавання образів виявлених дефектів;
- підвищення чутливості, завадостійкості контролю, виділення корисного сигналу із зашумленого;
- співставлення результатів застосування різних методів контролю.

Останнє дуже важливе, оскільки неспівпадіння результатів неруйнівного контролю різними методами спричиняє зниження достовірності обстежень в цілому. Застосування нейронних мереж у цьому випадку може забезпечити відображення технічного стану об'єкта в багатомірному просторі результатів різних методів неруйнівного контролю.

На підставі виконаних досліджень та враховуючи світовий та вітчизняний досвід було розроблено методологію відбирання оптимального комплексу інформативних параметрів, що дала б змогу розробити нову методологію контролю цільових параметрів, що характеризують технічний стан трубопроводів. Запропонована методологія полягає у послідовному виконанні таких кроків (рисунок 1). Особливий інтерес для наукових досліджень складають кроки 3 і 5.

*Крок 3. Формування та підготовка наборів комплексів інформативних параметрів.* Як було зазначено вище, на цьому етапі особливу увагу звернено на формування наборів даних якнайбільшої розмірності, забезпечивши при цьому дотримання наступних обмежень:

- 1) розмірності груп інформативних та цільових параметрів повинні бути рівними;
- 2) статистичний розкид значень всіх параметрів повинен бути максимальним;
- 3) розподіл значень параметрів, особливо цільових, повинен бути максимально наближеним до однорідного.

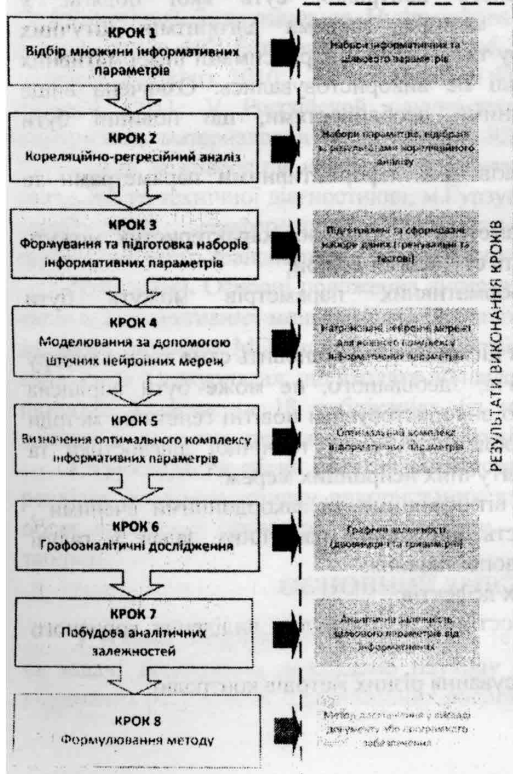


Рисунок 1 - Алгоритм реалізації методології відбору оптимального комплексу інформативних параметрів

Кожна окрема сукупність значень комплексу інформативних параметрів та відповідного їм цільового параметра називається навчальною парою.

З метою полегшення виконання наступного кроку доцільно привести значення інформативних та цільових параметрів до значень в межах від 0 до 1. Для цього найкраще скористатись функціями нормалізації за наступною формулою  $aa = (AA - \min AA) / \max AA$ , де  $AA$  – дійсне значення параметра;  $aa$  – приведенне до діапазону  $[0; 1]$  значення параметрам;  $\min AA$  – «мінімальне» значення, яке було

взято як найменше значення з набору значень параметра мінус 5-7% цього значення;  $maxAA$  – «максимальне» значення, яке було обрано як найбільше значення з набору значень параметра плюс 5-7% цього значення.

Додаток, що рівний 5-7% конкретного значення вводиться, виходячи з наступних міркувань:

- похибка більшості значень параметрів, визначених експериментально чи математично не перевищує 5%. Крім того, неможливо виключити ситуації, коли значення інформативних параметрів, виміряні в процесі досліджень в майбутньому, будуть виходити за вибрані межі;

- було вжито заходів щодо уникнення навчання нейронною мережі крайніх значень 0 та 1;

- області багатовимірному простору значень параметрів поза визначеними межами, є формально невідомими для нейронних мереж, тому ймовірність достовірного прогнозування значень цільових параметрів у цих областях не можливо оцінити.

При формуванні комплексних наборів даних використано правило перебирання всіх можливих варіантів, тобто в разі наявності 3 інформативних параметрів формується 4 набори даних (3 набори з двох та 1 набір з трьох параметрів), у випадку 4 параметрів – 11 наборів (6 наборів з двох, 4 набори з трьох та 1 набір з 4 параметрів).

На цьому кроці та в усіх наступних для їх найбільш якісного виконання рекомендується використовувати пакет прикладного програмного забезпечення для обчислень *Matlab R2006* та *Neural Network Toolbox* надалі.

*Крок 5. Визначення комплексу параметрів, що є оптимальним з точки зору точності визначення їх та цільових параметрів та можливості їх вимірювання.* Після завершення процесу тренування усіх нейронних мереж для всіх можливих комбінацій проводиться тестування за допомогою попередньо підібраних тестових наборів даних, що не використовувались під час тренування. Отримані результати розрахунку значень цільових параметрів зрівнюються з еталонними (тестовими) шляхом розрахунку абсолютної та за потреби відносної похибки та розрахунку їх середнього значення. Серед отриманих результатів виходів нейронних мереж слід обрати найменший. Далі такий же вибір виконано для кожного набору комплексу інформативних параметрів. Як критерії оптимальності, у цьому випадку, обрано наступні: мінімально можливий комплекс інформативних параметрів; найвища точність визначення цільового параметра (у абсолютному чи відсотковому вираженні). Обраний за вказаними вище критеріями комплекс інформативних параметрів вважається раціональним та прийнятним.

З огляду на визначені раніше задачі дослідження, напрямками застосування запропонованої методології визначено:

- визначення фізико-механічних характеристик (границя плинності та границя міцності, ударна в'язкість) за новими інформативними параметрами;

- контроль мікроструктурного стану та його зміни в процесі експлуатації;

- підвищення інформативності, у першу чергу, акустичного, вихреструмового та магнітного методів контролю за високими рівнів завад;

- ідентифікація типів дефектів (заводського та експлуатаційного походження) у контрольованих об'єктах, що значно підвищує ефективність проведення контролю та зменшує витрати на їх ремонт чи заміну.

**Третій розділ** присвячений дослідженню нових методів визначення механічних характеристик матеріалів за новими інформативними параметрами та з використанням запропонованої методології.

З точки зору експлуатаційних властивостей трубопроводів найбільш важливими є такі фізико-механічні характеристики (ФМХ) – границя плинності, границя міцності, відношення границі плинності до границі міцності, ударна в'язкість.

Було отримано ряд наукових та промислових свідчень про зміну структури сталей у процесі експлуатування за порівняно невисоких температур та незмінності їх хімічного складу. На підставі цього було вирішено перейти до розгляду задачі залежності значень теплопровідності та електропровідності від мікроструктури та міцнісних характеристик сталей.

Характер зміни магнітних, електричних та міцнісних характеристик сталей визначається структурними змінами та фазовими перетвореннями, що відбуваються як у процесі термічного оброблення, так і в процесі тривалого експлуатування. Отже, така спільність впливу структурних чинників на електричні та магнітні властивості, а також механічні характеристики сталі створює передумови опосередкованого визначення міцнісних характеристик за параметрами неруйнівного контролю. Фізичні та механічні властивості сталей у значній мірі визначаються співвідношенням кількості залишкового аустеніту та мартенситу.

Відбір наборів інформативних параметрів здійснювався на підставі наступних міркувань: пріоритет надавався параметрам, що є нормованими для сталей; інформативні параметри повинні бути структурно-чутливими. У результаті було обрано наступні: твердість, питомий електричний опір, теплопровідність, теплоємність тощо. Вибір твердості, зумовлений рядом чинних нормативних документів, де вказано, що механічні характеристики сталей певних марок визначають за значеннями твердості.

Коефіцієнт теплопровідності для кожної сталі є величиною постійною, залежить від хімічного складу сталі та температури. Структурні складові сталі відрізняються між собою за значеннями теплопровідності, тому температура за їх нагрівання чи охолодження буде різною. Вуглецеві сталі складаються зі структурних фаз – фериту, цементиту та перліту. Відомі коефіцієнти теплопровідності структурних складових за природніх умов:  $\lambda_{\text{ферит}} = 76,8 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{\text{цементит}} = 7,1 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{\text{перліт}} = 51,9 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{\text{аустеніт}} = 41,9 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$ . Також відомо, що між теплопровідністю та електропровідністю сталей існує прямо пропорційний зв'язок. Ця залежність описується законом Відемана-Франца-

Лоренца, яку можливо використовувати для оцінювання структурного стану сталей, що пов'язаний із шуканими механічними характеристиками.

