

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Міністерство освіти і науки України

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Карпаш Андрій Михайлович

УДК 622.691.4:539.4.014

ДИСЕРТАЦІЯ

**Удосконалення методів контролю напруженого стану металоконструкцій
довготривалої експлуатації (на прикладі АГНКС)**

05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

18. Виробництво та технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ А.М. Карпаш

Науковий керівник Тацакович Назарій Любомирович доцент, кандидат
технічних наук

Івано-Франківськ – 2018

АНОТАЦІЯ

Карпаш А.М. Удосконалення методів контролю напруженого стану металоконструкцій довготривалої експлуатації (на прикладі АГНКС). – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

Дисертаційна робота спрямована на підвищення якості методів оцінки та забезпечення надійності експлуатації посудин, що працюють під тиском (ППТ) на прикладі автомобільних газонаповнювальних компресорних станцій (АГНКС) шляхом розробки нових підходів контролю та визначення рівня напруженого стану через урахування комплексу фізичних інформативних параметрів, які чутливі до зміни фізико-механічних характеристик (ФМХ) матеріалу.

Проаналізувавши сучасний стан металоконструкцій довготривалої експлуатації (на прикладі АГНКС), а також існуючі методи та технології оцінки рівня напруженого стану, перспективи їх розвитку було встановлено, що проблема визначення напружень не має остаточного вирішення. Відомі методи є застарілими та недостатніми для правильної оцінки та визначення напружень, оскільки не враховують численні фактори впливу, що діють на конструкцію. Результатом є зниження рівня безпечної експлуатації та хибна оцінка рівня напружень робочих об'єктів. Встановлена проблема і її вирішення є актуальним завданням, оскільки значна частина ППТ експлуатується у складних умовах, де прослідковуються знакозмінні навантаження, високі тиски, вплив температурних режимів, робочого середовища, вібрації, корозії, тощо. Сумарна дія не врахованого комплексу факторів впливу на робочий матеріал металоконструкції

спричинює зростання навантаження і появу ризиків руйнування, що є не припустимим.

Результатом детального аналізу об'єкту дослідження було проведено класифікацію посудин, що працюють під тиском за типом робочого середовища, типом встановлення, типом виготовлення, конфігурацією, призначенням та кількістю циклів. Описані основні режими та умови експлуатації, а також перелічені чимало факторів впливу, що безпосередньо діють на об'єкт експлуатації, це: агресивне робоче середовище, корозійні процеси, вібрація, зміна просторової положення, знакозмінні навантаження, температурні впливи, багатоциклові навантаження, механічні впливи, тощо.

Також проаналізувавши існуючі методи контролю, визначення і оцінки напружень було проведено їх класифікацію і сформовано структурно-наслідкову схему діагностичної моделі ППТ, результатом чого були встановлені найбільш перспективні методи та сучасні підходи до визначення напружень. Встановлено, що актуальним залишається питання у розробці нових підходів та методологій визначення напруженого стану з урахуванням багатьох інформативних параметрів в комплексі, які представляють окремі фізико-механічні характеристики. Ці параметри характеризуються різними типами фізичних полів і формують основу багатопараметрового контролю.

Теоретичні дослідження дали змогу навести формалізоване подання ППТ, як об'єкта дослідження з метою оцінки її технічного стану. Наведені, модель оцінки напруженого стану, яка відображає строгу математичну постановку задачі з початковими та кінцевими умовами, модель, яка враховує найбільш відомі фактори силового впливу та модель, яка передбачає побудову алгоритмів регуляризації некоректної задачі відновлення фізико-механічних полів на всій досліджуваній області за їх значенням на певній підмножині тіла.

Також, результатом теоретичних досліджень є розроблений новий підхід до визначення напружень у стінках ППТ, який передбачає математичне моделювання процесу деформування посудини при її тривалій експлуатації за

даними, що характеризують зміну просторової конфігурації. На відміну від існуючих методів новий підхід дозволяє проводити оцінку напруженого стану без інформації про сили та навантаження, що діють на посудину протягом тривалого часу.

Розроблений та запропонований математичний апарат для визначення факторів силового впливу на основі апарату асоціативного аналізу та встановлення аналітичної структури цієї залежності, що дозволяє проводити оцінку несиметричних напружень, які виникають у матеріалі посудини протягом тривалої експлуатації.

Математичну модель було випробувано на даних отриманих експериментальним шляхом, що формували комплекс фізичних інформативних параметрів. Порівняльний аналіз фактичного та розрахованого рівня напруження підтвердило правильність математичної моделі.

Підтвердженням адекватності теоретичних та математичних досліджень розроблено методологію експериментальних досліджень, за якою експеримент складався з двох основних етапів.

Мета першого етапу це визначення та вибір інформативних параметрів, які реагують на зміну рівня навантаження. Досліджуваними інформативними параметрами були: магнітні параметри I_1 та I_2 , питомий електричний опір, твердість, швидкість поширення ультразвуку у металі і коерцитивна сила. Експериментальними зразками були плоскі зразки виготовлені із трубного матеріалу у відповідності до нормативних документів, вони піддавалися випробуванню на розрив, під час якого проводилися вимірювання фізичних інформативних параметрів технічними засобами контролю. Після отримання фізичних інформативних параметрів шляхом вимірювання технічними засобами та їх обробки встановлювалися наявності зв'язків графічним та кореляційним методами. Фізичні Інформативні параметри, які мали чітко виражений зв'язок або залежність від навантаження, а отже і від напруження виокремлювалися і були зараховані до тих, які досліджуватимуться у 2-му етапі. До таких віднесли:

коерцитивну силу, твердість, питомий електричний опір та магнітний параметр I_2 з частотою вимірювання 25кГц.

Мета другого етапу – підтвердження правильності вибору інформативних параметрів у першому етапі та визначення характеру їх зв'язку із напруженням. Досліджуваними фізичними інформативними параметрами у 2-му етапі були: магнітний параметр I_2 , питомий електричний опір, твердість і коерцитивна сила. Експериментальними зразками були наперед змодельовані, розраховані та виготовлені дві посудини, що працюють під тиском, матеріал яких був отриманий із експлуатуючих організацій. Навантаження у посудинах створювалося надлишковим тиском насосом під час гідровипробувань. Перед початком проведення випробувань надлишковим тиском дві експериментальні моделі посудин були розраховані на максимально допустиме напруження трьома варіантами: метод скінченних елементів, за виміряним значенням твердості і за стандартним підходом, що регламентований у нормативних документах. Також для кожної із посудин був розроблений спеціальний алгоритм збільшення навантаження, під час якого фіксувалися вимірні інформативні параметри та схема вимірювання. За результатами кореляційного та графічного аналізу встановлено та підтверджено правильність вибору фізичних інформативних параметрів, які залежать від зміни навантаження, відповідно і напруження та мають чітко виражену залежність.

За результатом двох експериментальних етапів вдалося отримати комплекс із чотирьох інформативних параметрів, що залежать від зміни навантаження. Оскільки зв'язки між обраними чотирма інформативними параметрами і напруженнями у стінці посудини є нелінійними доцільно їх використовувати саме у комплексі. Для точного встановлення характеру зв'язку між отриманим комплексом інформативних параметрів та напруженням було використано алгоритми штучних нейронних мереж, який включає у себе 4 основні етапи: підготовка даних, формування та тренування навчальних пар, тестування та перевірка нейромережі на невідомих даних.

Були створені нейромережі для типових задач та архітектур відповідно для трьох і чотирьох параметрів, підготовлені та сформовані масиви даних (навчальні пари) для тренування, тестування та перевірки. Результати етапів тренування, тестування та перевірки у порівнянні з розрахунковим значенням напруження підтвердили зв'язок для комплексу 3-х та 4-х інформативних параметрів залежно від навантаження. Також використання штучних нейронних мереж дало можливість одержати апроксимовану залежність в аналітичному вигляді – матричне рівняння з функціями перетворення та ваговими коефіцієнтами, що змінюються в процесі навчання нейронної мережі. Одержана аналітична залежність дає можливість визначати напруження, що виникають в процесі роботи посудин, що працюють під тиском на АГНКС за допомогою комплексу вимірних інформативних параметрів.

При визначенні напруження за чотирма та трьома фізичними інформативними параметрами: твердістю, коерцитивною силою, магнітним параметром I_2 та питомим електричним опором значення найменшої відносної похибки складає 6,04%. При окремому застосуванні обраних методів визначення напружень в металі найменша відносна похибка вимірювання становить не менше 10%.

Для практичної реалізації нового підходу визначення напружень за комплексом інформативних параметрів розроблена методика та проект нормативного документу.

Запропонований новий підхід контролю, визначення та оцінки напружень, що базується на раніше встановлених експериментальним шляхом кореляційних зв'язках між вимірними фізичними інформативними параметрами і напруженнями у стінках ППТ був промислово апробований в умовах ДП «УКРАВТОГАЗ», РВУ «ЛЬВІВАВТОГАЗ», АГНКС-Львів 3 та в умовах ПАТ «УКРСПЕЦТРАНСГАЗ». Розроблена методологія визначення напружень у стінках ППТ за обраним комплексом інформативних параметрів впроваджено в умовах ДП «КАРПАТСЬКИЙ ЕТЦ».

Отже, результатом теоретичних та експериментальних досліджень була вирішена науково-практична задача в галузі підвищення якості методів оцінки та забезпечення надійності експлуатації ППТ АГНКС шляхом розробки нових підходів і технологій контролю та визначення рівня НС ППТ через врахування комплексу фізичних інформативних параметрів, які чутливі до зміни ФМХ матеріалу.

Ключові слова: посудини, що працюють під тиском, АГНКС, фізико-механічні характеристики, напруження, напружено-деформований стан, комплекс інформативних параметрів, технічна діагностика, деформація, множинне переміщення точок, методика, методологія.

Список публікацій здобувача:

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. ND T days 2013: SCIENTIFIC PROCEEDINGS. XXVIII, №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. XXXI, №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 науково-метричними 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.

ANNOTATION

Karpash A.M. Improvement of methods for monitoring the stressed state of metal structures for long-term operation (using the NGV-refueling compressor station as an example). - Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) in specialty 05.15.13 - Pipeline transportation, oil and gas storages - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2018.

The thesis is aimed at improving the quality of evaluation methods and ensuring the reliability of pressure vessels operation using the example of natural gas vehicle refueling compressor stations (NGV-refueling compressor stations) by developing new approaches for monitoring and determining the stress level through the recording of a set of physical informative parameters that are sensitive to changes in the physical and mechanical properties (PMP) of the material.

Analyzing the current state of metal structures for long-term operation (using the NGV-refueling compressor station as an example), as well as existing methods and technologies for assessing the level of stress state, the prospects for their development, it was established that the problem of determining the stresses does not have a final solution. The existing methods are out-of-date and insufficient to evaluate and determine stresses correctly, since they do not take into account the numerous factors of influence acting on the structure. The result is a reduction in the level of safe operation and erroneous evaluation of the level of stresses in the operating facilities. The established problem and its solution is the actual task, since a significant part of the pressure vessels is operated in a complex environment, where alternating loads, high pressures, the influence of temperature regimes, operating medium, vibration, corrosion, and the like are traced. The total effect of non-incorporated complex of influence factors on the operating material of the metal structure causes the increase of loads and the appearance of risks of destruction that is unacceptable.

As a result of a detailed analysis of the object of the study, a classification was made of pressure vessels according to the type of operating medium, type of installation, type of manufacture, configuration, purpose and number of cycles. The main operating conditions and conditions are described, as well as many factors of influence that directly affect the operation object are listed: aggressive operating environment, corrosion processes, vibration, change in spatial position, alternating loads, temperature effects, multicycle loads, mechanical impacts, etc.

Also, by analyzing the existing methods for monitoring, determining and estimating of stresses, their classification was carried out and the structural and investigative scheme of the diagnostic of pressure vessels model was formed, which resulted in the establishment of the most promising methods and modern approaches to the determination of stresses. It is established that the actual issue remains the development of new approaches and methodologies for determining the stress state, taking into account many informative parameters in the complex, representing individual

physical and mechanical characteristics. These parameters are characterized by different types of physical fields and form the basis of multiparameter control.

Theoretical studies have made it possible to cite a formalized presentation of the pressure vessels as an object of research with a view to assessing its technical state. The model of the stress state estimation, which reflects the rigorous mathematical formulation of the problem with initial and final conditions, the model that takes into account the most known force-action factors and the model that suggests the development of regularization algorithms for the incorrect problem of reconstructing physical-mechanical fields on the entire study area by their value on a certain subset of the field.

Also, the result of theoretical studies is a new approach to the determination of stresses in the walls of the pressure vessels, which involves mathematical modeling of the process of deformation of vessels during its long operation based on data characterizing the change in spatial configuration. Unlike the existing methods, the new approach makes it possible to evaluate the stress state without information on the forces and loads acting on the vessel for a long time.

A mathematical apparatus for determining the factors of force influence on the basis of the apparatus of associative analysis and establishing the analytical structure of this dependence is developed and proposed, and it is possible to estimate the asymmetric stresses arising in the vessel during long-term operation.

The mathematical model was tested on the data obtained experimentally, which formed a set of physical informative parameters. A comparative analysis of the actual and calculated stress level confirmed the correctness of the mathematical model.

The methodology of experimental studies has been confirmed by the confirmation of the adequacy of theoretical and mathematical studies, according to which the experiment consisted of two main stages.

The purpose of the first stage is to define and select informative parameters that respond to changes in the level of the load. The investigated informative parameters were: magnetic parameters I_1 and I_2 , specific electric resistance, hardness, ultrasonic

propagation speed in metal and coercive force. The experimental samples were flat samples made of tubular material in accordance with normative documents, they were subjected to a rupture test, during which physical measurements were measured by technical means of control. After obtaining the physical informative parameters by means of measurement by technical means and processing, the presence of connections was established by graphic and correlation methods. Physical informative parameters, which had a clearly expressed connection or dependence on the load, and hence on the stress, were allocated and enrolled in those that would be investigated in the second stage. There were: coercive force, hardness, specific electrical resistance and magnetic parameter I2 with a frequency of measurement of 25 kHz.

The purpose of the second stage is to confirm the correctness of the choice of informative parameters in the first stage and to determine the nature of their connection with the stresses. The investigated physical informative parameters in the 2-nd stage were: magnetic parameter I2, specific electric resistance, hardness and coercive force. Experimental samples were pre-modeled, two pressure vessels were calculated and manufactured, the material of which was obtained from operating organizations. The pressure in the vessels was created by excess pressure by the pump during the hydrotesting. Before the beginning of the tests with excess pressure, two experimental models of vessels were designed for the maximum allowable stress in three ways: the finite element method, the measured hardness values and the standard approach, which is regulated in regulatory documents. Also, for each of the vessels, a special algorithm for increasing the load was developed, during which the informative parameters and the measurement scheme were recorded. Based on the results of the correlation and graphical analysis, the correctness of the choice of the physical informative parameters, which depend on the load change, and the stress, respectively, was established and confirmed, and they have a clearly expressed dependence.

Based on the results of the two experimental stages, it was possible to obtain a complex of four informative parameters, depending on the change in the load. Since the connections between the selected four informative parameters and the stresses in the

vessel wall are non-linear, it is expedient to use them precisely in a complex. To establish accurately the nature of the relationship between the obtained complex of informative parameters and stress, algorithms of artificial neural networks were used, which includes 4 main stages: data preparation, formation and training of training pairs, testing and verification of a neural network on unknown data.

Neural networks were created for typical tasks and architectures for three and four parameters, respectively, arrays of data were prepared and formed (training pairs) for training, testing and verification. The results of the training, testing and checking stages in comparison with the calculated stress value confirmed the connection for the complex of 3 and 4 informative parameters depending on the load. Also, the use of artificial neural networks allowed to obtain an approximated dependence in an analytical form - the matrix equation with transformation functions and weight coefficients, change in the process of training the neural network. The obtained analytical dependence makes it possible to determine the stresses arising in the process of operation of vessels working under pressure on the NGV-refueling compressor station with the help of a complex of measured informative parameters.

When determining the stress by four and three physical informative parameters: hardness, coercive force, magnetic parameter I_2 , and specific electrical resistance, the value of the least relative error is 6.04%. With a separate application of the selected methods for determining the stresses in a metal, the least relative measurement error is at least 10%.