У процесі пошуку нових інформативних параметрів для неруйнівного контролю ФМХ була виявлена наступна закономірність. Здійснювалось перевіряння закону Відемана-Франца та закону Грюнайзена на відомостях про фізичні властивості та механічні характеристики наступних іноземних марок сталей: 301, 304, 310, 321, 347, 409, 410, 416, 420, 430, 430F, 440, 431, 630, 904L, UR52N+, 2205, 3CR12, 253MA. За мікроструктурним станом це мартенситні, феритні, аустенітні та дулексні (ферито-аустенітні) сталі. Було встановлено, що значеннями відношення коефіцієнта температурного розширення до теплоємності (відповідно до закону Грюнайзена) та відношення теплопровідності до питомого електричного опору (за законом Відемана-Франца) сталі розподілились за мікроструктурними групами – мартенситні та феритні, дулексні та аустенітні (рис.2, а). Таке припущення підтверджується аналогічним розподілом на структурні групи сталей за значеннями коефіцієнта теплопровідності та питомого електричного опору (рис.2, б).

Характерною особливістю показаних розподілів на рисунках 2, а та 2, б є те, що для різних структурних груп різними є діапазони значень границі плинності (як базової механічної характеристики), а також візуальна відмінність залежностей цієї характеристики від інформативних параметрів. Очевидно, що це явище дозволяє стверджувати про те, що фізичні властивості сталей (особливо, питомий електричний опір та теплопровідність) можуть бути використані як структурно чутливі та інформативні для контролю ФМХ сталей.

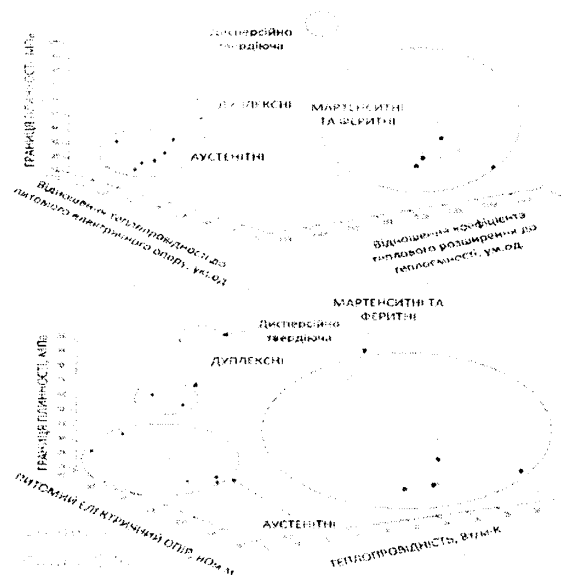
На підставі описаного вище вдалось розробити ряд методів контролю фізико-механічних характеристик:

1) визначення границі плинності та границі міцності за значеннями питомого електричного опору та твердості;

2) визначення границі плинності за значеннями теплопровідного інформативного параметра та твердості, що постав основою для кандидатської дисертації автора, а також був суттєво вдосконалений та розвинений у ході виконання цього дисертаційного дослідження;

3) визначення ударної в'язкості за значеннями твердості та спеціально введеного електромагнітного параметра.

*Дослідження можливості використання питомого електричного опору для контролю зміни фізико-механічних характеристик.* Для встановлення структурної залежності питомого електричного опору сталей було вирішено звернутись до нормативних документів на виготовлення сталей. На жаль, у вітчизняних джерелах відомості про механічні та фізичні характеристики щодо основних конструкційних сталей є неоднозначними. Було використано відомості про низку іноземних марок сталей з різними типами структур: аустенітні сталі (88 марок); феритні сталі (12 марок); дулексні сталі (26 марок); мартенситні сталі (16 марок).



а) розподіл структурних груп сталей за відношеннями теплопровідності до питомого електричного опору та коефіцієнта теплового розширення до теплоємності

б) розподіл структурних груп сталей за значеннями питомого електричного опору та теплопровідності

Рисунок 2 - Розподіл сталей за мікроструктурою за значеннями інформативних параметрів

Загалом для проведення аналітичних досліджень було обрано 142 марки сталі. Для вказаних сталей нормуються такі величини: границя плинності/міцності, твердість, густина, коефіцієнт теплового розширення, теплопровідність, теплоємність і питомий електричний опір. Діапазони зміни вибраних параметрів: границя міцності – 400–2200 МПа; границя плинності – 145–1800 МПа; твердість – 140–332 НВ; теплопровідність – 9,1–32,3 Вт/м·К; питомий електричний опір – 500–1450 нОм·м.

Далі було запропоновано розрахувати деякий усереднений коефіцієнт  $K$  за всіма марками сталей для кожної структури окремо, за формулою  $K = \rho \cdot \lambda$ , де  $\rho$  – питомий електричний опір, Ом·м;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К. Таким чином, розмірність цього коефіцієнта – [Вт·Ом/К].

Введення коефіцієнта має за мету дослідити можливість якісної оцінки структури контрольованих сталей. Результати розрахунку введеного коефіцієнта  $K$  наведено в табл.1. Значення коефіцієнта  $K$  (табл.1) відрізняється для різних типів структури сталей. Причому, найбільше абсолютне значення цього коефіцієнта відповідає феритним сталям, а найменше – аустенітним. Проте, чітко ідентифікувати належність певної марки сталі до тієї чи іншої структури можна тільки для двох груп сталей. До першої групи належать аустенітні та дулексні сталі, до другої – мартенситні та феритні.

Таблиця 1 - Результати розрахунку коефіцієнта  $K$ 

№	Структура сталей	Середнє значення коефіцієнта $K \cdot 10^{-6}$	Діапазон значень коефіцієнта $K \cdot 10^{-6}$
1	Аустенітна	12.05	9.9-13.6
2	Дуплексна	12.55	11.8-13.6
3	Мартенситна	15.45	13.7-18.0
4	Феритна	15.72	14.0-17.7

Враховуючи нелінійність взаємозв'язків між досліджуваними параметрами, було застосовано алгоритми штучних нейронних мереж (ШНМ) для вирішення задачі багатопараметрової апроксимації границі плинності/міцності як функції коефіцієнта теплопровідності, твердості та питомого електричного опору.

Результати тестування натренованих мереж для 3-х наборів даних з різними типами мікроструктур показали, що в межах структурних груп точність визначення границі плинності приблизно у 2 рази вища, ніж у випадку, коли розділення на групи не проводилось.

*Експериментальна перевірка зв'язку між теплопровідністю та питомим електричним опором та мікроструктурою.* Для підтвердження результатів теоретичних досліджень було проведено серію експериментів, метою яких було здійснення термічного оброблення зразків металу з подальшим їх дослідженням розробленими методами.

На першому етапі було удосконалено метод та прилад для контролю границі плинності за теплопровідним параметром та твердістю. Було досліджено наявність та характер залежності удосконаленого теплопровідного параметра від границі плинності. Дослідження було виконано на зразках, виготовлених із трубних марок сталей – 17ГС, 10Г2СБ, 09Г2С тощо. Границя плинності була визначена шляхом руйнівних випробувань на розтяг на розривній машині.

При обробленні результатів досліджень було використано алгоритми ШНМ для апроксимації залежності границі плинності як нелінійної функції від двох параметрів твердості та теплопровідного параметра  $M$ . Середня абсолютна похибка визначення границі плинності в цьому випадку складає  $\pm 20,3$  МПа, а отже суттєво (на 56%) підвищено точність визначення границі плинності шляхом внесення змін до алгоритму розрахунку теплопровідного параметра.

Також були проведені експериментальні дослідження нового підходу до визначення мікроструктурного стану сталезих труб неруйнівними методами. Суть цього підходу полягає в тому, що за значенням добутку вимірних значень коефіцієнта теплопровідності та питомого електричного опору визначається тип мікроструктури сталі. Додатковими інформативними параметрами служать коерцитивна сила та магнітна індукція.

Згідно із розробленою методикою було проведено термічне оброблення зразків. Для визначення мікроструктури термооброблених повнорозмірних зразків проведено металографічні дослідження на відповідних зразках-свідках. Засобами

неруйнівного контролю проведено серію вимірювань інформативних параметрів. Вимірювання вказаних параметрів здійснювалось як на основних зразках, так і на зразках-свідках перед їх металографічним дослідженням (табл.2). Узагальнені результати досліджень наведено на табл.3.