For the practical implementation of a new approach to the determination of stresses over a set of informative parameters, the algorithm for operations (methodology) has been developed and a draft normative document (methodology) has been developed.

A new approach to the control, evaluation and assessing of stresses based on the previously established correlation between the measured physical informative parameters and the stresses in the walls of the pressure vessels was industrially tested within State Enterprise "Ukravtogaz", RPD "Lvivavtogaz", AGNKS-Lviv 3 and PJSC "UKRSPETSSTRANSNGAZ". A methodology for determining the stresses in the walls

of the pressure vessels for the selected set of informative parameters was developed within SE "Karpatsky ETC".

As the result of theoretical and experimental research there was solved the scientific and practical problem in the field of improving the quality of evaluation methods and ensuring the reliability of the operation of the pressure vessels of NGV-refueling compressor stations by developing new approaches and technologies for monitoring and determining the level of the stress state of the pressure vessels, by taking into account the set of physical informative parameters that are sensitive to the material PMP change.

Key words: pressure vessels, NGV-refueling compressor station, physical and mechanical properties, stress, stress-strain state, complex of informative parameters, technical diagnostic, deformation, multiple point movement, technique, methodology.

List of applicant's publications:

1. Karpash A.M. Analysis of known methods for controlling the physical and mechanical properties of a metal. Oil and gas power engineering. 2012. № 1 (17). P. 70-82.
2. Vashchysyak S.P., Karpash A.M. Modern approaches to the determination of physical and mechanical properties of metals of oil and gas complex objects. NDT days 2012: SCIENTIFIC PROCEEDINGS. XXVII, No. 1 (133). 2012. P. 260-264.
3. Tatsakovych N.L., Karpash A.M., Karpash O.M. Problems of technical diagnostics of technological equipment of NGV-refueling compressor stations. NDT days 2013: SCIENTIFIC PROCEEDINGS. XXVIII, No. 2 (139). 2013. P. 40-43.
4. Karpash A.M. Peculiarities of experimental model objects and setting up an experiment for determining the stress-strain state of metal structures on a set of informative parameters. Oil and gas power engineering. 2016. № 1 (25).P. 91-101.

5. Karpash A.M., Tatsakovych N.L., Dotsenko E.G. Features of the application of modern control methods for determining the stress-strain state of metal structures. NDT days 2016: SCIENTIFIC PROCEEDINGS. XXXI, No. 1 (187). 2016. P. 319-324.

6. Karpash A.M., Tatsakovych N.L., Karpash M.O. Improvement of the method for determining the stressed state of pipes and vessels working under pressure. Technical diagnostics and non-destructive testing. 2017. №2. P. 12-20.

7. Karpash A.M., Oliinyk A.P. Mathematical models of the process of deformation and stress state of vessels working under pressure. Prospecting and development of oil and gas fields. 2017. №2 (63). P. 97-101.

8. Karpash A., Oliinyk A. Mathematical model's choice of the reasoning and its implementation for the evaluation of the strength of technological vessels. EUREKA: Physics and Engineering. 2017. №4. P. 61-72.

9. Karpash A.M. Analysis of methods for controlling the physical and mechanical properties of metal structures. Modern technologies in industrial production: II All-Ukrainian interuniversity scientific and technical conference. 2012. P. 159-160.

10. Karpash A.M., Tatsakovych N.L. Problems of regulatory support of works on technical diagnostics of NGV-refueling compressor stations. Oil and Gas Energy 2013: Materials of the International Scientific and Technical Conference, October 7-11, 2013 Ivano-Frankivsk. 2013. pp. 301-304.

11. Karpash A.M. Experimental research and practice for determining the residual life of metal structures of long-term operation with allowance for the stressed state. Nondestructive testing and technical diagnostics - UkrNDT-2016: materials of the 8th National Scientific and Technical Conference, November 22-24, 2016. Kyiv: UT NCTD. 2016. S. 193-196.

12. Myndyuk V.D., Karpash A.M. Estimation of qualitative changes of steels microstructure of long-exploited objects on a complex of their physical properties. Damage of materials during operation, methods of its diagnostics and forecasting: IV International Scientific and Technical Conference, September 21-24, 2015., Ternopil. 2015 P. 106-110.

13. Karpash A.M., Tatsakovych N.L., Karpash M.O. Determination of stresses in the walls of pressure vessels. Oil and Gas Power Engineering 2017: materials of the 6th International Scientific and Technical Conference, May 15-19, 2017 Ivano-Frankivsk. 2017. P. 383-385.

ЗМІСТ

ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МЕТАЛУ СТІНОК ПОСУДИН АГНКС, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПІД ТИСКОМ	28
1.1 Особливості конструкцій, умови та режими експлуатування посудин АГНКС, що працюють під тиском	28
1.2 Аналіз факторів впливу на експлуатаційні характеристики металу посудин АГНКС, що працюють під тиском	32
1.3 Аналіз методів і засобів визначення напруженого стану металу посудин, що працюють під тиском	35
1.3.1 Руйнівні та малоруйнівні методи визначення рівня напружень	37
1.3.2 Неруйнівні методи визначення рівня напружень	38
1.3.3 Аналітичні методи визначення рівня напружень	50
1.3.4 Положення нормативних документів	51
1.4 Вибір інформативних параметрів, які характеризують напружений стан посудин АГНКС, що працюють під тиском	52
1.5 Вибір та обґрунтування напрямку і задач подальших досліджень	52
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРУ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКІВ МІЖ КОМПЛЕКСОМ ФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА НАПРУЖЕНИМ СТАНОМ МЕТАЛУ ПІД ВПЛИВОМ НАВАНТАЖЕННЯ.....	55
2.1 Математичне моделювання напруженого стану тривало експлуатованих конструкцій під високим тиском середовища	55
2.2 Математичне моделювання НДС посудин під тиском за інформацією про зміну її просторової конфігурації в процесі експлуатації	59

2.3 Розроблення математичного апарату для визначення факторів, що впливають на напружено-деформований стан посудин під тиском	68
Висновки до розділу 2	73
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ ВСТАНОВЛЕННЯ ЗВ'ЯЗКУ МІЖ КОМПЛЕКСОМ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА НАПРУЖЕНИМ СТАНОМ МЕТАЛУ ПОСУДИН АГНКС, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПІД ТИСКОМ	74
3.1 Експериментальні дослідження щодо вибору кількості інформативних параметрів напруженого стану конструкції	75
3.2 Експериментальні дослідження для встановлення зв'язку між фізичними інформативними параметрами та рівнем напружень металу посудин, що працюють під тиском	82
3.2.1 Розроблення конструкції експериментальних зразків посудин, що працюють під тиском для досліджень	82
3.2.2 Вимірювання фізичних інформативних параметрів НДС металу експериментальних зразків посудин, навантажених внутрішнім тиском ..	92
3.3 Отримання формул залежностей між комплексом фізичних параметрів металу та рівнем напружень посудин, що працюють під тиском	106
Висновки до розділу 3	118
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИЯВЛЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ НАПРУЖЕНЬ У СТІНКАХ ПОСУДИН АГНКС, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПІД ТИСКОМ	120
4.1 Розроблення методології виявлення та визначення величини напружень металу посудин, що працюють під тиском удосконаленим комплексним методом	121
4.2 Промислова апробація розробленої методології на посудинах, що працюють під тиском об'єктів АГНКС	128

4.3 Розроблення проекту нормативного документу, що реалізує методологію визначення напружень у стінках посудин комплексним методом	134
Висновки до розділу 4	137
ВИСНОВКИ	138
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	140
ДОДАТКИ	156

ВСТУП

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 (ППТ). Сучасний підхід до оцінювання ФТС конструкцій ППТ 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 ППТ 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, дорогавартісними, обмеженими у польовому використанні,

потребують спеціалізованого персоналу, а також ґрунтуються здебільшого на одному фізичному параметрі. Тому для підвищення достовірності визначення рівня зміни напружень ППТ 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 ППТ 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» Міністерства освіти 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 Міністерства освіти та науки (№0113U001099);

- держбюджетна Д-11-11-П «Розроблення новітніх неруйнівних методів діагностики та моніторингу деградації матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації» Міністерства освіти 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 отриманих 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 та 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МЕТАЛУ СТІНОК ПОСУДИН АГНКС, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПІД ТИСКОМ

Більша частина об'єктів підвищеної небезпеки нафтогазового комплексу станом на сьогоднішній день відпрацювала свій плановий ресурс на 70 %, а у деяких випадках повністю вичерпала його [1-4]. Технологічне обладнання характеризується, окрім закінчення граничного терміну експлуатації, роботою у досить важких умовах, що призводить до передчасного зношування і виходу його з робочого режиму. Ситуація, що склалася на виробничих площадках експлуатуючих організацій, спонукає до необхідності зменшення робочих навантажень до безпечного рівня або проведення ремонтних робіт з метою відновлення технічного стану та запобігання виникнення аварій. Тому, питання оцінювання ФТС таких промислових об'єктів, як технологічні і магістральні трубопроводи, резервуари, котли, реактори, посудини, що працюють під тиском, нафтогазове та бурове обладнання, стає особливо актуальним у розрізі поставлених задач, які стосуються продовження терміну експлуатації об'єктів, що відпрацювали свій плановий ресурс або знаходяться на межі його закінчення.

1.1 Особливості конструкції, умови та режими експлуатування посудин АГНКС, що працюють під тиском

Відповідно до постанови КМУ №1107 від 26 жовтня 2011 року «Про затвердження Порядку видачі дозволів на виконання робіт підвищеної небезпеки та на експлуатацію (застосування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки» [5] до об'єктів підвищеної небезпеки відноситься чималий перелік промислового обладнання, до якого також віднесено ППТ. Практично кожна галузь промисловості експлуатує вищезгадані об'єкти. Для прикладу, ДП «УКРАВТОГАЗ» налічує 90 автомобільних газонаповнювальних компресорних

станцій, на яких експлуатуються понад 2000 ППТ, на об'єктах ПАТ «КАРПАТНАФТОХІМ» експлуатується понад 800 ППТ, ПАТ «УКРСПЕЦТРАНСГАЗ» – 1235 ППТ, УМГ «ЛЬВІВТРАНСГАЗ» – близько 1000 одиниць.

Відповідно до інструкції [6], посудина – це геометрично закрита ємність, призначена для проходження хімічних, теплових та інших технологічних процесів, а також для зберігання і транспортування газоподібних, рідких та інших речовин.

В основному конструкція посудини передбачає наявність циліндричної обичайки та сферичних днищ, хоча існують посудини спеціального призначення, які можуть мати і іншу геометричну форму обичайки (квадрат, конус, тощо) та днища (конусне, плоске, тощо) (рисунок 1.1). Внутрішня частина або пустотна, або доповнена трубним екраном, решіткою, фільтруючим елементом.



Рисунок 1.1 – Зображення типових конструкцій посудин, що працюють під тиском

Здебільшого для виготовлення ППТ АГНКС використовують вуглецеві (конструкційні та сталі спеціального призначення) та леговані (низько та середньолеговані) сталі. Ці сталі переважно мають феритну структуру, забезпечують необхідну міцність, корозійну стійкість, добру зварюваність, а також мають виражені показники магнітних, електричних, акустичних та інших властивостей. Матеріали для виготовлення ППТ АГНКС та режими їх експлуатування нормуються нормативними документами [6, 7].

З урахуванням вимог до ППТ [6, 7] та експлуатаційного досвіду, ППТ можна поділити на окремі категорії (рисунок 1.2).

До основних видів ППТ об'єктів нафтогазового комплексу, у відповідності з наведеними категоріями, відносяться:

- підігрівники високого та низького тиску системи регенерації турбін, підігрівники мережевої води, мазуту, вихідної і хімічно очищеної води, бойлери, випарники, випарні установки, пароперетворювачі, пароводяні акумулятори;

- розширювальні ємності, вакуумні котли;

- волого-масловідділювачі, сепаратори, ресивери;

балони для зберігання і транспортування стиснутого повітря, кисню, аргону, азоту, гелію, зневодненої кислоти, посудини для зберігання та транспортування рідкого аміаку тощо;

- посудини й апарати, що працюють у середовищах, які містять водень, сірку, посудини аміачних холодильних установок, розварники сировини, що містять крохмаль;

- повітрянагрівачі доменних печей, деаератори атмосферні;

- багатошарові посудини у яких надлишковий тиск рівний 10 МПа і більше;

- акумулюючі посудини, буферні ємності, тощо.

Оскільки ППТ широко використовують у багатьох секторах промисловості, вони працюють при різних умовах та режимах експлуатації. Режими експлуатації посудин наведені у технологічних регламентах, а умови експлуатації характеризуються навантаженнями, спричиненими надлишковим

тиском, температурними впливами, знакозмінними та циклічними навантаженнями, агресивним робочим середовищем, вібраційними впливами, погодними умови, тощо.



Рисунок 1.2 – Класифікація ППТ

1.2 Аналіз факторів впливу на експлуатаційні характеристики металу посудин АГНКС, що працюють під тиском

На стадії проектування й виготовлення ППТ АГНКС фізико-механічні характеристики (ФМХ) матеріалів є відомими і підкріпленні сертифікатами відповідності. У такому випадку визначення та оцінка початкового ресурсу міцності об'єкта не складає труднощів, більш того, точність і ймовірність оцінки ресурсу на стадії його введення в експлуатацію підтверджується передпусковими випробуваннями.

Проте, коли плановий ресурс ППТ закінчився або знаходиться на межі закінчення [8, 9], точність і ймовірність оцінки залишкового терміну експлуатації через показники ФМХ набуває важливого значення, оскільки незначна похибка у визначенні залишкового ресурсу може призвести до непередбачуваних обставин з нанесенням чималих економічних та екологічних збитків.

Розглядають два види ФТС металевих конструкцій ППТ: справний та несправний [10, 11]. Несправний стан настає внаслідок виникнення дефектів, невідповідності геометричних параметрів та ФМХ нормативним значенням, а також визначається розрахунком.

При визначенні ФТС і залишкового ресурсу експлуатації ППТ необхідно максимально врахувати основні фактори впливу, що діють безпосередньо на сам об'єкт експлуатації та змінюють показники ФМХ його конструкційного матеріалу [12-15] (рисунок 1.3).

З рисунку 1.3 видно, що основними факторами впливу, які призводять до зміни ФМХ металу посудин АГНКС під тиском, є:

- корозійні процеси (загальна, виразкова, міжкристалічна корозія, тощо);
- агресивне середовище (наслідком є збільшення швидкості корозії);
- механічні впливи та випадкова дуга, що викликають появу вм'ятин, задирів, розривів, деформацій, тощо;

- температурні впливи (здебільшого виникають при нерівномірному нагріві або охолодженні робочого об'єкта), наслідком яких є зміна ФМХ матеріалу;

- зміна просторового положення через просідання опор чи фундаментів, результатом чого є перерозподіл напружень, що залежать від власної ваги і зовнішнього навантаження;

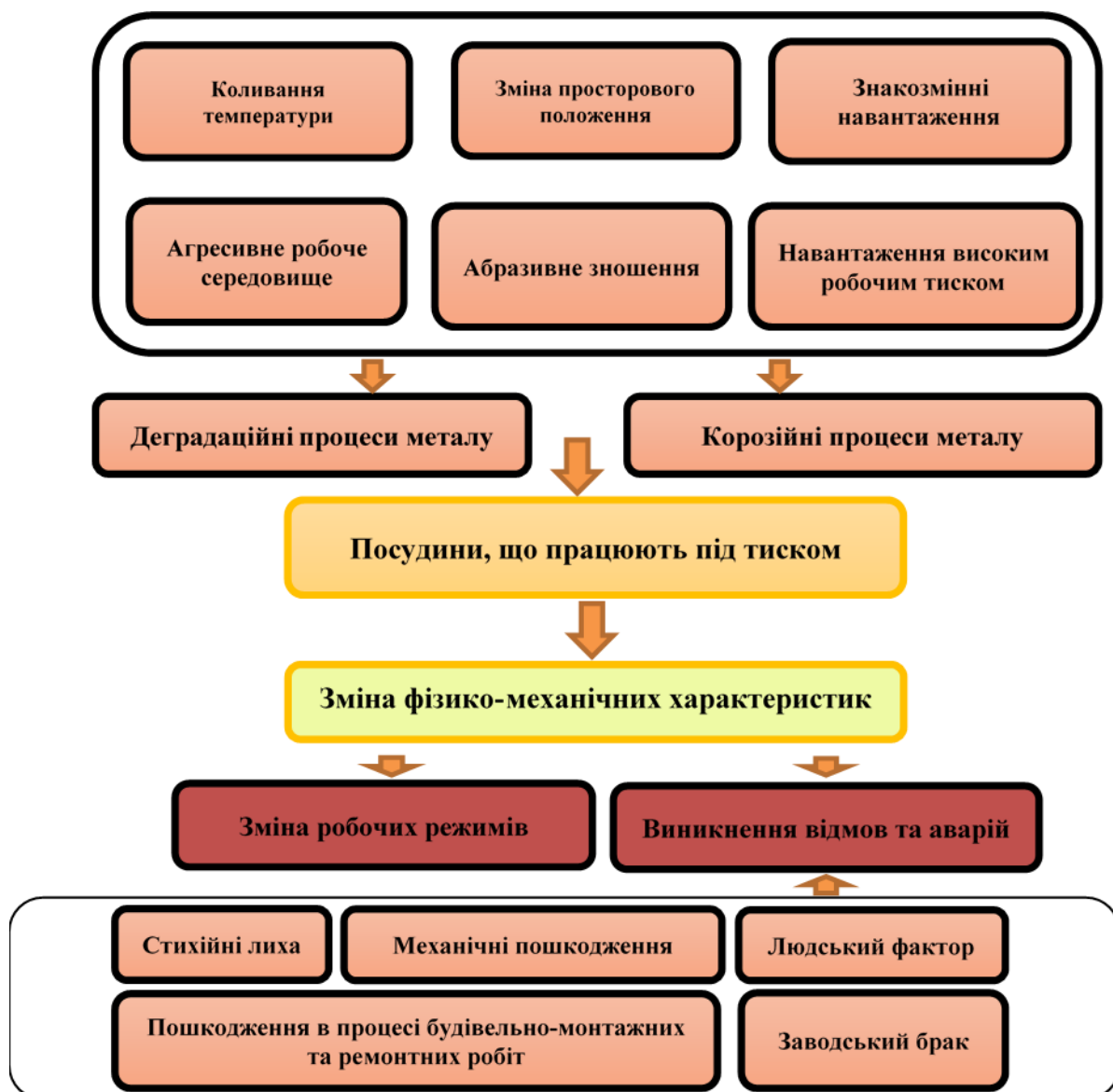


Рисунок 1.3 – Основні чинники та фактори впливу, які призводять до зміни ФМХ металу та появи відмов ППТ АГНКС

- динамічні навантаження: вібрація (результатом є утворення внутрішніх тріщин, а також збільшення крихкості металу) та багатоциклові і знакозмінні навантаження (результатом є втома, що призводить до зміни структури та властивостей матеріалу).

Ці фактори впливу викликають незворотні деградаційні процеси, результатами яких є збільшення показників міцності і зменшення пластичних та в'язкісних властивостей.

Окрім того, дефекти, що виникають в процесі будівельно-монтажних робіт, заводський брак матеріалів, механічні пошкодження під час монтажу та реконструкції, порушення правил технології експлуатації та стихійні лиха також є причинами виникнення аварійних ситуацій та відмов посудин.

Усі вищенаведені чинники та фактори впливу призводять до зміни ФМХ матеріалів посудин. А це, в свою чергу, створює ситуації, у яких експлуатуюча сторона змушена змінювати робочі параметри у сторону зменшення, що в деяких випадках є економічно недоцільним або неприпустимим для забезпечення подальшого технологічного процесу.

За даними проведеного анкетування та з досвіду робіт з технічного діагностування ППТ, встановлені причини появи дефектів та концентраторів напружень, які в подальшому спричиняють пониження робочих режимів і виникнення відмов та аварій.

Через часті появи дефектів, відмов, аварійних ситуацій та їх наслідків необхідно проводити систематичний контроль ФТС металевих конструкцій ППТ. Проведення планового контролю дасть змогу не тільки виявляти існуючі дефекти, а й дозволить аналізувати рівень зміни властивостей металу, за висновками якого можна виявляти та прогнозувати потенційно небезпечні ділянки та концентратори напружень у тілі посудин. Це дозволить проводити коригування їх робочих режимів та уникнути дефектного стану, а саме зупинки роботи компресорних станцій та АГНКС і появи аварійної ситуації.

1.3 Аналіз методів і засобів визначення напруженого стану металу посудин, що працюють під тиском

Для оцінки НС металоконструкцій ППТ безпосередньо в процесі їх експлуатації доцільно визначати саме напруження [16], які виникають у металі конструкції, як правило, у зонах концентрації в процесі її навантаження або з'являються ще на стадії виготовлення і урівноважуються у конструкції без докладання якихось сил. В основному їх класифікують за фізичною суттю та за протяжністю силового поля [17].

За останні роки зусиллями вчених США, Німеччини, Росії, України, Австрії та інших країн ситуація з методами і засобами проведення вимірювання та контролю напружень істотно покращилася. Вчені, які займалися і займаються дослідженнями зміни ФМХ матеріалу, а також НС як основного параметру для визначення ФТС конструкцій різного технічного призначення 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., а також зарубіжні 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. та інші. Однак, їх увага зосереджувалась, в основному, на отриманні загальних висновків про ФТС металевих конструкцій та їх міцність без урахування усіх можливих факторів впливу, режимів та умов експлуатації.

Основні методи вимірювання, контролю рівня, розподілу та аналізу напружень або показників ФМХ, за якими можна визначати напруження в металі стінок ППТ, прокласифікуємо на: руйнівні, малоруйнівні та неруйнівні [18 - 22] (рисунок 1.4).

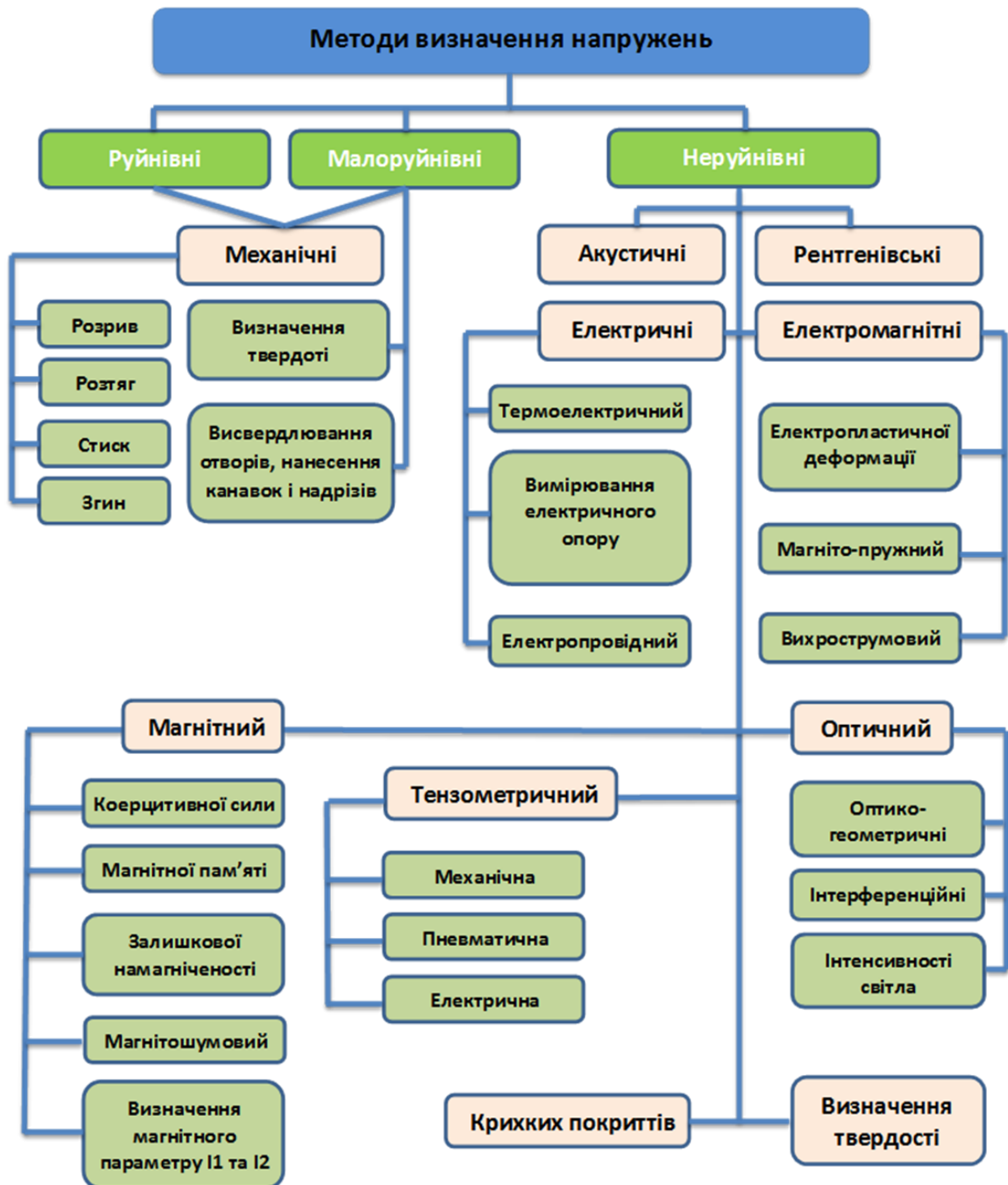


Рисунок 1.4 – Класифікація методів вимірювання напружень

1.3.1 Руйнівні та малоруйнівні методи визначення рівня напружень

Руйнівні методи визначення рівня напружень є найбільш точними, однак спричинюють повне або часткове руйнування конструкції посудини. До них

відносять практично усі механічні методи випробування: випробування на розтяг, на згин, метод визначення дійсного опору розриву, метод визначення границі плинності та ін. Основним недоліком руйнівних методів є порушення цілісності конструкції, що при проведенні робіт по визначенню ФТС посудин у процесі їх експлуатації є недоцільним та технологічно не вигідним.

Малоруйнівні методи засновані на використанні поверхневого шару об'єкта для порівняльного контролю напружень шляхом виконання отворів, надрізів, пропилів стовпчиків, канавок для контролю деформації, а також контролю твердості в зоні руйнування. Це спричинює зупинку технологічного обладнання та виправленню місць контролю шляхом приварювання накладних пластин, тощо.

Тому застосування даних методів контролю в умовах експлуатації об'єктів є економічно недоцільним.

1.3.2 Неруйнівні методи визначення рівня напружень

Неруйнівні методи спрямовані на отримання інформативних параметрів, які є вихідними при розрахунку напружень та не спричинюють порушення цілісності металоконструкції. Вони засновані на зміні фізичних властивостей матеріалу залежно від рівня пружного деформування [23 - 26]. Саме тому для оцінки ФТС та визначення НС ППТ в процесі їх експлуатації найбільш доцільним є застосування неруйнівних методів контролю.

Акустичний контроль ФМХ сталей базується на залежності швидкості поширення ультразвукової хвилі від НС, а також заснований на встановлених взаємозв'язках між такими характеристиками, як величина зерна, модуль пружності, твердість, текстура, міцність і ін., та акустичними характеристиками металів та сплавів – швидкість та час поширення ультразвуку, коефіцієнт затухань ультразвукових коливань, параметри акустичної емісії, характеристики взаємодії індентора з об'єктом контролю [23, 27-29].

Відомо, що швидкість поширення ультразвуку в металах пов'язана з їх структурою і ФМХ та є часто інформативним параметром при визначенні НС [30-32].

Використання акустичних методів дозволило виявляти місця з пониженою механічною міцністю. Неточність вимірювань при цьому досягає $\pm 0,001\%$ при чутливості до 10^{-7} [33].

Лінійний характер кореляційних залежностей між твердістю та швидкістю ультразвуку якісно можна оцінити функціональним зв'язком цих двох величин з пружними властивостями металу [30].

Методи акустичного контролю дозволяють виявляти області локальних змін структури та механічних характеристик металу з допомогою вимірювання швидкості поверхневих (хвиль Релея) і підповерхневих (головних) акустичних хвиль [34]; виключати вплив шорсткості поверхні на результати акустичних вимірювань при контролі твердості сталі при використанні поздовжньо-поверхневих хвиль [35]; проводити експрес-контроль розширеної номенклатури механічних характеристик конструкційних сталей [36, 37].

За результатами вимірювань даними методами можна провести розрахунок НС металоконструкцій посудин, однак їх застосування зумовлює враховувати певний ряд недоліків: низьку точність результатів, використання дорогого обладнання, недостатню кількість методичного забезпечення і ін.

За допомогою технології ультразвукової томографії можна визначати просторовий розподіл механічних характеристик матеріалу (твердість, модуль Юнга та ін.), внутрішніх напружень, міцнісних, технологічних та інших характеристик [38].

Для визначення міцнісних характеристик конструкційних матеріалів можна використовувати явище акустичної емісії (АЕ), тобто випромінювання матеріалом пружних хвиль, яке викликане динамічною локальною перебудовою його внутрішньої структури [39]. В роботі [40] дослідження показали, що застосування методу акустичної емісії в якості індикатора залишкової

деформації дозволяє визначати границю пружності матеріалів з допуском 0,0005%.

Практично всі види акустичних методів залежать від чистоти та шорсткості контрольованої поверхні, від однорідності матеріалу та від впливу зовнішніх температур. Анізотропія механічних властивостей істотно впливає на швидкість пружних хвиль, що обмежує застосування методу в зварних конструкціях [24].

Не дивлячись на відносну простоту розглянутих методів, визначати ФМХ матеріалів за вимірними значеннями швидкості та часу поширення ультразвукової хвилі внаслідок незначної зміни цих акустичних характеристик із достатньою для практики точністю доволі складно.

Радіаційні методи контролю. Рентгенівський метод заснований на явищі дифракції рентгенівських променів при проходженні через кристалічну решітку. Рентгенівський метод дозволяє визначати напруження в деталях складної форми, необмежених розмірів, досліджувати напруження на дуже малих ділянках поверхні зразка, вимірювати градієнти напружень, визначати миттєві напруження в деталях, що піддаються періодичним навантаженням [41].

Можливості контролю посудин при наскрізному просвічуванні дуже обмежені, у зв'язку з необхідністю розташування джерела випромінювання і реєстратора (детектора) з двох сторін металоконструкції.

Теоретичний аналіз розсіяного випромінювання вказує на зв'язок між інтенсивністю розсіяного випромінювання з щільністю матеріалу [42]. Рентгенівська дифрактометрія є єдиним прямим методом неруйнівного контролю пружних деформацій та визначення напружень, що не вимагають попередніх даних про стан матеріалу і його елементного і фазового складу. Вона забезпечує можливість визначення залишкових і діючих напружень в посудинах різного призначення при їх виготовленні, експлуатації та ремонті. Рентгенівська дифрактометрія реалізується на практиці приладами: «КОМПАРАТОР», «БУЛЯ», РІКОР-2, РІКОР-3, РІКОР-4, РІКОР-5, РІКОР-6, розроблених

компаніями ИРО и МИСиС. Рентгенівський дифрактометр РІКОР-4 дозволяє послідовно визначати напруження в заданих напрямках, а також суму головних напружень в поверхневому шарі металу деталей і конструкцій.

До основних недоліків радіаційного контролю відносять його високу вартість в порівнянні із іншими методами та небезпечний вплив радіаційного випромінювання на робочий персонал та навколишнє середовище, а також понижена точність при роботі з сильно деформованими і грубозернистими матеріалами, неможливість одночасного визначення в декількох точках.

Електричні методи контролю. Електричний контроль ґрунтується на реєстрації параметрів електричного поля, що взаємодіє з об'єктом контролю або виникає в об'єкті контролю в результаті зовнішнього впливу [43]. Електричний контроль поділяють на термоелектричний, електропровідний та вимірювання електричного опору.

Даний вид контролю є одним із основних неруйнівних методів ідентифікації сталей і металів за марками, володіє високою чутливістю до змін ФМХ та використовується для дослідження процесів втоми металу та визначення їх НС [44-47]. Джерелом інформації є термо-ЕРС. Існує доволі стійка кореляція між структурним станом (фазовий склад, величина зерна, твердість), напруженнями в металі та термо-ЕРС [48].