Таблиця 2 - Результати експериментальних досліджень на термооброблених зразках

Інформативний параметр	Середнє значення інформативного параметра		
	Зразок у стані поставки	Зразок відпалений	Зразок загартований
Твердість, НВ	156	132	422
Теплопровідний параметр, ум.од.	6,310	6,522	6,557
Електричний опір, мОм	2,251	2,181	2,443
Коерцитивна сила, А/см	6,52	4,79	13,54
Індуктивний параметр, ум.од.	1864,2	1752,7	1494,9

На рисунках 3-4 показані мікроскопічні зображення зразків 1-4, отримані у співпраці із Національною металургійною лабораторією (м.Джамшедпур, Індія).

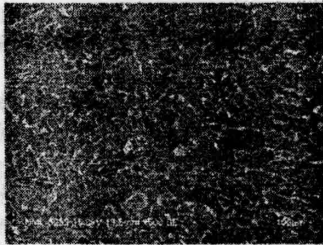
Співставляючи таблицю 3 та рисунки 3-4, бачимо чітку залежність між значеннями добутку теплопровідної характеристик та питомого електричного опору і структурою сталі. Крім того, ця залежність узгоджується із співвідношенням значень теплопровідності структурних фаз -  $\lambda_{\text{ферит}} = 76,8$  Вт/м $^{\circ}$ С значно більша за  $\lambda_{\text{перліт}} = 51,9$  Вт/м $^{\circ}$ С. Відповідно до таблиці 3 співвідношення значень для феритної та перлітної фази є оберненим - використовується питомий електричний опір як обернене значення електропровідності.

Таблиця 3 - Відомості щодо структурно-чутливих параметрів

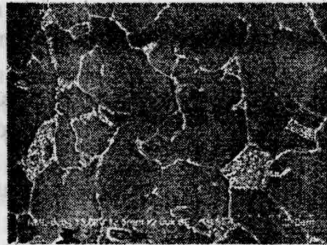
№ зразка	Теплопровідна характеристика, ум.од.	Питомий електричний опір, нОм·м	Добуток теплопровідної характеристики та питомого електричного опору	Границя плинності, МПа	Тип структури
1	3,749	370	1387,1	384,2	Ферито-перлітна
2	5,306	224	1188,5	294,3	Феритна
3	6,223	398	2476,8	472,9	Перлітна
4	4,557	329	1499,3	349,9	Ферито-перлітна



Таким чином, згідно із запропонованим методом, встановлено можливість чіткої якісної ідентифікації мікроструктур сталей за значеннями питомого електричного опору та теплопровідності, що узгоджується з результатами теоретичних досліджень.



а)



б)

Рисунок 3 - Мікроскопічне зображення структури зразка 2: (а) – збільшення 500 разів, (б) – збільшення 2000 разів



а)



б)

Рисунок 4 - Мікроскопічне зображення структури зразка 3: (а) – збільшення 500 разів, (б) – збільшення 2000 разів

Отримані результати підтверджують структурну чутливість значень добутку теплопровідного параметра та питомого електричного опору та демонструють значну перспективу його використання для визначення фактичних значень базових механічних характеристик (рис.5). Зокрема, було встановлено залежність цього добутку від границі плинності у наступному вигляді (1):

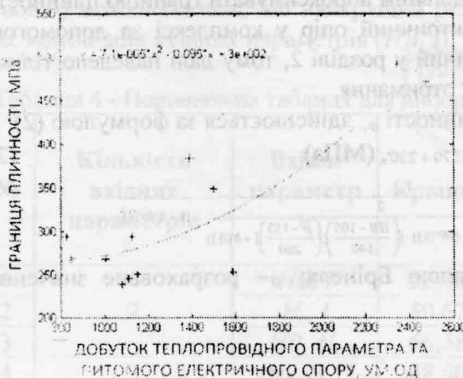


Рисунок 5 - Залежність границі плинності сталей від добутку теплопровідного параметра та питомого електричного опору

Залежність границі плинності трубопровідних сталей  $\sigma_T$  (МПа) від добутку теплопровідного параметра та питомого електричного опору  $d$  (ум.од.) може бути апроксимована залежністю квадратичного виду (1):

Розрахунок значення ударної в'язкості KCV здійснюється за формулою (3):

$$KCV = kcv \cdot 175 + 10, \quad (\text{Дж/см}^2) \quad (3)$$

$$kcv = \frac{1}{1 + \exp\left(\sum_{n=1}^{16} -LW\{2,1\} \left( \frac{1}{1 + \exp\left(-2 \sum_{m=1}^{16} (LW\{1,1\} \left[ \left( \frac{HB - 110}{300} \right) \left( \frac{l - 1500}{2500} \right) \right] + b\{1\} \right) \right) - 1\right) - 0,6214\right)}$$

де  $HB$  – значення твердості за шкалою Брінеля;  $l$  – значення частоти електромагнітних коливань індуктивного перетворювача;

$LW\{1,1\} = [9,4221 \quad 6,3288; -8,6635 \quad -7,3426; -0,58631 \quad -10,5965; -6,1432 \quad -9,1525; -11,0829 \quad 1,3392; -6,6773 \quad -9,1305; 7,8742 \quad 8,5187; 10,3431 \quad -4,284; -11,2559 \quad -0,90095; 11,1481 \quad -0,095188; -8,5964 \quad 7,0552; 8,6617 \quad -7,0863; -7,9573 \quad -7,5379; -4,7906 \quad 9,3672; 1,1692 \quad -10,5006; 1,7906 \quad -11,2348];$

$b\{1\} = [-13,2412; 12,6131; 10,8551; 11,316; 7,5966; 9,303; -7,855; -2,5236; 5,7447; -5,1104; 0,7519; 0,10452; 5,0344; -6,993; 10,7591; 9,9567];$

$LW\{2,1\} = [0,078762 \quad 0,2927 \quad -0,91329 \quad 0,22755 \quad 0,60355 \quad 0,81544 \quad 1,03 \quad 0,30647 \quad 0,98088 \quad -1,2417 \quad -0,085515 \quad 1,7299 \quad 1,9204 \quad -2,1243 \quad -1,4088 \quad 0,64934].$

У *четвертому розділі* викладено результати теоретичних та експериментальних досліджень, було розроблено нові методи, які забезпечують надійний контроль параметрів технічного стану металоконструкцій та матеріалів.

*Ідентифікація типів дефектів, виявлених засобами неруйнівного контролю.* Розроблено новий метод ідентифікації дефектів виробничого та експлуатаційного походження металоконструкцій.

Розпізнавання типів дефектів є важливим з економічної точки зору в процесі діагностики магістральних трубопроводів. Оскільки в разі неправильної класифікації дефекту ймовірними є непрогнозовані аварії та відмови або недоцільні роботи з шурфування, переізолювання тощо.

Запропонований метод базується на аналізуванні форми луно-сигналів, відбитих від виявлених дефектів за даними А-сканів. Зображення луно-сигналів, відбитих від різних типів дефектів (пласких та об'ємних), зображено на рисунку 6.

Основною ідеєю запропонованого підходу виділення характеристик стало компресування оцифрованих зображень А-сканів штучними нейронними мережами. Виділені характеристики беруться як виходи прихованого шару нейронів мережі, яка тренується на запам'ятовування набору даних (компресування сигналів). Втрати інформації не перевищують при цьому 5-7%. Виділені характеристики показані графічно на рисунку 7.

Таким чином, у результаті виконаних досліджень було запропоновано новий метод ідентифікації типів дефектів, суть якого полягає у виділенні та аналізуванні виходів нейронів прихованих шарів спеціально натренованих нейронних мереж, що дає можливість створювати системи автоматичної класифікації типів дефектів, виявлених ультразвуковими методами в режимі внутрішньотрубної діагностики.

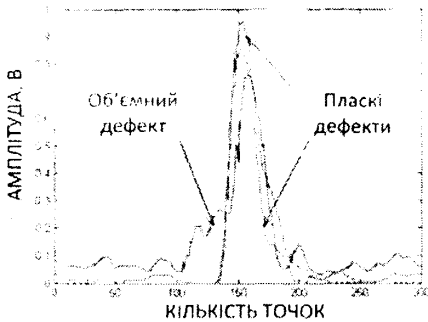


Рисунок 6 - Луно-сигнали, що відповідають двом типам дефектів

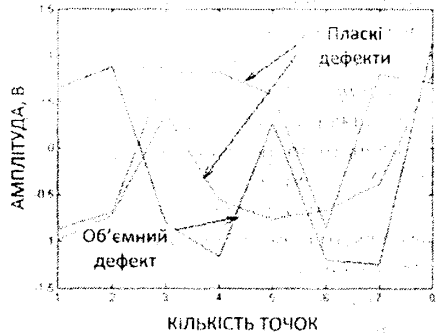


Рисунок 7 - Вилучені характеристики дефектів

Результати досліджень створили передумови для застосування цього методу у інших сферах промислового контролю, в т.ч. для контролювання фізико-хімічних параметрів природного газу.