Для вимірювання величини термо-ЕРС найбільшого практичного застосування знайшли прилади ТМС-МП, ТСП-16, ТЭП-ЮК і ПКММ-2 [45].

Метод електропровідності металів заснований на зміні електропровідності, що реєструється шляхом її прямого виміру та вимагає апаратури з високою чутливістю.

Методи вимірювання питомого електричного опору матеріалів поділяють на контактні і безконтактні [49, 50]. До безконтактних відносять методи обертового магнітного поля та вихрострумівий. Дані методи мають низьку точність вимірювання (похибка не менше 1%) та дозволяють контролювати підповерхневий шар металоконструкції. До контактних відносять: метод

одинарного моста, подвійного моста, потенціометричний, чотиризондовий, метод Ван-дер-Пау [49].

Мостові методи вимірювання електричного опору широко використовуються для вимірювання малих і великих опорів, які відрізняються на декілька порядків. Метод одинарного моста забезпечує задовільну точність при вимірюванні зразків з відносно великим опором ($> 10 \text{ Ом}$), тому він практично не використовується для вимірювання питомого опору сталей.

Метод Ван-дер-Пау [51] є однією з модифікацій чотиризондового методу і дає змогу вимірювати питомий електричний опір зразків з довільною геометричною формою, проте його доволі складно реалізувати в технічному плані: він вимагає індивідуального розміщення зондів у залежності від форми зразка, що значно збільшує час контролю і ускладнює його проведення.

Чотиризондовий метод – метод вимірювання опору, при якому напруга визначається незалежно від сили струму. Перевага методу в тому, що при визначенні напруги не враховується спад напруги на контактах, який може бути одного порядку із вимірюваним [51 - 56].

Інформативним параметром чотирозондового методу є електричний опір. Для практичної реалізації даного методу розроблено експериментальну установку і методику проведення вимірювання [57 - 59].

Практично всі методи вимірювання електричного опору є обмеженими у використанні, оскільки їх застосовують переважно на виробках з невеликою товщиною. Вони є довготривалими у вимірюванні і мають низьку точність.

Електромагнітні методи контролю. До електромагнітних методів контролю відносять вихрострумівий, магнітопружний і контроль електропластичної деформації [60].

Визначення структурно-чутливих електричних і магнітних характеристик матеріалів або виробів за допомогою змінного магнітного поля складає основу електромагнітного, а саме вихреструмівого контролю структури і властивостей матеріалів. Даний метод базується на аналізі взаємодії зовнішнього

електромагнітного поля з вихровими струмами, що наводяться збуджуючою котушкою в електропровідному об'єкті контролю. Для феромагнітних матеріалів і виробів величина вихрових струмів залежить від трьох параметрів [61]: електропровідності, розмірів виробу, магнітної проникності. Разом з тим, магнітна проникність є також функцією напруженості поля намагнічування.

В галузевому стандарті України ГСТУ 320.02829777.013-99 [62] вказується на доцільність визначення ФМХ сталей вихрострумовим методом контролю. Зокрема, пропонується використовувати спеціалізований прилад СІГМА-Т [63].

Амплітудно-фазовий метод [64] базується на вимірюванні амплітуди і фази вторинної ЕРС. При контролі феромагнітних матеріалів існують підвищені вимоги до постійності розмірів виробу і рекомендується робота на низьких частотах поля, коли впливом вихрових струмів можна знехтувати і вважати, що магнітний потік розподілений вздовж перерізу виробу рівномірно. При цьому ефективна глибина проникнення вихрових струмів велика і послаблення поля вихровими струмами будуть незначними.

Відомий цілий ряд приладів, які призначені для вимірюванні питомої електричної провідності, серед них: ВЭ-26Н, ВЭ-17НЦ/3, ВЭ-17НЦ/4, ВЭ-17НЦ/5 ВС-10П, ЭМИД, Eddyvisor, Magnaflux, Sigmatest 2.067 і SigmascopеSMP1. Ці прилади дозволяють вимірювати питому електричну провідність з похибкою до 2% [42, 65 - 72].

Магнітопружний метод заснований на аналізі залежності магнітної проникності феромагнітних матеріалів від НС об'єкта.

Одним з перспективних є метод електропластичної деформації, суть якого полягає в додатковій дії на метал електричного струму, щільність якого перевищує деяке порогове значення. При цьому відбувається пружне розвантаження залишкових напружень в металі. Це явище служить основним способом неруйнівного визначення залишкових напружень. Однак незважаючи на широке застосування електропластичної деформації, механізми, яким підлягає це явище, на сьогодні до кінця не відомі [19, 20].

Основним недоліком електромагнітних методів є низька точність результатів вимірювання, оскільки локалізація потенційних дефектних ділянок можлива тільки на поверхневих шарах металу, який може знаходитися в стані наклепу. Присутня також значна температурна і часова нестабільність, зумовлена використанням параметричних накладних вихрострумів перетворювачів. Ще одним із недоліків є необхідність ретельного підготовлення місця контролю, на що витрачається час і від якого залежать покази приладу.

Визначення твердості металу. Одним із найбільш поширених методів визначення твердості з точністю до одиниць за шкалою Брінеля як у польових, так і в лабораторних умовах, є динамічний метод. Проведення контролю твердості реалізується технічними засобами типу ТДМ-1, ТДМ-2, ТД-32 та ін. Метод поширюється на конструкційні, вуглецеві, нержавіючі сталі і сплави або кольорові метали і дає змогу вимірювати твердість за шкалою Брінеля в діапазоні 90 - 450 НВ [95]. Динамічні твердоміри можуть використовуватися для розбракуння різних матеріалів за пружними властивостями за допомогою додаткових шкал, наявних в приладі.

Перевагами є: прості, мобільні та компактні технічні засоби, робота з якими не вимагає спеціального навчання персоналу, оперативність вимірювання, автономне джерело живлення, внутрішня пам'ять, усереднення вимірних даних, зв'язок із ПК, тощо. Недоліки: на покази вимірювань впливають чистота поверхні та нерівності, тому динамічний метод вимагає багаторазового вимірювання.

Магнітні методи контролю. Магнітні методи контролю засновані на закономірних зв'язках між структурним станом, хімічним та фазовим складом, механічними характеристиками матеріалів, з однієї сторони, і магнітними властивостями – з іншої. Магнітні властивості матеріалу використовуються як індикатор зміни структурного стану, отже, і механічних властивостей. Найбільш поширеними структурно-чутливими магнітними характеристиками, що застосовуються під час проведення магнітного контролю ФМХ та НС матеріалу

є коерцитивна сила (параметри кривої гістерезису), магнітна проникність, залишкова індукція, намагніченість, тощо.

Проте, попри досягнуті успіхи в розроблянні методів та технічних засобів магнітного неруйнівного контролю ФМХ сталей, існує ряд обмежень теоретичного характеру, головне з яких полягає у неможливості встановлення аналітичних взаємозв'язків між досліджуваними ФМХ та вимірюваними параметрами [73].

Метод коерцитивної сили [74, 75] знайшов широке застосування завдяки високій чутливості значень коерцитивної сили до механічних напружень, структурних змін та фазових перетворень, достатній простоті і можливості проведення вимірювання в локальних ділянках виробів. Однак, навіть в тих випадках, коли з довідкової літератури відомий зв'язок коерцитивної сили з механічним параметром (твердістю [76], границею плинності [77], ударною в'язкістю [78], вмістом домішок і т. д.), необхідно встановлювати можливість її використання при контролі конкретних конструкцій в умовах виробництва.

Встановлені кореляційні залежності [79] для багатьох сталей між коерцитивною силою та прикладеним навантаженням в зоні пружності. На стадії зміцнення металу, перед руйнуванням, коли доменна структура остаточно перебудовується, коерцитивна сила збільшується до максимального значення і це максимальне значення відповідає границі міцності.

З приладової бази значного поширення набули коерцитиметри із приставним електромагнітом, які є зручними для застосування в виробничих умовах [80]. Робота такого коерцитиметра базується на використанні кореляції між струмом розмагнічування, який є пропорційним коерцитивній силі і окремими механічними властивостями об'єкта контролю.

Базовим приладом є КРМ-Ц на основі якого було розроблено комплекс стаціонарних та мобільних приладів, сучасними модифікаціями якого є: КРМ-Ц-КЗ, АММ, МФ-31КЦ та ін. Застосування методу коерцитивної сили передбачає і використання спеціального програмного забезпечення [81], яке призначене для

зберігання, систематизації, візуалізації та оперативного використання результатів досліджень, які можна представити у будь-якому зручному вигляді.

Недоліком коерцитиметрів з приставними електромагнітами є залежність показів приладу від зміни зазору між полюсами електромагніта і поверхнею об'єкта контролю [82], а також неможливість застосування його на обладнанні, яке виготовлене із матеріалу, що не володіє магнітними властивостями.

Магнітометричний метод (метод магнітної пам'яті металу) заснований на реєстрації власних магнітних полів розсіювання, що виникають на обладнанні в локальних зонах концентрації напружень під дією робочих навантажень. При цьому величину магнітних полів розсіювання в об'єкті контролю відображає тензор деформації і напружень [83]. Встановлено, що зміна залишкової намагніченості феромагнітних матеріалів пов'язана з максимально діючими напруженнями.

З технічних засобів магнітного контролю привертає увагу магнітний мультитестер ММТ-2 [83]. До переваг відносять можливість оцінки розподілу залишкових напружень в зонах концентрації без попередньої підготовки поверхні. Недоліки: необхідність додаткового використання методів неруйнівного контролю з метою встановлення точного виду дефекту і визначення його розмірів, вплив зовнішніх завад на результати вимірювань, можливість використання тільки на феромагнітних матеріалах і низька достовірність результатів.

Контроль за залишковою намагніченістю заснований на вимірюванні напруженості магнітного поля [84]. Повністю намагнітити конструкцію великих розмірів доволі складно, тому часто намагнічують ділянку із допомогою постійного магніту або електромагніту.

Найбільш широке застосування знайшов прилад ИМА-4, який призначений для неруйнівного контролю ФМХ. При структурному аналізі різних металевих деталей також використовують прилади «Полюс-1», ИМА-2А, ИМА-3, ТАМ-6 та ін.

Основними недоліками методу є можливість контролю тільки в локальних ділянках металоконструкції і тільки на матеріалах із феромагнітними властивостями, а також досить високий рівень похибок вимірювання.

Застосування ефекту Баркгаузена (методу магнітних шумів) у секторі визначення механічних характеристик матеріалів, що володіють феромагнітними властивостями, в даний час знаходиться на стадії розвитку. Найбільш проявляється залежність магнітних шумів від зміни мікроструктури, хімічного складу, режимів термообробки, наявності дефектів, магнітоактивних включень, шорсткості поверхні феромагнетика, його геометричних розмірів, електропровідності.

Стрибкоподібна зміна намагніченості (виникнення магнітних шумів) відбувається як при змінах напруженості зовнішнього магнітного поля, так і при дії механічних навантажень.

При перемагнічуванні феромагнітного об'єкта змінним магнітним полем частотний спектр індукції має як дискретні складові, які є кратними частоті, так і суцільну складову, яка носить назву магнітного шуму. На основі результатів, відображених в публікації, [85] стає зрозумілим, що застосування магнітошумового методу контролю є перспективним, оскільки він володіє високою чутливістю і є незалежним від багатьох факторів та завад.

Відомим є метод на основі ефекту Баркгаузена для вимірювання механічних напружень в об'єктах, що працюють під тиском [86]. Згідно з даним методом на контрольному зразку реєструють параметри магнітних шумів і за їх значенням судять про напруження в досліджуваному об'єкті. Суть вимірювань полягає в тому, що вибирається контрольний взірець ділянки досліджуваного об'єкта з нульовим значенням механічних напружень уздовж його повздовжньої осі і на ньому визначається розрахунковий коефіцієнт пропорційності за формулою

$$K = \frac{P \cdot D}{(E - E_0) \cdot 2H}, \quad (1.1)$$

де P – тиск; D – зовнішній діаметр; H – товщина стінки в місці контролю; E – значення параметра магнітного шуму, що створюється при перемагнічуванні металу впоперек його поздовжньої осі; E_0 – нульове значення параметра магнітних шумів при заданому режимі роботи.

При цьому абсолютне значення механічного напруження визначають із співвідношення

$$\sigma = K(E_U - E_0), \quad (1.2)$$

де E_U – значення параметра магнітного шуму в металі об'єкта в місці контролю при тому ж режимі роботи реєструючої апаратури.

Для реалізації методу магнітних шумів Баркгаузена використовують прилади [87] в яких як інформативні параметри використовуються інтенсивність магнітних шумів, тобто амплітуди складових спектру, та ширина спектра.

Недоліком методу Баркгаузена є його обмеженість: зі всього ряду металів він використовується тільки на феритних матеріалах, які володіють високими магнітними властивостями.

Метод визначення ударної в'язкості шляхом вимірювання магнітошумового сигналу (визначення магнітного параметру I-1).
Представлений у [88] метод визначення ударної в'язкості базується на залежності зміни частоти електромагнітних коливань індуктивного магнітного контуру перетворювача від зміни ударної в'язкості металу. Метод контролю ударної в'язкості реалізується вимірюванням величини магнітошумового сигналу та визначенням залежності ударної в'язкості від характеристик магнітошумового сигналу на зразках, які піддають деформаційному старінню з різним ступенем деформації. Формулу залежності частоти електромагнітних коливань індуктивного контуру перетворювача від ударної в'язкості елементів металоконструкцій визначають експериментально.

Вимірювання інформативного параметра $I-1$ здійснюють з допомогою розробленої експериментальної установки «ІВС І-1» [88], принцип роботи якої ґрунтується на встановленій експериментальним шляхом залежності частоти електромагнітних коливань індуктивного контуру перетворювача від фазово-структурного складу та ФМХ матеріалу металоконструкцій.

Недоліком даного методу є неможливість використання його у польових умовах та робоча частота експериментальної установки не перевищує 10 МГц, що значно обмежує використання методу.

Визначення та контроль ударної в'язкості інформаційно-вимірювальною системою ІВС-І2 (визначення магнітного параметру I_2). В працях [15, 89, 90] метод визначення та контролю ударної в'язкості реалізується використанням інформаційно-вимірювальної системи ІВС-І2, інформативним параметром якої є магнітний параметр I_2 , що характеризує зміну електромагнітних коливань в індуктивному контурі перетворювача. Параметр I_2 прямо залежить від зміни ФМХ металу, оскільки параметри індуктивного контуру (кількість витків, матеріал феритового осердя, зазор розімкнутого феритового кільця), генератора коливань та відстань від індуктивного контуру перетворювача до елемента металоконструкції мінятися не будуть. Особливістю ІВС-І2 є також введення наперед виміряних значень твердості контрольного металу в пам'ять системи для визначення ударної в'язкості. Діапазон частот, за яких проводиться вимірювання складає 13 - 25 кГц. Перевагами методу є можливість проведення контролю у польових умовах на низьких напругах живлення (6В).

Метод крихких покриттів. В основу методу крихких покриттів закладений ефект появи тріщини під дією навантаження на об'єкт дослідження в тонкому шарі крихкого покриття, попередньо нанесеного на поверхню цього ж об'єкта. Висока крихкість покриття забезпечує утворення в ньому тріщин за рахунок відносного видовження на межі плинності матеріалу. Похибка визначення деформацій і напружень цим методом становить 10 - 20% [19].

Тензометричні методи. З тензометричних методів контролю виділяють механічну, електричну та пневматичну тензометрію як головні і найбільш поширені.

У більшості механічних тензометрів вимірювана деформація призводить до зміни відстані між двома призмами, що контактують з тілом, і ця зміна передається на спеціальний відліковий пристрій важільним, важільно-гвинтовим або гвинтово-зубчастим механізмом.

Робота пневматичних тензометрів заснована на вимірюванні тиску стисненого повітря в соплі, що примикається до поверхні досліджуваної деталі. Зміна відстані від поверхні до торця сопла викликає зміна тиску, яка реєструється.

Для вимірювання деформацій у багатьох точках досліджуваного об'єкта і забезпечення засобами обробки даних, реєстрації, вироблення керуючих сигналів або передачі сигналів в системи управління використовують багатоканальну апаратуру, яка носить назву «тензометрична станція» [19].

Оптичні методи контролю. До цих методів контролю ФМХ відносять оптико-геометричний контроль, інтерференційний контроль і ін.