Розроблено новий *метод підвищення чутливості акустичного контролю* дефектів як найбільш поширеного в промисловості, який дозволяє достовірно виявляти дефекти типу порушення суцільності матеріалу та його корозійні пошкодження за високих рівнів завод і може бути застосований при вимірюванні інших технічних та технологічних характеристик різними методами технічної діагностики. Основною проблемою ультразвукового контролю є те, що внаслідок ряду причин інформаційний сигнал, як правило, перебуває нижче рівня шуму або в суміші з випадковим білим шумом.

Було запропоновано новий метод локалізації маскованих шумом луно-імпульсів на базі ШНМ, суть якого полягає у виконанні певної послідовності обчислювальних операцій, описаних у патенті автора. За вибіркою із ультразвукового сигналу в цифровому вигляді, котрий містить інформативний корисний сигнал, реалізується метод «плаваючого вікна».

Реалізація запропонованого методу для вказаних наборів даних дозволила стверджувати, що за відношення сигнал/шум на рівні 0,3 похибка правильного детектування корисного сигналу складає не більше 1,2% (12 випадків із 1000, коли значення суми виходів нейронної мережі складало менше 2). В ході аналізування набору шумових сигналів кількість випадків помилкового розпізнання шуму як корисного сигналу дорівнювала 0,8% (8 випадків із 1000). Отже, можемо стверджувати, що шляхом оцінки виходів нейронів прихованого шару отриманої мережі можна розрізнати зашумлений корисний сигнал та простий білий шум.

*П'ятий розділ* присвячено розробленню технічних засобів, що реалізують розроблені методи контролю параметрів технічного стану трубопроводів.

У рамках виконання дисертаційного дослідження автором спільно з колективом кафедри технічної діагностики та моніторингу ІФНТУНГ протягом

останніх років розроблено ряд унікальних технологій та технічних засобів, що реалізують запропоновані у попередніх розділах методи.

*Прилад для контролю границі плинності трубних сталей за їх теплопровідністю та твердістю.* Для підтвердження проведених теоретичних досліджень та розробленого методу визначення механічних характеристик сталей було розроблено та виготовлено експериментальний взірець приладу ФМХ-2. Теоретичне підґрунтя його вдосконалення подано в 3-му розділі. При тестуванні приладу ФМХ-2 на двох нових зразках насосно-компресорних труб абсолютна похибка визначення границі плинності склала 11,6 МПа, або приведена до діапазону границі плинності відносна похибка – 2,6%.

*Прилад для контролю ударної в'язкості трубних сталей.* Експериментальний зразок ІВС 1-2 є ручним переносним приладом у пластиковому корпусі, до якого приєднується індуктивний перетворювач. Прилад реалізує запропонований метод визначення ударної в'язкості трубних сталей у 3-му розділі.

*Інформаційно-вимірвальна система для визначення границі плинності сталей за їх питомим електричним опором.* Враховуючи результати теоретичних досліджень, що показали доцільність використання питомого електричного опору, як інформативного параметра контролю границі плинності, було розроблено відповідний дослідний взірець ІВС (патент UA 87240).

Таким чином, розроблені методи та технічні засоби за умови їх широкого впровадження можуть стати складовими інструментами в галузі технічного діагностування об'єктів нафтогазового комплексу, управління ризиками безпечного експлуатування зазначених об'єктів та розрахунку їх залишкового ресурсу відповідно до сучасних нормативних документів.

*Промислова апробація розроблених технічних засобів на найбільш характерних трубопроводах тривалої експлуатації.* Оцінка залишкового ресурсу визначених ділянок магістрального газопроводу «Союз» на переході р.Айдар (1239 км), побудованому у 1977 році. Після введення в експлуатацію трубопроводу в 1979 році відбулось зміщення осі досліджуваного трубопроводу від проектного положення, яке продовжується до цього часу. Таке зміщення спричинило викривлення осі трубопроводу, що стало причиною збільшення внутрішніх механічних напружень у металі трубопроводу на окремих ділянках переходу.

Згідно з розробленою методикою обстеження за допомогою розроблених технічних засобів було проведено вимірювання фізико-механічних характеристик металу труб газопроводу - твердості, коерцитивної сили та ударної в'язкості. На рис. 8 зображено розподіл фактичних значень границі плинності та фактичних напружень у металі труби, розрахованих за вимірними значеннями коерцитивної сили.

Також було визначено фактичні значення границі плинності металу труби. Аналіз цих даних показав значну зміну величини границі плинності на досліджуваній ділянці газопроводу. Максимальне значення складає 649,2 МПа

(переріз №19), мінімальне – 364,6 МПа (№2). Такий розкид значень свідчить про зміну механічних властивостей у порівнянні з нормативними.

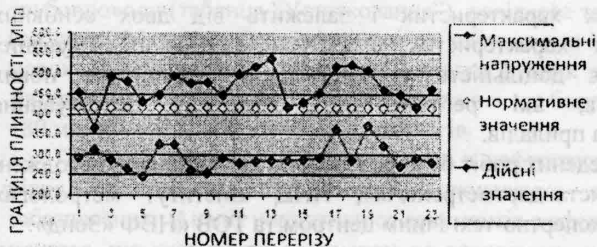


Рисунок 8 - Розподіл значень границі плинності та напружен на обстеженій ділянці газопроводу

*Досвід дослідження технічного стану потенційно небезпечної ділянки аміакопроводу.* Було проведено дослідження ділянок магістрального трубопроводу рідкого аміаку, який виготовлений з імпоротної сталі X42 та X46 (вітчизняний аналог 17ГС за ГОСТ 5520) на ділянці № 15 (ГПС 13ЦЗ, Одеська обл., Березівський р-н, с. Донська Балка) без втручання в режим роботи трубопроводу. Діаметр трубопроводу 355,6 мм, введений в експлуатацію 1979 року.

Визначення ударної в'язкості було здійснено за шкалою KCV за 0 °С. У сертифікатах на сталі регламентовано значення ударної в'язкості за Менаже (КСУ) при - 40 °С, визначених на зразках типу 1 (згідно з ГОСТ 9454-78). Значення ударної в'язкості визначені за Методикою виконання вимірювань ударної в'язкості сталей трубопровідного сортаменту. Границя плинності  $\sigma_m$  та границя міцності  $\sigma_a$  була визначена за Методикою виконання вимірювань границі плинності конструкційних (трубопровідних) сталей.

Подальший детальний аналіз матеріалу в досліджуваній ділянці показав, що жодних корозійно-втомних процесів немає, що підтвердило результати виконаних досліджень і дозволило не проводити дорзгогартісні ремонтні роботи.

*Шостий розділ* присвячений проблемам та перспективам розвитку нормативного забезпечення розроблених методів та засобів технічної діагностики об'єктів нафтогазового комплексу. Впровадження та подальше ефективне використання новітніх технологій та технічних засобів неможливе без їх належного нормативного забезпечення – це актуально для методів та засобів оцінки технічного стану магістральних трубопроводів. При цьому було взято до уваги такі аспекти: перехід на європейську модель у сфері стандартизації; суперечлива ситуація в Україні щодо трубопровідного транспорту: вимоги до якого регламентуються як великою кількістю нормативних документів національної системи стандартизації (ДСТУ, ТУ, СОУ тощо), а також нормативно-правовими актами в сфері охорони праці (НПАОП), які за юридичною силою є вищими, ніж стандарти.

*Розроблення методичного забезпечення для визначення фізико-механічних характеристик сталей.* Достовірність контролю ФМХ конструкційних матеріалів визначається стійкою відповідністю його результатів реальним значенням досліджуваних характеристик і залежить від двох основних чинників: метрологічних характеристик апаратури та використовуваних методик. Отже, виникає доцільність у розробленні принципово нових нормативних документів, які регламентують практику застосування розроблених технологій та приладів.