До оптико-геометричного контролю відносять методи: дзеркально-оптичний, ділильних сіток, тіньових фігур (каустик), градієнтної фотопружності, муарових смуг [91, 92]. Дія всіх цих методів базується на певних геометричних вимірах, пов'язаних з відхиленням зондуючого променя від свого початкового положення внаслідок деформації об'єкта. Найбільш використовуваними є методи тіньових фігур (каустик) і метод градієнтної фотопружності, оскільки вони ефективні для визначення НС та величин коефіцієнтів інтенсивності напружень у вершинах тріщин.

Інтерференційні методи ділять на оптико-когерентні і поляризаційно-оптичні [91, 92]. Найбільш точним із інтерференційних методів є спекл-інтерферометрія, що полягає у визначенні мікродеформацій поверхні. Спекл-інтерферометрія відноситься до просторової інтерферометрії, дія якої заснована

на аналізі зернистого зображення об'єкта [93, 94]. Спекл-фотографія служить для вимірювання мікрозміщення і фіксації спекл-структури дифракційного поля. При реєстрації спекл-картин в площині сфокусованого зображення визначають поперечні (тангенціальні) зміщення поверхні. Нормальні зміщення не викликають достатніх зрушень спекл-структури зображення у відношенні до поздовжніх розмірів спеклів. При спекл-фотографії записують і ведуть чисельну обробку цифрових спеклограм об'єкта в початковому і зміщеному стані.

Поляризаційно-оптичні методи є одними з найбільш розвинених для вирішення найбільш широких класів задач механіки шляхом оптичного моделювання. Дія методів базується на властивостях деяких прозорих ізотропних матеріалів, які під навантаженням стають оптично-анізотропними і проявляють ефект подвійного променезаломлення. За допомогою поляризаційно-оптичного методу можна ефективно проводити оптичне моделювання розподілу напружень при певних навантаженнях об'єкта з метою оптимізації його форми, а також проводити вимірювання НС в конкретних точках моделі. Метод використовують для визначення НС поверхонь реальних натурних об'єктів [91].

1.3.3 Аналітичні методи визначення рівня напружень

При визначенні НС в матеріалах конструкцій, що працюють під тиском, широкого застосування набули математичні методи розрахунку. При цьому використовуються методи проектних розрахунків, коли визначаються узагальнені характеристики напружено-деформованого стану (НДС) в класичних ідеалізованих постановках, результати цих розрахунків входять в нормативні документи по спорудженню вказаних об'єктів [96 - 103]. Вказані розрахунки носять, в певній мірі, попередній характер, оскільки вони не враховують реальні умови та тривалість експлуатації об'єкта. На етапі оцінки реального технічного, зокрема, НДС, досліджується вплив на його зміну

реальних умов експлуатації, всіх факторів впливу, описаних в п. 1.2. В такому випадку, як правило, створюються математичні моделі реальних процесів, пов'язаних з реалізацією алгоритмів регуляризації некоректних задач відновлення фізико-механічних полів за відомими їх характеристиками на деякій частині досліджуваної області [104 -106]. Очевидно, що в цьому випадку для кожного з класів досліджуваних об'єктів створюються оригінальні моделі, які враховують особливості саме даного типу об'єктів, тому, не зважаючи на певну вузькість цих моделей та методів, їх спрямованість на опис спеціальних властивостей об'єктів, задача побудови та реалізації моделей НДС ППТ за відомою інформацією про фізико-механічні поля в матеріалі об'єктів (переміщення, напруження, модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, електричні характеристики, тощо) залишається актуальною науково-технічною задачею.

1.3.4 Положення нормативних документів

Аналіз існуючої нормативної документації [6, 7, 107 - 113] показав, що оцінку ФТС та залишкового ресурсу металевих конструкцій ППТ проводять шляхом розрахунку напружень на основі одного або двох інформативних параметрів, що не враховують експлуатаційних чинників та факторів впливу, через що неможливо здійснити точний прогноз надійної й безвідмовної роботи. Наведені в нормативній документації методики розрахунку потребують знань апріорної інформації про параметри режиму експлуатування посудини та марки матеріалу. Здебільшого розрахунки є громіздкими та наближеними, а самі методики носять рекомендаційний характер.

Крім того, на даний час не існує належного методичного забезпечення робіт з визначення напружень у стінках ППТ з одночасним урахуванням декількох інформативних параметрів та факторів впливу, що спричинюють зміни ФМХ.

Тому актуальним залишається питання розробки нових методів та засобів вимірювання напружень, а також методик розрахунку по визначенню НС з урахуванням багатьох інформативних параметрів в комплексі, які представляють ФМХ.

1.4 Вибір інформативних параметрів, які характеризують напружений стан посудин АГНКС, що працюють під тиском

Для підвищення достовірності визначення НС металоконструкцій ППТ необхідно удосконалити існуючі методи за рахунок збільшення інформативності контрольованих параметрів. Згідно проведеного аналізу, за критеріями точності, простоти та можливості реалізації у польових умовах, вартості технічних засобів та можливості встановлення аналітичних зв'язків між параметрами контролю до методів, які доцільно застосувати для контролю напружень у стінках ППТ, слід віднести: акустичні, магнітні, електричні та неруйнівні методи контролю твердості. Відповідно, інформативними параметрами, які характеризуватимуть НС металоконструкцій ППТ, є: швидкість поширення ультразвукових хвиль, коерцитивна сила, електричний опір, магнітні параметри I_1 та I_2 , твердість. Структурно-наслідкова діагностична модель оцінювання фактичного технічного стану ППТ наведена на рисунку 1.5.

Однак, якщо для визначення ФТС ППТ використовувати всі наведені параметри, то контроль буде довготривалим і громіздким. Тому потрібно вибрати із множини інформативних параметрів таку мінімальну їх кількість, яка була б необхідною і достатньою для визначення НС металоконструкцій.

1.5 Вибір та обґрунтування напрямку і задач подальших досліджень

З аналізу умов експлуатації ППТ АГНКС видно, що для забезпечення їх надійності та безаварійної експлуатації необхідно проводити технічне

діагностування та прогнозувати залишковий ресурс шляхом визначення НС металоконструкцій з врахуванням факторів впливу, які діють на них. Можливість застосування фізичних методів контролю для оцінки та контролю рівня НС і визначення залишкового терміну експлуатації ґрунтується на наявності зв'язку між зміною величини інформативних параметрів, які представляють окремі ФМХ металу, і зміною величини напружень.



Рисунок 1.5 – Структурно-наслідкова діагностична модель

Аналіз відомих методів, засобів та технологій оцінки рівня НС показав, що:

- 1) сучасні методи неруйнівного контролю, які регламентовані нормативно-технічною документацією, не дозволяють достатньо точно визначати НС, який є основним параметром для визначення ФТС технологічного обладнання при їх індивідуальному застосуванні;
- 2) відсутня теоретична та методична бази для встановлення рівнянь взаємозв'язків величини напружень зі значеннями інформативних параметрів, отриманих шляхом вимірювання засобами неруйнівного контролю;
- 3) існуючі кореляційні залежності між напруженнями в

металі та окремими фізичними інформативними параметрами переважно встановлено експериментальним шляхом без урахування навантаження, що викликає ці напруження; 4) до найбільш перспективних методів визначення інформативних параметрів, що характеризуватимуть напружений стан від дії навантаження і силових факторів впливу, можна віднести акустичні, магнітні, електричні та методи контроль твердості; 5) сучасний підхід до оцінки та контролю рівня НС спрямований на розроблення комплексних методів, мета яких полягає у врахуванні декількох інформативних параметрів одночасно. Такі параметри є характеристиками різних типів фізичних полів і складають основу багатопараметрового контролю.

Для підвищення точності оцінки ФТС ППТ шляхом визначення НС металоконструкції необхідно вирішити наступні завдання:

1) проаналізувати сучасний стан методів і засобів визначення напруженого стану металевих конструкцій технологічного обладнання АГНКС з метою встановлення фізичних інформативних параметрів, чутливих до зміни напружень;

2) провести теоретичні дослідження характеру взаємозв'язків між комплексом фізичних інформативних параметрів та НС металу під впливом навантаження;

3) провести експериментальні дослідження для встановлення зв'язку між комплексом фізичних параметрів та НС металу посудин АГНКС, що працюють під тиском;

4) удосконалити комплексний метод визначення НС металу навантажених елементів ППТ шляхом використання встановлених закономірностей між вимірними фізичними інформативними параметрами та НС, і провести його промислову апробацію.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРУ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКІВ МІЖ КОМПЛЕКСОМ ФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА НАПРУЖЕНИМ СТАНОМ МЕТАЛУ ПІД ВПЛИВОМ НАВАНТАЖЕННЯ

2.1 Математичне моделювання напруженого стану тривало експлуатованих конструкцій під високим тиском середовища

При експлуатації посудин АГНКС, що працюють під тиском (ППТ), характерною є дія на них комплексу силових факторів, які обумовлюють зміну їх просторової конфігурації, фізико-механічних параметрів матеріалу, електричних властивостей та багатьох інших характеристик. Розглянемо посудини вказані у п.1.1 (цистерни, газові балони, газгольдери, резервуари, акумулятори, тощо) як об'єкт моделювання (ОМ), де пропонується схема моделі їх функціонування з визначенням вхідних та вихідних характеристик об'єктів, а також з урахуванням факторів, які обумовлюють зміну властивостей об'єкта (деформації, зміна фізико-механічних властивостей та інших його характеристик) (рисунок 2.1).

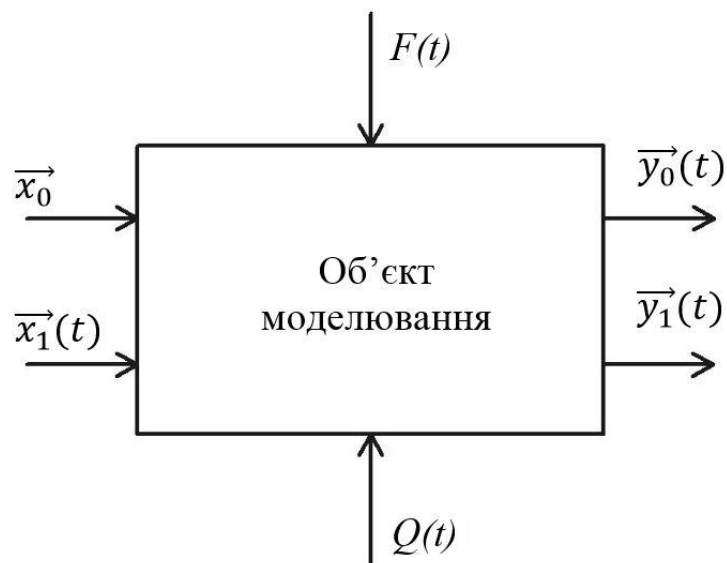


Рисунок 2.1 – Основні характеристики об'єкта моделювання

В процесі функціонування ППТ виділяють наступні їх характеристики та фактори:

- \vec{x}_0 – початкові характеристики об'єкта (геометрія, конструктивна схема, фізико-механічні властивості матеріалу на етапі виготовлення, наявність зварних з'єднань, тощо), що мають стаціонарний характер;

- $\vec{x}_1(t)$ – змінні в числі характеристики об'єкта, які характеризують постійно-діючі динамічні фактори, погодні умови, режими експлуатації, тощо. Слід зазначити, що в категорії $\vec{x}_1(t)$ можна внести всі проектні, передбачувані навантаження та впливи;

- $Q(t)$ – фактори, які постійно діють на ППТ в процесі експлуатації (власна вага, реакції опор, можливі дефекти при виготовленні, різного роду помилки при проектуванні ППТ);

- $F(t)$ – фактори тимчасового впливу (непроектні силові фактори, зсуви ґрунтів, землетруси, порушення конструктивної схеми, зміна фізико-механічних, оптичних та інших властивостей ППТ та поверхонь, комплексна дія непроектних силових факторів);

- \vec{y}_0 – змінні 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 $\vec{x}_1(t)$. Головними параметрами, що характеризують здатність ППТ виконувати поставлені задачі є міцність, стійкість, НС та можливість допустимого переміщення конструкції ППТ, які не обумовлюють порушення в їх роботі або виникнення аварійних ситуацій [114-116].

Всі наведені характеристики можна об'єднати в єдиний узагальнений показник, який вважається пріоритетним для оцінки технічного ресурсу ППТ – їх НДС.

Таке узагальнення є цілком обґрунтованим, оскільки статистика аварійних ситуацій ППТ на АГНКС говорить про те, що часто основною їх причиною є понаднормативна зміна НДС.

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

$$\begin{Bmatrix} \vec{y}_0 \\ \vec{y}_1(t) \end{Bmatrix} = A(Q(t), F(t), \vec{x}_0, \vec{x}_1(t)) \begin{Bmatrix} \vec{x}_0 \\ \vec{x}_1(t) \end{Bmatrix}, \quad (2.1)$$

де $A(Q(t), F(t), \vec{x}_0, \vec{x}_1(t))$ – деякий оператор, що враховує дію на досліджуваний об'єкт початкових характеристик $\vec{x}_0, \vec{x}_1(t)$ та збурюючих факторів $Q(t)$ 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 в себе наприклад, рівняння рівноваги для ППТ в певній системі координат з новим комплексом заданих на всій поверхні ППТ граничних та початкових умов. Практично такий коректний підхід є суттєво обмеженим у використанні, оскільки дуже рідко вдається коректно формалізувати величини $Q(t)$ та $F(t)$, а також саму структуру оператора A . Фактично (2.1) – це система точного опису ППТ як ОМ з деякими модельними функціями $Q(t)$ та $F(t)$, як правило, на етапі його моделювання при проектуванні.

У випадку, коли інформація про $Q(t)$ та $F(t)$ є або недостатньою, або повністю відсутньою (невідомими є кількісні, просторові та часові параметри цих функцій), задача (2.1) може ставитись в такому вигляді:

$$\begin{Bmatrix} \vec{y}_0 \\ \vec{y}_1(t) \end{Bmatrix} = A(\vec{x}_0, \vec{x}_1(t)) \begin{Bmatrix} \vec{x}_0 \\ \vec{x}_1(t) \end{Bmatrix}, \quad (2.2)$$

де $A(\vec{x}_0, \vec{x}_1(t))$ – є оператор з відомою структурою, який є залежним лише від початкового стану та діючих нормативних навантажень без урахування реальних умов експлуатації об'єкта. Фактично (2.2) – це рівняння рівноваги з відповідними граничними та початковими умовами, які враховують відомі, такі, що можуть бути коректно формалізованими, фактори силового або іншого типу впливу – рівняння рівноваги ППТ під дією тиску (внутрішнього і зовнішнього), рівняння теплопровідності для визначення впливу температурних градієнтів, рівняння прогину осьової лінії (для протяглих горизонтальних ППТ) тощо, з урахуванням початкової геометрії та умов експлуатації об'єктів.

Слід зазначити, що підходи (2.1) та (2.2) мають свої переваги, але вивчення практичних задач оцінки реального стану ППТ в одних випадках не дозволяє сформулювати повну постановку задачі оцінки НДС ППТ у формі (2.1), а постановка задачі (2.2) не дозволяє врахувати весь комплекс силових факторів, що реально діють на ППТ. Найчастіше відомим є початковий стан об'єкта (функції та значення \vec{x}_0 та $\vec{x}_1(t)$), а також його кінцевий стан \vec{y}_0 та $\vec{y}_1(t)$, а в окремих випадках відомим є, наприклад, тільки геометричні характеристики ППТ в початковий \vec{x}_0 та в кінцевий \vec{y}_0 момент часу. Наприклад, за допомогою деяких експериментальних методів вдається визначити координати множини точок на поверхні ППТ в два моменти часу. Очевидно вони є різними, а оскільки вимірювання цих координат проводиться через деякий відрізок часу T , та невідомою є інформація про те, що обумовило вказані переміщення і яким чином вони впливають на НДС ППТ. У такому випадку виникає задача, яка може бути записана у вигляді:

$$\begin{Bmatrix} \vec{y}_0 \\ \vec{y}_1(t) \end{Bmatrix} = A \begin{Bmatrix} \vec{x}_0^{(i)} \\ \vec{x}_1^{(i)}(t) \end{Bmatrix}, \quad (2.3)$$

причому структура оператора A визначається способом регуляризації некоректної задачі відновлення полів $\vec{y}_0, \vec{y}_1(t)$ за відомими значеннями $\vec{x}_0^{(i)}, \vec{x}_1^{(i)}(t), \vec{y}_0^{(i)}, \vec{y}_1^{(i)}(t), i=1,2,\dots, N$ в деяких N точках на поверхні ППТ.