За результатами проведених робіт було розроблено дві методики, погоджені з ДП «Івано-Франківськстандартметрологія», ННЦ «Інститут метрології» (м.Харків), Карпатським експертно-технічним центром та ТОВ «НВФ «Зонд»:

- Методика виконання вимірювань ударної в'язкості сталей трубопровідного транспорту;

- Методика виконання вимірювань границі плинності конструкційний (трубопровідних) сталей.

Вказані методики успішно апробовані на об'єктах довготривалої експлуатації, що належать УДП «Укрхімтрансміак», Новопсковського ЛВУМГ, Богородчанського ЛВУМГ ДК «Укртрансгаз» тощо.

*Інформаційна база даних щодо інформативних параметрів та засобів вимірювань для визначення фізико-механічних характеристик.* З метою інформаційного забезпечення робіт з визначення ФМХ матеріалів було розроблено спеціалізовану інформаційну базу даних.

Розроблена інформаційна база даних за ФМХ металоконструкції містить інформацію про ФМХ сталей (твердість, границя міцності, границя плинності; густина, теплопровідність, електропровідність, фазо-структурні параметри, коерцитивна сила, швидкість поширення звуку тощо) і основні використовувані для контролю цих характеристик методи та засоби.

База даних створена у середовищі Microsoft Office Access. Для зручності користування базою створена інтерфейсна оболонка, через яку здійснюється інформаційний запит. Всі дані зберігаються в базі у формі таблиць, в яких вказуються назви джерел інформації, автори, рік видання, необхідні фізико-механічні характеристики і методи їх контролю.

*Банк даних фізико-механічних характеристик матеріалів обладнання та інструменту нафтогазової галузі.* З метою формування на національному рівні єдиної узгодженої та науково обгрунтованої політики щодо забезпечення надійності та безпечної експлуатації споруд, конструкцій, обладнання та інженерних мереж була розроблена та схвалена Кабінетом Міністрів України «Концепція Державної програми забезпечення технологічної безпеки в основних галузях економіки» та Державна науково-технічна програма «Ресурс». Одним із завдань цієї програми є створення банку даних про фізико-механічні властивості конструкції матеріалів та їх деградацію під час тривалої експлуатації.

В рамках дисертаційного дослідження було розроблено банк даних фізико-механічних характеристик сталей для системи трубопровідного транспорту.

Розроблений банк даних призначений для збору, зберігання, модифікації інформації і пошуку відповідей на запити користувачів. Банк даних складається з трьох частин: довідково-інформаційна таблиця про сталі, з яких виготовлені трубопроводи (таблиця “Устаткування”), довідкова таблиця про ФМХ цих сталей (таблиця “Матеріали”) та інформаційна таблиця про іноземні аналоги вітчизняних марок сталей (таблиця “Зарубіжні аналоги”). Банк даних містить відомості про матеріали понад 60 елементів устаткування трубопровідного транспорту, ФМХ 180 марок сталей і 60 зарубіжних аналогів.

У сфері технічного діагностування в нафтогазовій галузі зросли вимоги до рівня безпеки, що зумовило удосконалення відповідного нормативного забезпечення. Аналіз нормативних документів в сфері діагностики трубопроводів показав, що розроблені документи не враховують контролю всіх параметрів та критеріїв працездатного стану об'єкта.

На вирішення згаданих вище проблем було активізовано роботи зі стандартизації, зокрема, у рамках діяльності ТК 146 і за участю автора було розроблено ряд чинних нормативних документів (загалом понад 20), основні з яких згадані в практичній цінності роботи.

У додатках подано фізико-механічні характеристики іноземних марок сталей, графічні залежності механічних характеристик від інформативних параметрів контролю, методики досліджень та акти впроваджень результатів дисертаційної роботи.

## **ВИСНОВКИ**

У результаті проведених досліджень вирішена актуальна науково-прикладна проблема в галузі підвищення безпеки та надійності експлуатації магістральних трубопроводів, а саме вперше розроблено теоретичні основи багатопараметрової технічної діагностики лінійної частини магістральних трубопроводів довготривалої експлуатації і створено технічну і методичну (нормативну) базу для їх застосування в нафтогазовому комплексі. Отримано такі основні результати дисертаційної роботи і сформульовано наступні нові наукові положення:

1. Проведений аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку вітчизняних і зарубіжних досягнень з досліджуваної проблеми показав, що основними задачами, які потребують першочергового вирішення є: відсутність ефективних методів і засобів діагностики трубопроводів, зокрема, визначення фактичних механічних характеристик (границя плинності та міцності, ударна в'язкість) лінійної частини трубопроводів безпосередньо в умовах експлуатації; недосконалість методів ідентифікації типів і розмірів дефектів, визначеними різними методами неруйнівного контролю, що особливо важливо для виявлення типу дефектів за їх походженням, розмірами та просторовою орієнтацією; недосконалість методів та засобів контролю геометричних характеристик та

дефектоскопії металоконструкцій ультразвуковим методом в умовах неперервності та значних обсягів внутрішньотрубної діагностики.

2. Розроблено теоретичні основи багатопараметрової технічної діагностики лінійної частини магістральних трубопроводів, що полягає у новому підході до оцінювання технічного стану трубопроводів, суть якого полягає у застосуванні новітніх генетичних методів для пошуку, вибору та нелінійної оптимізації, з точки зору чутливості контролю, складу та кількості інформативних параметрів, що характеризують якість контрольованого об'єкта і можуть бути вимірними доступними засобами, що складає теоретичну основу для розроблення нових засобів і технологій неруйнівного контролю матеріалів і виробів різними методами. Запропоновано такі напрямки застосування методології: визначення фізико-механічних характеристик; контроль змін мікроструктурного стану матеріалу металоконструкцій; підвищення інформативності, у першу чергу акустичного, методів контролю за високого рівня завод; ідентифікації типів дефектів - заводського чи експлуатаційного походження.

3. Досліджено нові інформативні параметри, що визначають технічний стан лінійної частини магістральних трубопроводів, у результаті чого встановлено характер і види зв'язку між механічними характеристиками матеріалу металоконструкцій та його мікроструктурою. Для оцінки мікроструктури сталей трубопровідного сортаменту та діагностування накопичення пошкоджень на ранній стадії запропоновано використовувати теплопровідний параметр і питомий електричний опір. Дослідження показали, що в межах однієї мікроструктурної групи сталей точність визначення фізико-механічних характеристик суттєво зростає. Це дало змогу пояснити механізм деградування механічних характеристик сталей трубопровідного транспорту під впливом експлуатаційних чинників і запропонувати нові інформаційні параметри, які раніше не використовувалися - теплопровідність, питомий електричний опір та спеціальний електромагнітний параметр для контролю як фізико-механічних характеристик, так і типу мікроструктури сталей. Також були досліджені та вибрані комплекси інформативних параметрів для контролю границі плинності та ударної в'язкості, які суттєво підвищують достовірність визначення фізико-механічних характеристик неруйнівними методами.

4. Запропоновано та експериментально перевірено нові ефективні з огляду на чутливість методи контролю параметрів, відповідальних за технічний стан лінійної частини магістральних трубопроводів, що дає змогу за високих рівнів завод надійно виявляти різні види дефектів; метод класифікації дефектів типу порушення суцільності матеріалу за ознакою його заводського чи експлуатаційного походження, що можуть бути використані, в т.ч. для внутрішньотрубної діагностики; неруйнівні методи визначення границі плинності (міцності) та ударної в'язкості матеріалу металоконструкцій в експлуатаційних умовах.

5. Розроблено і впроваджено нові технічні засоби, технології та нормативні документи, які реалізують можливість багатопараметрового контролю і дають



можливість в експлуатаційних умовах здійснювати контроль важливих характеристик (границя плинності/міцності, ударна в'язкість) об'єктів нафтогазового комплексу, невідповідність яких встановленим нормативним значенням може призвести до виникнення відмов та аварійних ситуацій. Особливістю технічних засобів є те, що в процесі їх розроблення була застосована методологія алгоритмів штучних нейронних мереж, що створило передумови для спрощення технічних засобів неруйнівного контролю, підвищення точності і розширення меж застосування окремих методів. Розроблено та виготовлено прилад для експрес-контролю якості природного газу, що полягає у сумісному вимірюванні швидкості поширення звуку та вмісту діоксиду вуглецю в газі. Розроблено та погоджено із ННЦ «Інститут метрології», ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» та Карпатським експертно-технічним центром «Методику виконання вимірювань границі плинності конструкційних (трубопровідних) сталей» та «Методику виконання вимірювань ударної в'язкості сталей трубопровідного сортаменту». Створено та наповнено інформаційні бази даних «Інформативні параметри та засоби вимірювань для визначення фізико-механічних характеристик» і «Фізико-механічні характеристики матеріалів устаткування трубопровідного транспорту». Розроблено та впроваджено низку нормативних документів різних категорій. Економічний ефект від впровадження результатів проведених досліджень буде отримано за рахунок попередження аварій та відмов устаткування, необ'єктних ремонтних робіт тощо. Очікуваний економічний ефект в УМГ «Прикарпаттрансгаз» становитиме не менше 12,6 млн.грн.