Загальна схема вирішення задачі оцінки НДС ППТ в такому випадку є наступною: за відомими $\vec{x}_0^{(i)}, \vec{x}_1^{(i)}(t), \vec{y}_0^{(i)}, \vec{y}_1^{(i)}(t)$ шляхом розв'язання (2.3) одержуються значення $\vec{x}_0, \vec{x}_1(t), \vec{y}_0, \vec{y}_1(t)$ на всій поверхні модельованої ППТ, після чого вирішення задачі типу (2.2) дозволяє визначити компоненти тензора напружень, температуру, механічні навантаження в рамках певних моделей механіки деформованого твердого тіла [99, 103] або інших відомих моделей. При цьому некоректність задачі обумовлюється не тільки неповним заданням $\vec{x}_0^{(i)}, \vec{x}_1^{(i)}(t), \vec{y}_0^{(i)}, \vec{y}_1^{(i)}(t)$ на підмножинній поверхні ППТ, але і невідомою структурою оператора A в (2.3) – з практичної точки зору необхідно вибрати певний спосіб інтерполяції або апроксимації даних, який би дозволив за відомими $\vec{x}_0^{(i)}, \vec{x}_1^{(i)}(t), \vec{y}_0^{(i)}, \vec{y}_1^{(i)}(t)$ визначити $\vec{x}_0, \vec{x}_1(t), \vec{y}_0, \vec{y}_1(t)$ на всій поверхні досліджуваної області, яка моделює ППТ.

Перевагою визначеного методу, є те що інформація про НДС ППТ одержується без використання інформації про сили та навантаження, які тривалий час діють на досліджувану ППТ. Такий підхід є адаптацією теоретичних результатів, одержаних в [104], на випадок ППТ для оцінки зміни їх НДС в процесі експлуатації з урахуванням конструктивних особливостей ППТ, тому при побудові математичної моделі НДС ППТ використовується підхід (2.3) з використанням відповідних апроксимаційних та інтерполяційних процедур на основі інформації про зміну просторової конфігурації ППТ.

2.2 Математичне моделювання НДС посудин під тиском за інформацією про зміну її просторової конфігурації в процесі експлуатації

При вивченні напруженого стану посудин, що працюють під тиском, використовується підхід, змодельований та обґрунтований в [104]. Згідно з ним для оцінки зміни НДС застосовується методика визначення компонента тензора напружень та деформацій за відомими координатами певної множини точок поверхні об'єкта та для якого відомим є параметричне подання його як тривимірного деформованого тіла в початковий та контрольний момент часу. При цьому компоненти тензора напружень та деформацій обчислюються без використання, як правило, невідомої інформації про сили та навантаження, що обумовлюють такого роду зміну просторової конфігурації. Розглядаються два типи ППТ: з сферичною та конічною верхніми частинами (рисунки 2.2, 2.3). В початковий (не деформований) момент часу для координат точок поверхні посудини справедливе наступне параметричне подання в сферичній та циліндричній (для верхньої частини) системах координат:

$$\begin{cases} x = r \cos \varphi, & 0 \leq \varphi \leq r_{cm} \\ y = r \sin \varphi, & R_{BH} \leq r \leq R_3 \\ z = S, & 0 \leq S \leq L \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\begin{cases} x = r \sin \theta \cos \varphi, & \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \theta_0 \\ y = r \sin \theta \sin \varphi, & R'_3 \leq r \leq R'_{BH} \\ z = r \cos \theta, & 0 \leq \varphi \leq 2\pi \end{cases}$$

Слід 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:

$$R_{BH} = R'_{BH} \cos \theta$$

$$R_3 = R'_3 \cos \theta$$

В контрольний момент часу подання (2.4) набуває іншого виду:

$$\begin{cases} x = X_L - Rn_x + \rho(S, \varphi, r, t) \cos \omega(S, \varphi, r, t) b_x + \rho(S, \varphi, r, t) \sin \omega(S, \varphi, r, t) n_x + \psi(S, \varphi, r, t) \tau_x \\ y = Y_L - Rn_y + \rho(S, \varphi, r, t) \cos \omega(S, \varphi, r, t) b_y + \rho(S, \varphi, r, t) \sin \omega(S, \varphi, r, t) n_y + \psi(S, \varphi, r, t) \tau_y, \\ z = Z_L - Rn_z + \rho(S, \varphi, r, t) \cos \omega(S, \varphi, r, t) b_z + \rho(S, \varphi, r, t) \sin \omega(S, \varphi, r, t) n_z + \psi(S, \varphi, r, t) \tau_z \end{cases} \quad (2.5)$$

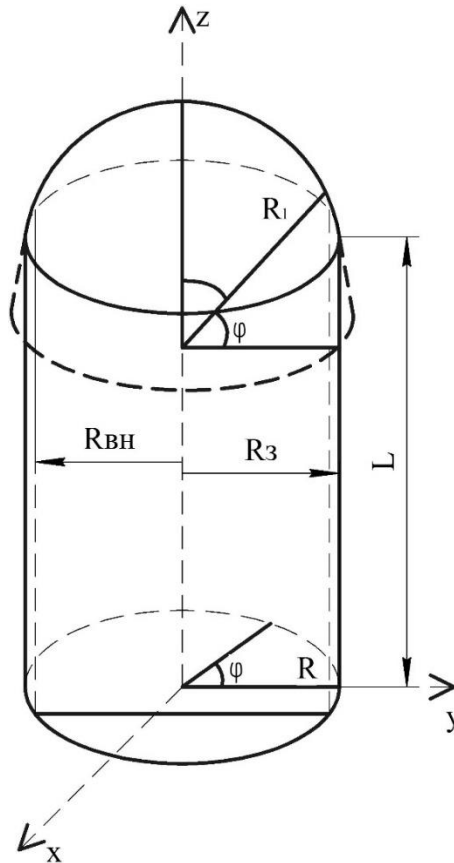


Рисунок 2.2 – Посудина зі сферичною конфігурацією верхньої частини

де $\rho(S, \varphi, r, t), \omega(S, \varphi, r, t), \psi(S, \varphi, r, t)$ – функції, що задають переміщення точок у радіальному, тангенціальному та в поздовжньому 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.

В практичних розрахунках функції $\rho(S, \varphi, r, t), \omega(S, \varphi, r, t), \psi(S, \varphi, r, t)$ задовольняють умови:

$$\begin{aligned}
\rho(S, \varphi, r, t) &\approx r + r_1(S, \varphi, r, t) \\
\omega(S, \varphi, r, t) &\approx \varphi + \varphi_1(S, \varphi, r, t), \\
\psi(S, \varphi, r, t) &\approx S + \psi_1(S, \varphi, r, t)
\end{aligned}
\tag{2.6}$$

Причому $|r_1(S, \varphi, r, t)| \ll 1$; $|\varphi_1(S, \varphi, r, t)| \ll 1$; $|\psi_1(S, \varphi, r, t)| \ll 1$, тобто труба, в загальному, зберігає циліндричну конфігурацію. При розв'язанні вказаної задачі, якщо визначаються переміщення точок поверхні ППТ по куту φ , подання (2.6) може бути записане у вигляді:

$$\begin{aligned}
\rho(S, \varphi, r, t) &= r + \rho_1(\varphi, S, t), \\
\omega(S, \varphi, r, t) &= \varphi, \\
\psi(S, \varphi, r, t) &= S,
\end{aligned}$$

який дозволяє врахувати зміну геометричної конфігурації перерізу ППТ, який в початковий момент мав форму кола. Якщо ж здійснюються вимірювання переміщень точок поверхні ППТ по трьох координатах – подання (2.6) залишається актуальним. Для опису сферичної частини приймається або друге подання наведене в (2.4) або перераховують радіуси кривини сферичної частини R_3^I, R_{BH}^I за результатами експериментальних вимірювань координат верхньої частини. Нехай на верхній частині організується вимірювання координат точок $(x_i; y_i; z_i)$ тоді мінімізуючи функцію:

$$S(x_0; y_0; z_0; R) = \sum_{\tau=1}^N \left[(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2 - R^2 \right]^2, \tag{2.7}$$

знаходимо нові координати центру сферичної частини $(x_0; y_0; z_0)$ та радіусу деформованої сфери. Оптимізація (2.7) проводиться наступним шляхом: цей вираз диференціюється по змінній R , внаслідок чого отримується:

$$R^2 = \frac{1}{N} \sum \left[(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - (z_i - z_0)^2 - R^2 \right], \tag{2.8}$$

після чого даний вираз підставляється у (2.7) і отримується задача знаходження координат $(x_0; y_0; z_0)$, яка, очевидно, має єдиний розв'язок через те, що при зазначеній підстановці отримується задача мінімізації додатньо визначеної квадратичної форми. Це дозволяє однозначно розрахувати центр $(x_0; y_0; z_0)$ і радіус R деформованого куполу посудини.

За даними для конічної верхньої частини, аналогічно (2.4), для другої системи (рисунок 2.3), яка описує конічну частину, справедливим є подання:

$$\begin{cases} x = r(S) \cos \varphi, & 0 \leq \varphi \leq r_{cm} \\ y = r(S) \sin \varphi, & L \leq S \leq L_1 \\ z = S, & 0 \leq r(S) \leq R_3 \end{cases}, \quad (2.9)$$

де L_1 визначає кут при основі конічної частини перерізу:

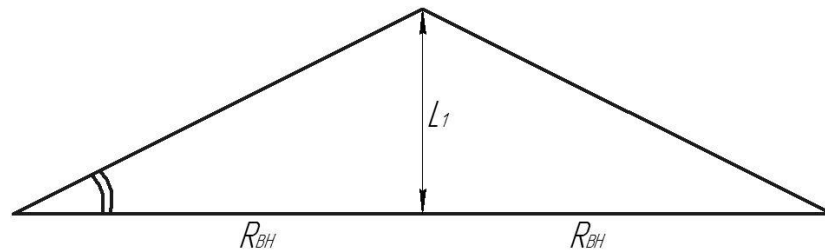


Рисунок 2.3– Формалізація конічної частини

В контрольний момент часу координати циліндричної частини описуються за (2.5), опис конічної частини або залишається таким як в (2.9), або може бути уточненим за результатами вимірювань певного набору координат точок конічної частини. Якщо позначити $\vec{R}_0(S, \varphi, r, t)$ радіус-вектор кожної точки не деформованої посудини, що працює під тиском в початковий момент часу, а $\vec{r}(S, \varphi, r, t)$ радіус-вектор у контрольний момент, описаний залежностями (2.4) – (2.9), можна визначити такі величини:

- компоненти векторів локальних базисів [99]:

$$\begin{aligned} \overline{\mathfrak{A}}_0^i &= \frac{\partial \overline{R}_0}{\partial x_i} & x_1 = S; x_2 = \varphi; x_3 = r \\ \overline{\mathfrak{A}}^i &= \frac{\partial \overline{r}}{\partial x_i} & x_1 = S; x_2 = \varphi; x_3 = r \end{aligned} ; \quad (2.10)$$

- компоненти метричного тензора в два моменти часу:

$$\begin{aligned} g_{ij}^0 &= \overline{\mathfrak{A}}_0^i \overline{\mathfrak{A}}_0^j, & j, i = 1, 2, 3 \\ g_{ij} &= \overline{\mathfrak{A}}^i \overline{\mathfrak{A}}^j \end{aligned} ; \quad (2.11)$$

- компоненти тензора деформацій:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (g_{ij} - g_{ij}^0); \quad (2.12)$$

- компоненти тензора напруження в рамках моделі пружних деформацій:

$$\sigma_{ij} = \lambda I_1(\varepsilon) g_{ij}^0 + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (2.13)$$

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

$$I_1(\varepsilon) = \sum_{i,j=1}^3 \varepsilon_{ij} g^{ij}, \quad (2.14)$$

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

При відтворенні координат точок поверхні в контрольний момент часу широко використовуються інтерполяційні (кубічний сплайн, кубічний сплайн із згладжуванням [117]) та апроксимаційні процедури за методом найменших квадратів [118]. Вказані алгоритми реалізуються за допомогою стандартних пакетів прикладних програм.

Одержані за методикою (2.4) – (2.14) значення механічних напружень характеризують реальні напруження – в тому випадку коли можна вважати, що

в початковий момент часу напруження в посудині, що працює під тиском дорівнюють нулю. Якщо ж в початковий момент напруження є невідомими, то отримані 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, навантажень різної природи, які діють на об'єкті. Для знайдених компонентів можна записати:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^T + \sigma_{ij}^H, \quad (2.15)$$

де σ_{ij} – напруження знайдені за (2.14); σ_{ij}^T – значення напружень які можуть бути визначені теоретично (кільцеві напруження від дії внутрішнього тиску, температурних перепадів, тощо). Як правило вказані напруження є однаковими в кожній точці тіла або функціями просторових координат; σ_{ij}^H – залишкові, неформалізовані напруження, природа яких часто залишається невідомою.

Фактично напруження σ_{ij}^T є результатом застосування підходу, який може бути формалізованим у формі подання (2.2), тоді як σ_{ij}^H відповідають задачі (2.3). Зокрема, для циліндричної частини посудини напруження визначаються за відомими формулами [99] для труби, що перебуває під дією внутрішнього тиску P_a :

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{R_{BH}^2 \cdot P}{R_3^2 - R_{BH}^2} \cdot \left(1 - \frac{R_3^2}{r^2} \right) \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{R_{BH}^2 \cdot P}{R_3^2 - R_{BH}^2} \cdot \left(1 + \frac{R_3^2}{r^2} \right). \\ \sigma_{zz} &= \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot \frac{R_{BH}^2 \cdot P}{R_3^2 - R_{BH}^2} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Для сферичної частини (рисунок 2.4), де α – кут який визначає частину сфери, яка є верхнім куполом посудини, φ – значення кута для даної точки, h – товщина стінки, R – радіус кривини всі компоненти тензора напружень визначаються формулами [96]:

- меридіальне напруження під дією власної ваги:

$$\sigma_m = -\frac{\gamma_m \cdot R}{1 + \cos\varphi}, \quad 90^\circ - \alpha \leq \varphi \leq 90^\circ + \alpha, \quad (2.17)$$

де, γ_m – густина матеріалу;

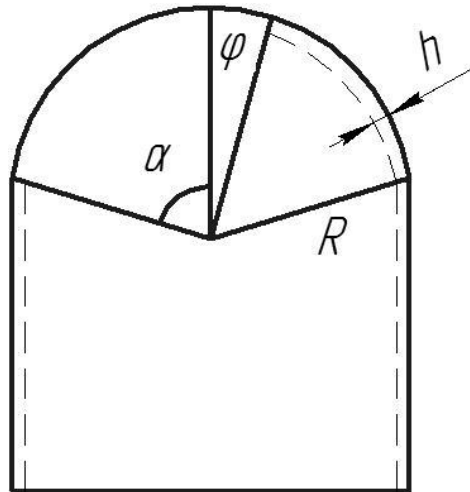


Рисунок 2.4 – Схема сферичної частини

- кільцеві напруження:

$$\sigma_{\theta\theta} = \gamma_m \cdot R \cdot \frac{1 - \cos\varphi - \cos^2\varphi}{1 + \cos\varphi}, \quad 90^\circ - \alpha \leq \varphi \leq 90^\circ + \alpha. \quad (2.18)$$

Під дією тиску P [99]:

$$\sigma_m = \sigma_{\theta\theta} = \frac{PR}{2h}. \quad (2.19)$$

Для конічної частини (рисунок 2.4) під дією внутрішнього тиску виникають напруження (де h – товщина стінки, ω – переміщення в напрямку нормалі, 2α – кут при вершині конуса):

$$\sigma_m = \frac{pxtg\alpha}{2h}; \quad (2.20)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{pxtg\alpha}{h}; \quad (2.21)$$

$$\omega = \frac{3px^2tg^2\alpha}{4hE}, \quad (2.22)$$

де, E – модуль Юнга матеріалу

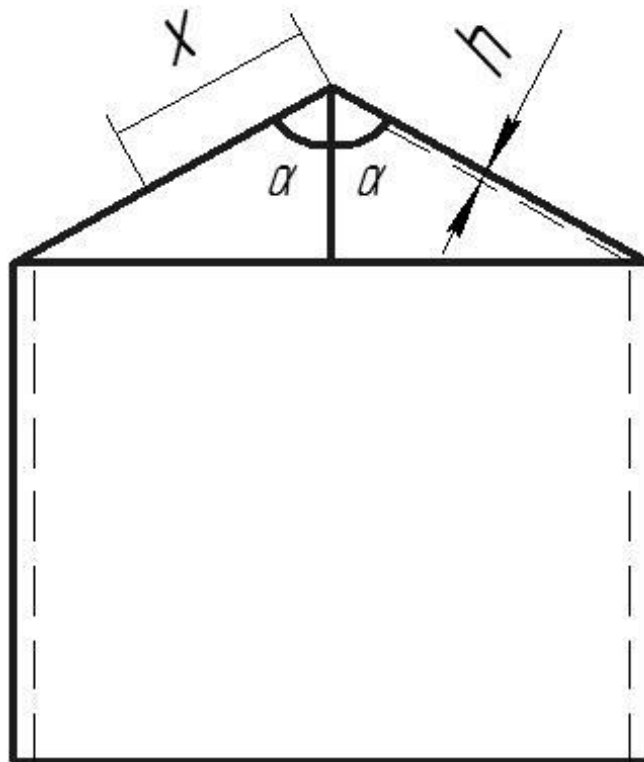


Рисунок 2.4 – Схема конічної вершини

Наведені формули стосуються лише основних, найбільш легкоформалізованих напружень. Для оцінки напружень σ_{ij}^H необхідно розробити

спеціальні підходи, які б дозволили визначити фактори, що впливають на НДС ППТ АГНКС, експериментально-розрахунковим методом встановити степінь цього зв'язку.