## **СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Неруйнівні методи визначення фізико-механічних характеристик металоконструкцій тривалої експлуатації : монографія / М.О. Карпаш, Є.Р. Доценко, Н.Л. Тацакович, О.М. Карпаш ; Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – 309 с.
2. Акустичний контроль конструкцій та устаткування у нафтогазовій галузі: монографія / М.О.Карпаш, І.В.Рибіцький, Т.Т.Котурбаш, О.Г.Бондаренко, О.М.Карпаш ; Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. – 420 с.
3. І.В.Рибіцький. Аналіз безконтактних методів ультразвукового контролю матеріалів і виробів // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів (серія), вип.12: Неруйнівний контроль та технічна діагностика матеріалів і конструкцій: збірник наукових праць / І.В.Рибіцький, О.М.Карпаш, М.О. Карпаш. – Львів: Фізико-механічний інститут ім.Г.В.Карпенка НАН України, 2007. – С.111-116.
4. Карпаш М. Підвищення чутливості акустичного методу неруйнівного контролю матеріалів / Карпаш Максим // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2011. – № 4. – С.39-43.

5. Карпаш О.М. Комплексний метод контролю фізико-механічних характеристик матеріалів металоконструкцій / О.М. Карпаш, Є.Р. Доценко, М.О. Карпаш // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2011. - №5. – С.40-47.

6. Карпаш О.М. Удосконалення методу визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій довготривалої експлуатації // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів (серія), вип.12: Неруйнівний контроль та технічна діагностика матеріалів і конструкцій: Зб.наук.праць / М.О. Карпаш, Т.Т.Котурбаш. – Львів: Фізико-механічний інститут ім.Г.В.Карпенка НАН України, 2007. – С.219-224.

7. Карпаш М. Підвищення інформативності визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій довготривалої експлуатації / Карпаш М.Аксим, Доценко Євген // Методи та прилади контролю якості. – 2007. - № 18. – С.13-17.

8. М.О. Карпаш. Новий підхід до визначення фізико-механічних характеристик сталей з врахуванням їх структури / М.О. Карпаш, Є.Р.Доценко, О.М.Карпаш. // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів (серія), вип.13: Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій: Зб.наук.праць. – Львів: Фізико-механічний інститут ім.Г.В.Карпенка НАН України. – 2008. – С.203-208.

9. О.М.Карпаш. Дослідження взаємозв'язку між структурним станом сталей та фізико-механічними характеристиками сталей / О.М.Карпаш, М.О.Карпаш, Є.Р.Доценко. // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: Спецвипуск журналу „Фізико-хімічна механіка матеріалів”. Т.2. - № 7. –2008. – с.724-729.

10. Evaluation of mechanical properties of steels using neural network approach / M.Karpash, O.Karpash, E.Dotsenko // Scientific Bulletin Series C, North University of Baia Mare. – Vol.XXII, 7th Edition. – 2008. – p. 239-244.

11. Питомий електричний опір як інформативний параметр визначення фактичних фізико-механічних характеристик конструкційних сталей / О.М.Карпаш, Є.Р.Доценко, М.О.Карпаш, А.В.Василик. // Металлофізика и новейшие технологии: т.30, спецвипуск. – 2008. – С.213-219.

12. Є.Р.Доценко. Експериментальні дослідження щодо можливості застосування чотириконтактного електричного методу для контролю питомого електричного опору габаритних сталевих конструкцій / Є.Р.Доценко, О.М.Карпаш, М.О.Карпаш // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2010. - № 3(21). – С.186-191.

13. Є.Р.Доценко. Дослідження методу визначення напруження плинності конструкційних сталей за значеннями їх питомого опору / Є.Р.Доценко, М.О.Карпаш, О.М.Карпаш // Методи та прилади контролю якості. – № 24. –2010. –С.105-111.

14. Karpash M.O. New non-destructive methods for physical and mechanical properties evaluation of metalworks materials / Karpash M.O., Dotsenko Ye.R,

Tatsakovych N.L. // Edition of Scientific Machine Union. – Vol. XIX, Sozopol (Bulgaria). – June 2011. – p. 32-36. – ISSN 1310-3946.

15. Карпаш М. Дослідження взаємозв'язку механічних характеристик, мікроструктури та інформативних параметрів неруйнівного контролю / Карпаш Максим // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – К.: Междунар. ассоциация "Сварка", 2012. – №1. – С. 42-48.

16. Миндюк В.Д. Особливості деградації структури матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації та оцінка можливості її діагностування в нафтогазовому комплексі / В.Д. Миндюк, С.Р.Доценко, М.О.Карпаш. // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2011. – № 2 (28). – С.91-97.

17. Карпаш О.М. Експериментальна перевірка можливості використання взаємкореляційного та нейромережевого підходів для підвищення чутливості безконтактного ультразвукового способу контролю товщини матеріалів // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів (серія), вип.13: Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій: збірник наукових праць / О.М.Карпаш, І.В.Рибіцький, М.О.Карпаш. – Львів: Фізико-механічний інститут ім.Г.В.Карпенка НАН України, 2008. – С.152-160.

18. Карпаш О.М. Експериментальна установка для вимірювання товщини металоконструкцій безконтактним акустичним методом / О.М.Карпаш, І.В.Рибіцький, М.О.Карпаш // Методи та прилади контролю якості. – 2008. – № 20. – С.7-12.

19. Карпаш О.М. Обґрунтування можливості використання кодів Баркера для підвищення чутливості ультразвукового безконтактного способу вимірювання товщини / О.М.Карпаш, І.В.Рибіцький, М.О.Карпаш. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. – № 2. – С.31-35.

20. Карпаш О.М. Нові інформативні параметри для визначення теплоти згоряння природного газу О.М. Карпаш, І.Я. Дарвай, М.О. Карпаш. // Нафтова і газова промисловість. – 2008. – № 4. – С.57-60.

21. Karpash O. New approach to natural gas quality determination / O.Karpash, I.Darvay, M.Karpash. //Journal of Petroleum Science and Engineering. – Vol. 71, Issues 3-4. – April 2010. – p. 133-137.

22. Експериментальна установка для безконтактного акустичного контролю елементів металоконструкцій після корозійного пошкодження / О.Карпаш, Т.Котрубаш, І.Рибіцький, М.Карпаш, А.Яворський // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: В 2-х т. Спецвипуск журналу „Фізико-хімічна механіка матеріалів” (Фізико-механічний інститут ім.Г.В.Карпенка НАН України). Т.2. – 2010. – № 8. – С.531-535.

23. Experimental setup for air coupled ultrasonic hardware thickness control / Karpash O.M., Rybitsky I.V., Karpash M.O., Koturbash T.T // Edition of Scientific Machine Union. – Vol. XIX, Sozopol (Bulgaria). – June 2011. – p. 52-55. – ISSN 1310-3946.

24. New low-cost method for determination of heating value of natural gas / Rybitskiy I., Karpash O., Darvay I., Karpash M. / *Wiertnictwo. Nafta. Gaz.* – Vol. 28, Issue 1-2. Krakow. – 2011. – p.333-338. – ISSN 1507-0042.

25. Учанін В Застосування нейронних мереж для ідентифікації та оцінки параметрів дефектів вихрострумовим методом / Учанін Валентин, Карпаш Максим // *Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів: Зб. наук. пр.* – 2002. – Вип. 7. – С. 67-72.

26. Райтер П. Нейронні мережі для контролю структури газорідного потоку / Райтер Петро, Карпаш Максим // *Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів: Зб. наук. праць.* – 2003. – Вип. 8. – С. 223-227.

27. Non-destructive testing of drilling oil and gas equipment and tools / O.Karpash, M.Karpash, P.Krynchnyj // *Scientific Bulletin Series C, North University of Baia Mare.* – Vol. XX, Part 1. – 2006. – p. 15-20.

28. Технології та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики нафтогазового обладнання / Карпаш О.М., Зінчак Я.М., Карпаш М.О. // *Нафтова і газова промисловість.* – 2007. – № 6. – С.8-11.