2.3 Розроблення математичного апарату для визначення факторів, що впливають на напружено-деформований стан посудин під тиском

Напруження σ_{ij}^H , обчислені за (2.4) – (2.15) з урахуванням (2.16) – (2.22), як правило, несиметрично розподілені по об'єму ППТ, природа цих напружень є невідомою, тому необхідно висунути гіпотезу стосовно того, від яких параметрів ці напруження залежать, в чому причина їх виникнення. Вони можуть залежати від фізико-механічних властивостей матеріалу, електричних параметрів, тощо. Нехай $x_1 \dots x_N$ – N – факторів, що впливають на σ_{ij}^H . Якщо провести виміри σ_{ij}^H при різних значеннях параметрів x_i , то для встановлення степеню взаємозв'язку між σ_{ij}^H та x_i використовується метод асоціативного аналізу. Для σ_{ij}^H та x_i встановлюються значення σ та X^i які визначають медіану розподілу цих величин на діапазонні їх зміни, при цьому заповнюється наступна таблиця (таблиця 2.1), яка містить результати N дослідів за критерієм їх попадання у відповідний інтервал. При цьому одержується така інформація [118]:

Таблиця 2.1 – Результати N дослідів за критерієм їх попадання у відповідний інтервал

	$\sigma_{ij}^H < \sigma$	$\sigma_{ij}^H > \sigma$		$a+b+c+d=N$
$x_i < X^i$	a	b	$a+b$	
$x_i > X^i$	c	d	$c+d$	
	$a+c$	$b+d$	N	

де a, b, c, d – кількість результатів дослідів при відповідних значеннях $(x_i; \sigma_{ij}^H)$.

Тоді визначаються коефіцієнти:

$$\psi_T = \frac{3}{\sqrt{N-1}}; \quad (2.23)$$

$$\psi_E = \frac{ad-bc}{\sqrt{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)}}. \quad (2.24)$$

Якщо $\psi_E > \psi_T$, то зв'язок між x_i та σ_{ij}^H є суттєвим значущим, він вимагає подальшого дослідження, якщо $\psi_E < \psi_T$, то зв'язок між величинами є несуттєвим, ним можна знехтувати. При суттєвому взаємозв'язку між величинами σ_{ij}^H та $x_i, k=1, 2, 3$ за методом найменших квадратів вдається побудувати неповну кубічну модель виду:

$$\sigma_{ij}^H = \eta(x_1 x_2 x_3) = \theta_0 + \theta_1 x_1 + \theta_2 x_2 + \theta_3 x_3 + \theta_{12} x_1 x_2 + \theta_{13} x_1 x_3 + \theta_{23} x_2 x_3 + \theta_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (2.25)$$

яка при певних умовах [118] може бути адекватно замінена лінійною моделлю:

$$\sigma_{ij}^H = \eta(x_1 x_2 x_3) = \theta_0 + \theta_1 x_1 + \theta_2 x_2 + \theta_3 x_3. \quad (2.26)$$

Для проведення подальших досліджень запропонованої методики необхідне проведення експериментальних досліджень, які б дозволили:

- визначати переміщення точок об'єкта;
- визначати реальні фізико-механічні властивості матеріалу;
- визначати всі параметри (що встановлюються методом асоціативного аналізу) НС об'єкта та визначити тип залежності, що найкращим чином характеризує співвідношення між величинами.

При вирішенні багатьох задач експериментальних даних достатній рівень точності досягається вже при використанні двопараметричних залежностей. При цьому використовуються функції виду:

$$y = f(x, a, b), \quad a, b = \text{const}, \quad (2.27)$$

які відповідають наступним вимогам:

1. Значення $y(x); \frac{dy}{dx}(x); \frac{d^2y}{dx^2}$ повинні відповідати умовам, які витікають з фізичних особливостей задачі (знакопостійність, обмеженість, значення в конкретних точках тощо).

2. Кожна із залежностей (2.27) може бути після відповідних аналітичних перетворень подана у вигляді лінійної залежності:

$$v = f_L(u) = k_L u + b_L, \quad (2.28)$$

де v, u – перетворені змінні;

k_L, b_L – невідомі коефіцієнти.

Друга умова передбачає певні обмеження на координати $(x_i, f(x_i))$ вузлів апроксимації, пов'язані з перетвореннями формул (2.27) і координат $(x_i, f(x_i))$. Функції (2.27), які задовольняють дві умови визначаються неоднозначно, для вибору оптимальної апроксимаційної функції виду (2.27) аналізується коефіцієнт лінійної кореляції R_{uv} між величинами $(u_i; v_i)$, які одержуються шляхом перетворення координат вузлів апроксимації $(x_i, f(x_i))$ за (2.28):

$$R_{uv} = \frac{N \sum_{i=1}^N u_i v_i - \sum_{i=1}^N u_i \sum_{i=1}^N v_i}{\sqrt{\left[N \sum_{i=1}^N u_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N u_i \right)^2 \right] \times \left[N \sum_{i=1}^N v_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N v_i \right)^2 \right]}}, \quad (2.29)$$

де N – число вузлів апроксимації. Для подальшого використання вибирається та з формул, для якої абсолютне значення коефіцієнта кореляції R_{uv} є максимальним. Аналіз (2.29) показує, що у випадку лінійної залежності між

величинами u та v значення $R_{uv} = \pm 1$, причому у випадку прямої лінійної залежності $v = Cu$, $C > 0$, $R_{uv} = 1$, якщо ж $C < 0$, то $R_{uv} = -1$. Тому після вибору формули з максимальним значенням $|R_{uv}|$ проводиться аналіз числового значення вказаної величини: формула наближає задані вузлові значення достатньо точно, якщо $|R_{uv}| \gg 0,98 - 0,99$. У випадку, якщо $|R_{uv}|$ не досягає зазначених значень оцінюється мінімальне значення відхилень:

$$S_1 = \sum_{i=1}^N (v_i - f_L(u_i))^2, \quad (2.30)$$

або

$$S_2 = \sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2, \quad (2.31)$$

після чого рішення про використання даної формули приймається з урахуванням встановлених рівнів точності. Коефіцієнти k_L, b_L в (2.28) визначаються за відомими формулами, які встановлюються для коефіцієнтів лінійної регресії:

$$k_L = \frac{N \sum_{i=1}^N u_i v_i - \sum_{i=1}^N u_i \sum_{i=1}^N v_i}{N \sum_{i=1}^N u_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N u_i \right)^2}, \quad (2.32)$$

$$b_L = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N v_i - k_L \sum_{i=1}^N u_i \right). \quad (2.33)$$

Для визначення коефіцієнтів a_i і b_i за відомими значеннями k_L та b_L використовують залежності, наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Лінеаризація апроксимаційних формул

Формула	k1	l1	u	v
$y = ax + b$	a	b	x	y
$y = ax^b$	b	lna	lnx	lny
$y = ab^x$	lnb	lna	x	lny
$y = a + \frac{b}{x}$	b	a	x	xy
$y = \frac{l}{ax + b}$	a	b	x	$\frac{l}{y}$
$y = \frac{x}{ax + b}$	a	b	x	$\frac{x}{y}$
$y = a \ln x + b$	a	b	lnx	y
$y = \frac{l}{a + be^{-x}}$	b	a	e-x	$\frac{l}{y}$

Інші способи апроксимації відрізняються від проаналізованих лише кількістю базових функцій $f_i(x)$ в наступному виразі:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n C_i f_i(x), \quad (2.34)$$

і, як наслідок, кількістю коефіцієнтів c_i , що підлягають визначенню за методом найменших квадратів шляхом розв'язання наступної задачі мінімізації:

$$S(c_1, c_2, \dots, c_n) = \sum_{i=1}^m (c_i f_i(x_i) - f(x_i))^2 \rightarrow \min \quad (2.35)$$

для наближення таблично-заданої функції $(x_i, f(x_i))$.

Висновки до розділу 2

1. Обґрунтовано тип математичної моделі оцінки НДС ППТ АГНКС, яка зводиться до необхідності побудови алгоритму регуляризації некоректної задачі відновлення фізико-механічного поля за його значеннями на частині поверхні ППТ, що дозволяє проводити чітку математичну формалізацію задач діагностування технічного стану ППТ АГНКС.

2. Запропоновано математичну модель процесу деформування ППТ при її тривалій експлуатації, що дозволяє, на відміну від існуючих, проводити оцінку параметрів НДС без інформації про сили та навантаження, що діють на ППТ АГНКС протягом тривалого часу.

3. Запропоновано підхід до визначення факторів суттєвого впливу на зміну НДС ППТ АГНКС на основі апарату асоціативного аналізу та встановлення аналітичної структури цієї залежності, що дозволяє проводити оцінку несиметричних напружень, що виникають у матеріалі ППТ протягом експлуатації.

Результати вказаного розділу відображені в роботах [119,120].

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ ВСТАНОВЛЕННЯ ЗВ'ЯЗКУ МІЖ КОМПЛЕКСОМ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА НАПРУЖЕНИМ СТАНОМ МЕТАЛУ ПОСУДИН АГНКС, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПІД ТИСКОМ

Напружений стан металу конструкцій різного технічного та промислового призначення визначається розрахунковими та експериментальними методами у вигляді розподілу напружень, деформацій і переміщень в конструкції. Він є базою для оцінки статичної міцності і ресурсу конструкцій на всіх етапах їх життєвого циклу [121].

Під час експлуатування посудин АГНКС визначення НС у робочих умовах викликає певні складності, оскільки часто для цього необхідно робити технологічні зупинки, що є економічно недоцільним, а подекуди, і технологічно неможливим.

Відтворити наближений процес визначення напружень посудини, що працює під тиском, можливо у науково-технічних лабораторіях, у цілому, за допомогою модельних зразків. У даному випадку важливим є правильність побудови та виготовлення експериментальних зразків для визначення напружень, а також розробка методики проведення експериментальних досліджень.

Метою подальших експериментальних досліджень було визначення достатньої кількості інформативних параметрів контролю, які пов'язують фізичні та механічні властивості металу з його напруженим станом. Їх комплексне застосування дасть змогу підвищити точність визначення рівня НС ППТ АГНКС у порівнянні з відомими методами.

Відповідно до поставлених завдань і з метою забезпечення достовірності результатів вимірювання була розроблена методика проведення експериментальних досліджень, яка передбачає виконання наступних етапів:

– проведення експериментальних досліджень з метою встановлення фізичних інформативних параметрів, які є найбільш чутливими до зміни рівня напруження металу;

– проведення експериментальних досліджень з метою визначення зв'язку між встановленими фізичними інформативними параметрами контролю рівня НС ППТ.

3.1 Експериментальні дослідження щодо вибору кількості інформативних параметрів напруженого стану конструкції

Для наближеного відображення перебігу процесу зміни рівня та визначення НС ППТ АГНКС були розроблені та запропоновані покрокові алгоритми з проведення експериментальних досліджень. Основною метою першого етапу досліджень було встановлення чутливості обраних в 1 розділі фізичних властивостей металу до зміни величини напруження.

Для проведення першого етапу експериментальних досліджень було виготовлено два плоскі пропорційні зразки відповідно до вимог [122], яким присвоєно маркування «№1» та «№2» (рисунок 3.1).

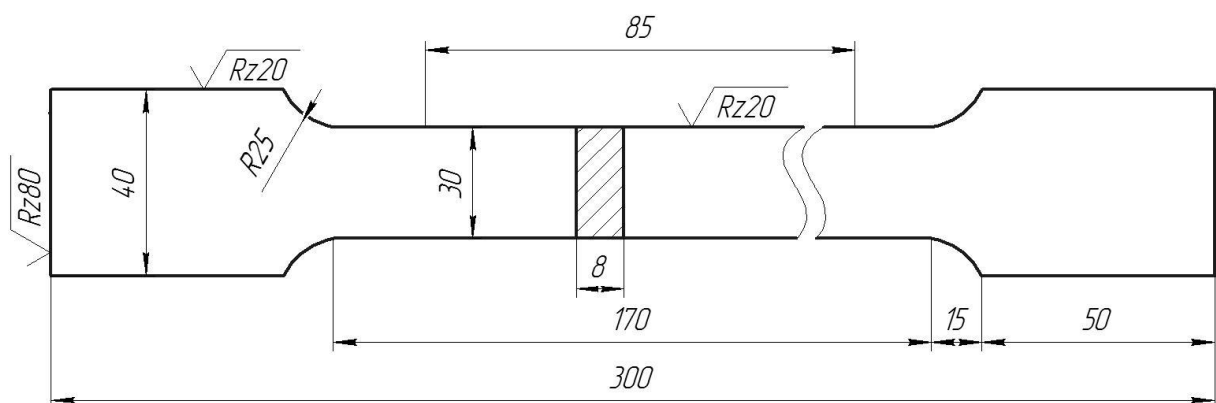


Рисунок 3.1 – Конструкція плоских експериментальних зразків «№1» та «№2»

Плоскі експериментальні зразки «№1» та «№2» виготовлені із конструкційної низьколегований сталі 17Г1С [123, 124] з такими

регламентованими основними механічними властивостями: границя міцності – 490 - 630 МПа; границя плинності – 343 - 355 МПа; ударна в'язкість – 390 - 440 кДж/м².

Зразки металу взяті із трубних конструкцій, виведених з експлуатації після 20 років з моменту введення у підрозділах ПАТ «Укртрансгаз».

Для забезпечення правильності постановки експерименту та достовірності його результатів розроблена методика експериментальних досліджень, яка передбачає виконання наступних етапів:

- розроблення схеми вимірювання обраних за результатами теоретичного аналізу фізичних інформативних параметрів на виготовлених експериментальних зразках;

- підбір та налаштування засобів вимірювання фізичних інформативних параметрів;

- підготовка експериментальних зразків до проведення вимірювання (очистка зразків, розмітка визначених ділянок, забезпечення шорсткості поверхні не грубше Rz 20, тощо);

- проведення вимірювань фізичних інформативних параметрів на експериментальних зразках із покроковою зміною навантаження розтягом;

- опрацювання результатів вимірювання фізичних інформативних параметрів.

В процесі випробування дослідних плоских зразків їх покроково навантажували розтягуючим зусиллям з одночасним вимірюванням фізичних інформативних параметрів: твердості, коерцитивної сили, швидкості поширення ультразвукових хвиль, електричного опору, магнітного параметру I₂ з частотою вимірювання 13 і 25 кГц та магнітного параметру I-1 з частотою вимірювання до 10 кГц. Метою експерименту було встановлення найбільш чутливих з перерахованих параметрів до зміни напруження.