29. Розвиток засобів неруйнівного контролю і технічної діагностики в нафтогазовій галузі / Карпаш О.М., Карпаш М.О., Рибіцький І.В., Тацакович Н.Л. // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль.* – 2009. – № 3. – С.35-41.

30. Розроблення інформаційної бази даних щодо фізико-механічних характеристик сталей методами неруйнівного контролю / М.О. Карпаш, Н.Л.Тацакович, О.М.Карпаш. // *Методи і прилади контролю якості.* – 2007. – № 17. – С. 17-21.

31. Інформаційне забезпечення у сфері контролю фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій / М.О. Карпаш, Н.Л. Тацакович, О.М. Карпаш, В.Д. Миндюк // *Нафтова і газова промисловість.* – 2008. - № 3. – С.51-53.

32. ТК 146: проблеми та перспективи стандартизації в нафтогазовій галузі / Крижанівський Є.І., Карпаш О.М., Зінчак Я.М., Карпаш М.О., Тацакович Н.Л. // *Стандартизація, сертифікація, якість.* – 2009. – № 5. – С.16-19.

33. Анализ состояния системы технического регулирования в нефтегазовых отраслях стран Восточной Европы и Кавказа / М.Карпаш, Э.Ниеминен. // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ.* – 2009. – № 4. – С. 110-115.

34. Переваги та проблеми впровадження міжнародних і європейських стандартів у нафтогазовій галузі України / Карпаш М.О., Когут Г.М., Тацакович Н.Л., Карпаш О.М. // *Нафтова і газова промисловість.* – 2009. – № 4. – С.3-5.

35. Удосконалення системи технічного регулювання в нафтогазовій галузі України / Крижанівський Є.І., Зінчак Я.М., Карпаш М.О., Тацакович Н.Л. // *Нафтова і газова промисловість.* – 2009. – № 5-6. – С. 4-6.

36. Карпаш О.М. Про деякі питання методичного забезпечення у сфері технічної діагностики / О.М.Карпаш, Я.М.Зінчак, М.О.Карпаш. // *Технічна діагностика і неруйнівний контроль.* – 2010. – № 3. – С.55-58.

37. Методологические основы реформирования систем технического регулирования в нефтегазовом секторе стран Восточной Европы и Кавказа / Ниёминен Э., Карпаш М.О., Минакова А., Тацакович Н.Л. // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – №2.–С.371-382.(URL:[http://www.ogbus.ru/authors/Nieminen/Nieminen\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Nieminen/Nieminen_1.pdf)).

38. Пат. UA 42294. Спосіб неруйнівного контролю ударної в'язкості елементів металоконструкцій / Карпаш О.М., Тацакович Н.Л., Карпаш М.О., Рибіцький І.В. (Україна). – Опубл. 25.06.2009р, Бюл.№12, 2009 р.

39. Патент на винахід UA 87240. Спосіб неруйнівного визначення механічних характеристик сталей / Карпаш М.О., Доценко Є.Р., Карпаш О.М. (Україна). - Опубл. 25.06.2009., Бюл.№12, 2009р.

40. Патент на винахід UA 87910. Спосіб детектування сигналів із високими значеннями шуму / Карпаш М.О., Карпаш О.М. (Україна). - Опубл. 25.08.2009., Бюл.№16, 2009р.

41. Патент на винахід UA 90007. Акустичний спосіб безконтактного контролю глибини корозійного пошкодження трубопроводів / Карпаш О.М., Карпаш М.О., Рибіцький І.В., Котурбаш Т.Т. (Україна). – Опубл. 25.03.2010, Бюл.№ 6, 2010р.

42. Доценко Є.Р. Стан і перспективи розвитку неруйнівних методів і засобів визначення фізико-механічних характеристик матеріалів з урахуванням їх деградації / Є.Р.Доценко, М.О.Карпаш, Ю.М.Бурда // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова енергетика 2011». – м.Івано-Франківськ, 10-14.10.2011р., с.62.

43. Karpash M., Karpash O., Dotsenko E. New challenges for mechanical properties evaluation of long-term used metallic structures. Proceedings of 4th International Symposium on Hydrocarbons and Chemistry, Ghardaia, Algeria, march 24-26, 2008, P.64.

44. Карпаш М.О. Перспективи застосування штучних нейронних мереж в неруйнівному контролі / М.О. Карпаш // Матеріали 6-ої Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика». – м.Київ, 9-12 червня 2009р.,с.292-293.

45. Карпаш О.М. Метод контролю механічних характеристик матеріалу металоконструкцій за кількома параметрами / О.М.Карпаш, Є.Р.Доценко, М.О.Карпаш // Матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів» ЛЕОТЕСТ-2011. – м.Славське Львівської області, 21-26 лютого 2011 року, с.116-119.

46. Karpash O., Karpash M. New neural-based method for evaluation of mechanical properties of steels. Proceedings of 9th European Conference of Non-destructive testing, Berlin, 25-29 September 2006, P114.

47. Карпаш М.О. Розроблення нових неруйнівних методів визначення фактичних фізико-механічних характеристик сталевих трубопроводів / М.О.Карпаш, Є.Р.Доценко, О.М.Карпаш // Тези доповідей Міжнародної науково-

технічної конференції „Міцність та надійність магістральних трубопроводів (МТ-2008)”. – Інститут проблем міцності ім.Г.С.Писаренка НАН України, Київ, Україна, 5-7 червня 2008р. – с. 44-45.

48. Карпаш О.М. Проблемні питання визначення питомого електричного опору феромагнітних сталей / О.М.Карпаш, С.Р. Доценко, М.О.Карпаш // Матеріали 6-ої Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика». – м.Київ, 9-12 червня 2009р., с.308-311.

49. Karpash O., Tatsakovych N., Karpash M., Parida N. Improvement of pipelines' remaining life assessment method by using impact toughness parameter. Proceedings of 5th International Symposium on Hydrocarbons and Chemistry (ISHC5), Sidi Fredj, Algeria, May 23-25, 2010, P.122.

50. Karpash O., Dotsenko Y., Karpash M., Mitra A. Experimental investigation for electrical resistivity measurement of metallic structures using four-point method. Proceedings of 5th International Symposium on Hydrocarbons and Chemistry (ISHC5), Sidi Fredj, Algeria, May 23-25, 2010, P.112.

51. Tatsakovych N., Karpash O., Karpash M. New method for non-destructive evaluation of impact strength of steel pipelines. Proceedings of 10th European Conference of Non-Destructive Testing, Moscow, 7-11 June 2010, Part 2, P.78-79 (1.11.10).

52. Karpash M., Dotsenko Y., Karpash O. New methods for mechanical properties evaluation of steel structures with consideration of its microstructure. Proceedings of 10th European Conference of Non-Destructive Testing, Moscow, 7-11 June 2010, Part 2, P.270-271 (4.2.16).

53. Карпаш М.О. Новые методы и средства оценки физико-механических характеристик материалов металлоконструкций / М.О.Карпаш, Е.Р.Доценко, Н.Л.Тацакович // Материалы V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» РДМК-2011. – г.Екатеринбург (Россия), 25-28 апреля 2011 года ([http://www.imach.uran.ru/conf/rdmk5/Тезисы\\_2011//doc149.doc](http://www.imach.uran.ru/conf/rdmk5/Тезисы_2011//doc149.doc))

54. Доценко Е.Р. Оценка изменений механических свойств металла магистральных трубопроводов с использованием методов неразрушающего контроля / Е.Р. Доценко, В.Д.Мындюк, М.О. Карпаш // Материалы VII международной н/т конф. «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта». – Новозолоток (Беларусь), 22-25 ноября 2011г., с.143-145.

55. Karpash O., Karpash M., Mynduk V. Development of automatic neural network classifier of defects detected by ultrasonic means. Proceedings of 9th European Conference of Non-destructive testing, Berlin, 25-29 September 2006, P142.

56. Rybitsky I., Karpash O., Yavorsky A., Karpash M. Non-contact air-coupled ultrasonic measurement of geometry parameters of metallic structures. Proceedings of 10th European Conference of Non-Destructive Testing, Moscow, 7-11 June 2010, Part 1, P.148 (1.3.43).

57. Котурбаш Т.Т. Ідентифікація типів порушень суцільності в ході ультразвукового контролю / Т.Т. Котурбаш, М.О.Карпаш, І.В.Рибіцький // Матеріали XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів» ЛЕОТЕСТ-2012. – м.Славське Львівської області, 20-25 лютого 2012 року, с.105-108.

58. Неразрушающий контроль и техническая диагностика в нефтегазовом секторе: достижения и опыт / О.М.Карпаш, М.О.Карпаш, А.В.Яворский, И.В.Рыбицкий, Н.Л.Тацакович // Материалы Международной научной конференции «Научные основы внедрения новых технологий в эпоху нового возрождения». – г.Ашгабат (Туркменистан), 12-14 июня 2009г., с.166-170.

59. Новітні методи та засоби технічної діагностики систем транспортування та зберігання енергоносіїв / М.О.Карпаш, О.М.Карпаш, Н.Л.Тацакович, Є.Р.Доценко, А.В.Яворський // Матеріали 19-ої міжнародної конференції «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики» - м.Гурзуф, 3-7.10.2011 року, с.27-29.

60. Оцінка ступеню деградації матеріалу труб аміакопроводу неруйнівними методами контролю / В.Д.Миндюк, М.О.Карпаш, А.В. Яворський, Є.Р. Доценко, І.В. Рибіцький, М.П. Андрієшин // Матеріали XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів» ЛЕОТЕСТ-2012.–м.Славське Львівської області, 20-25.02.2012 року, с.58-62.

61. Карпаш М.О. ТК 146: проблеми та перспективи стандартизації в нафтогазовій галузі України / М.О.Карпаш, Н.Л.Тацакович, О.М.Карпаш // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова енергетика 2011». – м.Івано-Франківськ, 10-14 жовтня 2011р., с.66.

## АНОТАЦІЯ

**Карпаш М.О. Розвиток методів, засобів та технологій багатопараметрового контролю технічного стану магістральних трубопроводів. - Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2013.

Наведено результати аналізу сучасного стану та тенденцій розвитку вітчизняних та зарубіжних досягнень з досліджуваної проблеми, що дозволив визначити напрямки подальших досліджень. Запропоновано методологію оцінки технічного стану металоконструкцій, в тому числі і магістральних трубопроводів, багатопараметровими методами, суть якої полягає у застосуванні новітніх генетичних методів для пошуку, вибору, та нелінійної оптимізації, з точки зору чутливості контролю, складу та кількості інформативних параметрів, що характеризують якість контрольованого об'єкту і можуть бути вимірними

доступними засобами, що складає теоретичну основу для розроблення нових засобів та технологій неруйнівного контролю матеріалів та виробів різними методами.

Встановлено характер та види зв'язку між механічними характеристиками матеріалу металоконструкцій та його структурою. Також були досліджені та вибрані комплекси інформативних параметрів для контролю границі плинності та ударної в'язкості, які дозволяють суттєво підвищити достовірність визначення фізико-механічних характеристик неруйнівними методами. Запропоновано та експериментально перевірено нові методи контролю параметрів, відповідальних за технічний стан металоконструкцій довготривалої експлуатації, а саме: метод підвищення чутливості, в першу чергу акустичного, методів контролю матеріалів та виробів, який дозволяє за високих рівнів завад надійно виявляти різні види дефектів; метод класифікації дефектів типу порушення суцільності матеріалу за ознакою його заводського чи експлуатаційного походження; неруйнівні методи визначення границі плинності (міцності) та ударної в'язкості матеріалу металоконструкцій в експлуатаційних умовах. Запропонована нова методологія визначення споживчих властивостей (теплоти згоряння) природного газу. Розроблено та впроваджено нові технічні засоби, технології та нормативні документи, які реалізують можливість багалопараметрового контролю та дозволяють в експлуатаційних умовах здійснювати контроль ряду важливих характеристик об'єктів нафтогазового комплексу.

**Ключові слова:** багалопараметровий контроль, нафтогазопроводи, технічний стан, фізико-механічні характеристики, товщина стінки, дефекти, нормативні документи.

## АННОТАЦІЯ

**Карпаш М.О. Развитие методов, средств и технологий многопараметрического контроля технического состояния магистральных трубопроводов. - Рукопись.**

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.15.13 – трубопроводный транспорт, нефтегазохранилища. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2013.

Приведены результаты анализа современного состояния и тенденций развития отечественных и зарубежных достижений по исследуемой проблеме показал, что основными задачами, требующими первоочередного решения являются следующие: отсутствие эффективных методов и средств определения фактических механических свойств, несовершенство методов идентификации типов и размеров дефектов, определенных разными методами неразрушающего контроля, несовершенство методов и средств контроля геометрических характеристик и дефектоскопии металлоконструкций наиболее распространенным в нефтегазовой отрасли методом (ультразвуковым).



Предложено методологию оценки технического состояния металлоконструкций, в том числе, и магистральных трубопроводов, многопараметровыми методами, суть которой состоит в применении новых генетических методов для поиска, выбора и нелинейной оптимизации с точки зрения чувствительности контроля, состава и количества информативных параметров, характеризующих качество контролируемого объекта и могут быть измеренными доступными техническими средствами, что послужило теоретическим обоснованием для разработки новых средств и технологий контроля технического состояния различными методами.

Установлены характер и виды связи между механическими характеристиками материала металлоконструкций и его структурой. Исследования показали, что в пределах одной микроструктурной группы сталей точность определения физико-механических свойств существенно возрастает. Это дало возможность объяснить механизм деградации механических свойств сталей трубопроводного транспорта под воздействием эксплуатационных факторов и предложить новые информационные параметры, не использовавшиеся ранее для этой цели – теплопроводность, удельное электрическое сопротивление и электромагнитный параметр для контроля как физико-механических свойств, так и типа микроструктуры. Также были исследованы и выбраны комплексы информативных параметров для контроля предела текучести и ударной вязкости, позволяющие существенно повысить достоверность определения физико-механических свойств.

Предложено и экспериментально проверено новые методы контроля параметров, отвечающих за техническое состояние металлоконструкций длительной эксплуатации, а именно: метод повышения чувствительности, в первую очередь, акустического метода контроля, позволяющим при высоких уровнях шумов (отношение сигнал/шум меньше 1) надежно выявлять разные типы дефектов; метод классификации дефектов нарушения сплошности материала по типу его заводского или эксплуатационного происхождения; неразрушающие методы определения предела текучести и ударной вязкости материалов металлоконструкций в эксплуатационных условиях. Также предложена методология определения потребительских свойств (теплоты сгорания) природного газа путем определения оптимального комплекса информативных параметров (скорость распространения звука в природном газе, содержание в нем азота и диоксида углерода) контроля качества природного газа и решения задачи их нелинейной аппроксимации, что дало возможность разработать новый высокоэффективный метод контроля и соответствующее техническое средство.

Разработано и внедрено новые технические средства, технологии и нормативные документы, реализующие возможность многопараметрового контроля и позволяют в эксплуатационных условиях осуществлять контроль ряда важных характеристик (предел прочности/текучести, ударная вязкость) объектов трубопроводного транспорта.

**Ключевые слова:** многопараметровый контроль, нефтегазопроводы, техническое состояние, физико-механические свойства, толщина стенки, дефекты, нормативные документы.

## ABSTRACT

**Karpash M.O. Development of methods, means and technologies for multiparameter technical state evaluation of main pipelines.** – Manuscript.

Dissertation for scientific degree of doctor of technical sciences for the speciality 05.15.13 - Pipeline transport, oil and gas storages. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2013.

Results of modern state and trends of development of national and foreign achievements in the research topic are provided what acted as grounding for further research task formulation. Methodology for metallic structures' technical state assessment, including main pipelines, using multiparameter methods was proposed, which focuses on application of novel genetic methods for selection and non-linear optimization of informative parameters related with inspected object quality and can be measured using available technical means – this became a theoretical basis for development of new means and technologies of technical state assessment using different methods.

The character and types of relationships between mechanical properties and microstructure of steel pipelines was established. Also complex sets of informative parameters for yield strength and fracture toughness evaluation were selected and investigated, which allowed to raise reliability of mechanical properties evaluation. New methods for control of parameters, responsible for metallic structures technical state were proposed and experimentally verified. Firstly, sensitivity enhancement method has been proposed for ultrasonic testing of materials, which allows reliable detection of different defects under noisy conditions. Secondly, method of defect classification was proposed which allow to distinguish between flaws of manufacturing and operating origin. Thirdly, non-destructive methods for yield strength and fracture toughness of steel structures were proposed and investigated. New methodology for heating value of natural gas evaluation was proposed. Developed and practically applied new technical means, technologies and normative documents, which realize multiparameter approach and allow operational control technical state parameters.

**Key words:** multiparameter control, oil and gas pipelines, mechanical properties, technical state, wall thickness, defects, normative documents.