Для встановлення заданого в зразках рівня напруження використовувалася розривна машина типу Р-50 (рисунок 3.2) [125].

Даний тип машини забезпечує діапазон навантаження відповідно до необхідного рівня напружень у металі дослідних зразків, що відповідає робочим напруженням досліджуваних в роботі ППТ. Крім того, обрана для досліджень розривна машина забезпечує фіксацію заданого значення навантаження, що полегшує процес вимірювання обраних фізичних інформаційних параметрів.



Рисунок 3.2 – Загальний вигляд використовуваної в роботі розривної машини типу Р-50

Для врахування анізотропії властивостей матеріалу досліджуваних взірців їх робоча ділянка була поділена на 3 (три) локальні зони вимірювання, які також враховують конструктивні особливості технічних засобів вимірювання. Розташування зон контролю відображено на рисунку 3.3.

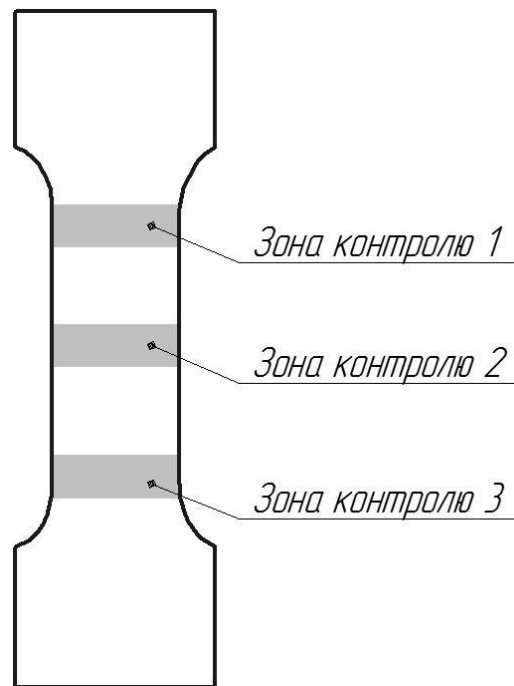


Рисунок 3.3 – Розташування зон вимірювання фізичних інформативних параметрів

Для реєстрації результатів експериментальних досліджень розроблені протоколи, дані з яких оцифровувалися та піддавалися подальшій обробці і систематизації (Додаток Б).

Для вимірювання величин дійсних значень фізичних інформативних параметрів металу зразків використовувалися неруйнівні методи і засоби, які базуються на різних фізичних принципах [19-22]. Характеристики засобів вимірювання, що використовувалися в роботі, наведені в додатку В.

Вимірювання кожного окремого фізичного інформативного параметру проводилося в процесі навантаження експериментальних зразків заданим зусиллям розтягу, а саме у момент зупинки розривної машини на заданому значенні навантаження. Дискретність збільшення навантаження становив 0,5 т.

Вимірювання твердості. Виходячи з того, що вимірювання твердості металу ППТ АГНКС у процесі експлуатації проводять неруйнівними методами контролю, найбільш доцільним є використання портативного переносного контактно-резонансного твердоміра типу ТКР-35 або твердоміра динамічного

ТД-32 [126, 127] (рисунок 3.4). Дані засоби контролю мають широкий діапазон вимірювання твердості з необхідною точністю (додаток В), яка регламентується чинними нормативними документами, забезпечують повторюваність результатів, не вимагають значної площі контактної зони вимірювання і дають можливість вимірювати твердість поверхонь з будь-яким просторовим положенням.

Налаштування приладу та підготовка до вимірювання проводилася відповідно до керівництва з експлуатації. Вимірювання твердості проводилось трикратно на кожній виділеній зоні контролю зразків. Як остаточний результат приймалось усереднене з трьох вимірних значень твердості на кожній зоні.

Вимірювання коерцитивної сили. У польових та цехових умовах вимірювання коерцитивної сили доцільно здійснювати коерцитиметром з приставним П - подібним електромагнітом. Робота коерцитиметра ґрунтується на вимірюванні струму розмагнічування, який є пропорційним коерцитивній силі, що часто корелює з структурночутливими властивостями металу.

Вимірювання коерцитивної сили проводились за допомогою коерцитиметра КРМ-Ц-КЗМ на робочій зоні досліджуваного зразка у двох протилежних напрямках [128] (рисунок 3.5).



Рисунок 3.4 – Загальний вигляд твердомірів ТКР-35 та ТД-32 (а) і процес вимірювання твердості (б)



а)

б)

Рисунок 3.5 – Загальний вигляд коерцитиметра КРМ-Ц-К3М (а) і процес вимірювання коерцитивної сили (б)

Налаштування приладу та підготовка до вимірювання проводилася відповідно до керівництва з експлуатації.

Вимірювання швидкості поширення ультразвукових хвиль у металі експериментальних зразків вимірювалася у робочій зоні дослідних взірців за допомогою ультразвукового дефектоскопа DIO 562 з використанням прямого та похилого п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП) (рисунок 3.6) [129].



а)

б)

Рисунок 3.6 – Загальний вигляд ультразвукового дефектоскопа DIO 562 (а) і способи вимірювання швидкості поширення ультразвукових хвиль (б)

Швидкість поширення поздовжніх ультразвукових хвиль вимірювалась при їх генерації прямим ПЕП на частоті 5МГц. Для вимірювання швидкості поширення поперечних ультразвукових хвиль було використано два похилі ультразвукові ПЕП з частотою генерації ультразвукових хвиль 5МГц та кутом їх введення в метал зразків 50°. ПЕП в процесі вимірювання встановлювались навпроти один одного на відстані 30 мм при роздільній схемі підключення.

Налаштування приладу та підготовка до вимірювання проводилася відповідно до керівництва з експлуатації [129].

Визначення питомого електричного опору. Для визначення питомого електричного опору вимірювався електричний опір із використанням мікроомметра БСЗ-010-2 [130] (рисунок 3.7).



а)



б)

Рисунок 3.7 – Загальний вигляд мікроомметра БСЗ-010-2 (а) і процес вимірювання електричного опору (б)

Він забезпечує заданий діапазон вимірювання електричного опору для даного класу сталі.

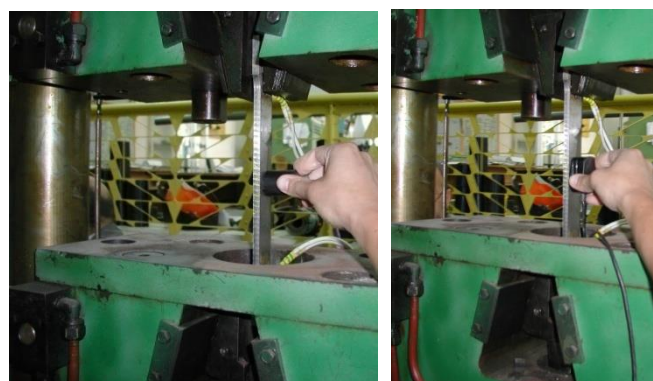
Електричний опір вимірювався на загальній площі зразка від 1 до 3 зони, що зумовлено конструктивними особливостями даного приладу. Для зменшення впливу перехідного опору між поверхнею дослідних зразків та контактами приладу приєднання останніх виконалося шляхом пайки у двох точках однаково віддалених від центру і так, що між ними знаходилася вся робоча поверхня зразків.

Налаштування приладу та підготовка до вимірювання проводилася відповідно до керівництва з експлуатації.

Вимірювання магнітного параметру I_2 проводилось за допомогою експериментальної установки ІВС-І2 [131] (рисунок 3.8).



а)



б)

Рисунок 3.8 – Загальний вигляд установки ІВС-І2 (а) та процес вимірювання магнітного параметру I_2

Принцип роботи ґрунтується на реєстрації частоти електромагнітних коливань індуктивного перетворювача від зміни механічних характеристик металу з подальшим опрацюванням штучних нейронних мереж. Вимірювання проводилися у трьох зонах контролю відповідно до розробленої схеми.

Налаштування приладу та підготовка до вимірювання проводилася відповідно до керівництва з експлуатації.

Робоча частота коливального контуру становила 13 та 25 кГц відповідно для двох перетворювачів, що входять в комплект системи ІВС-І2.

Вимірювання магнітного параметру I-1 на визначених зонах контролю здійснювалося з допомогою експериментальної установки І-1, принцип роботи якої ґрунтується на вимірюванні величини магнітно-шумового сигналу металу з можливістю подальшого визначення значення ударної в'язкості досліджуваного металу [132] (рисунок 3.9).



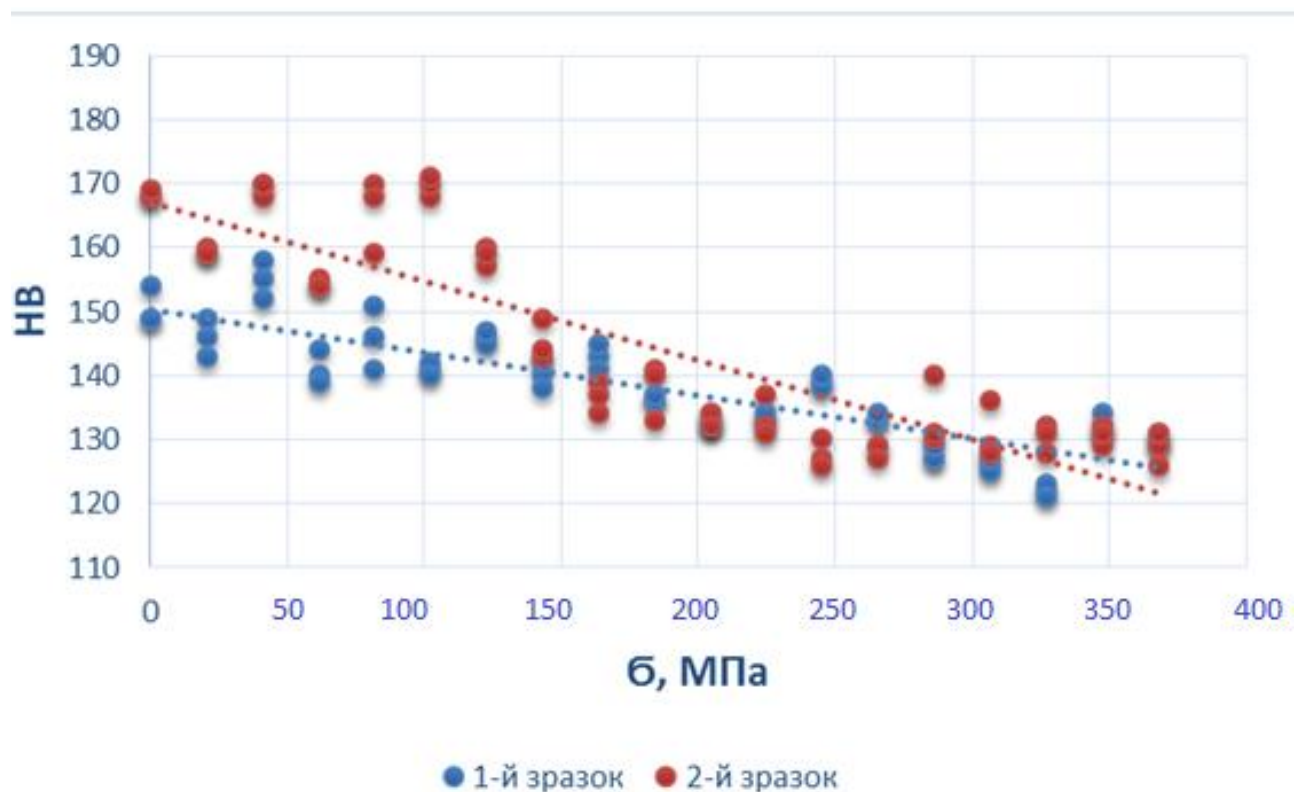
Рисунок 3.9 – Загальний вигляд приладу І-1

Наступним кроком експериментальних досліджень було опрацювання результатів вимірювання інформативних параметрів.

З метою визначення залежності між величиною осьового напруження, зумовленого зусиллям розтягу, і вимірними фізичними інформативними параметрами проведено графічний та кореляційний аналіз.

За результатами графічного аналізу наведено:

-залежність між величиною твердості та напруження (рисунок 3.10)

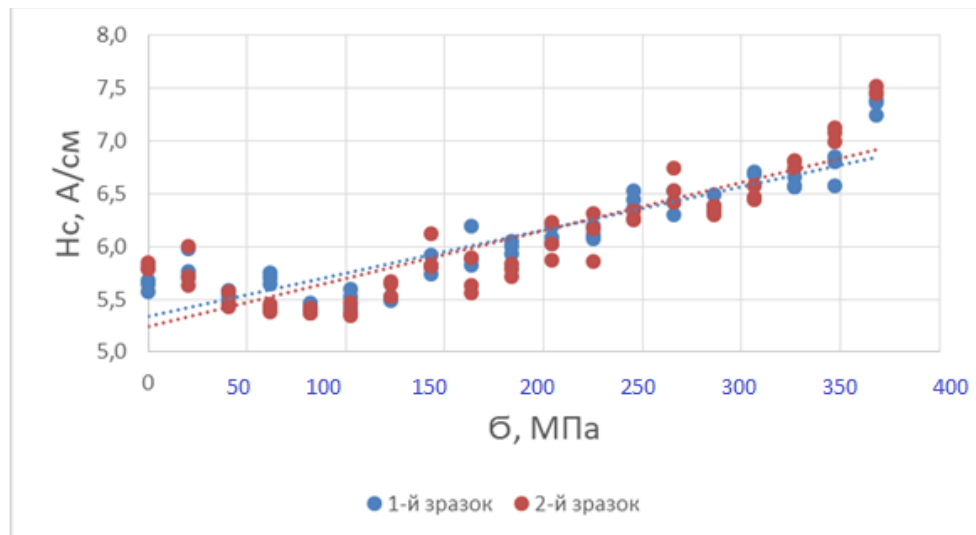


Функція лінії тренду для зразка №1: $HV = -0,0336 \sigma + 150,33$

Функція лінії тренду для зразка №2: $HV = -0,062 \sigma + 167,15$

Рисунок 3.10 – Залежність між твердістю та напруженням

- залежність між величинами коерцитивної сили та напруження (рисунок 3.11)

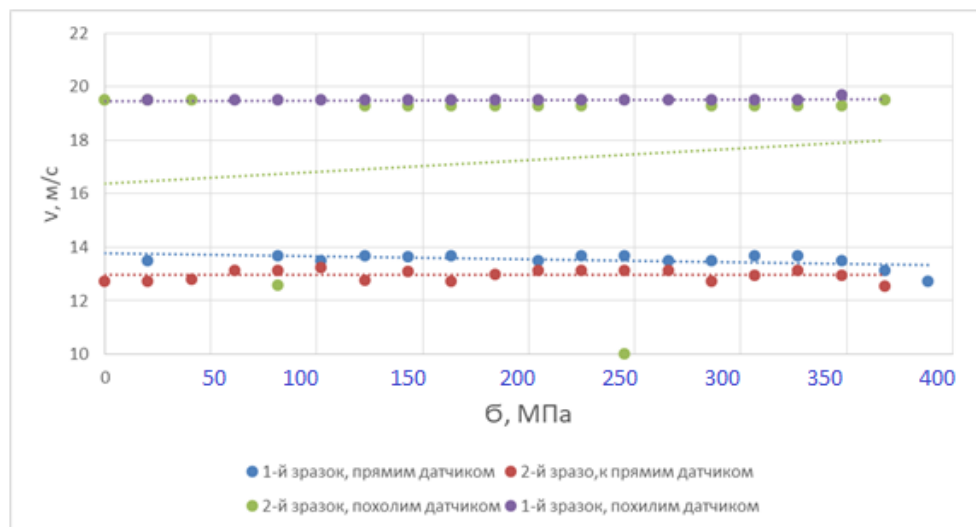


Функція лінії тренду для зразка №1: $H_c = 0,002 \sigma + 5,3427$

Функція лінії тренду для зразка №2: $H_c = 0,0023 \sigma + 5,2405$

Рисунок 3.11 – Залежність між коерцитивною силою та напруженням

- залежність між швидкістю поширення ультразвукових хвиль та напруженням (рисунок 3.12)



Функція лінії тренду для зразка №1 (прямий датчик): $V = -0,0006 \sigma + 13,774$

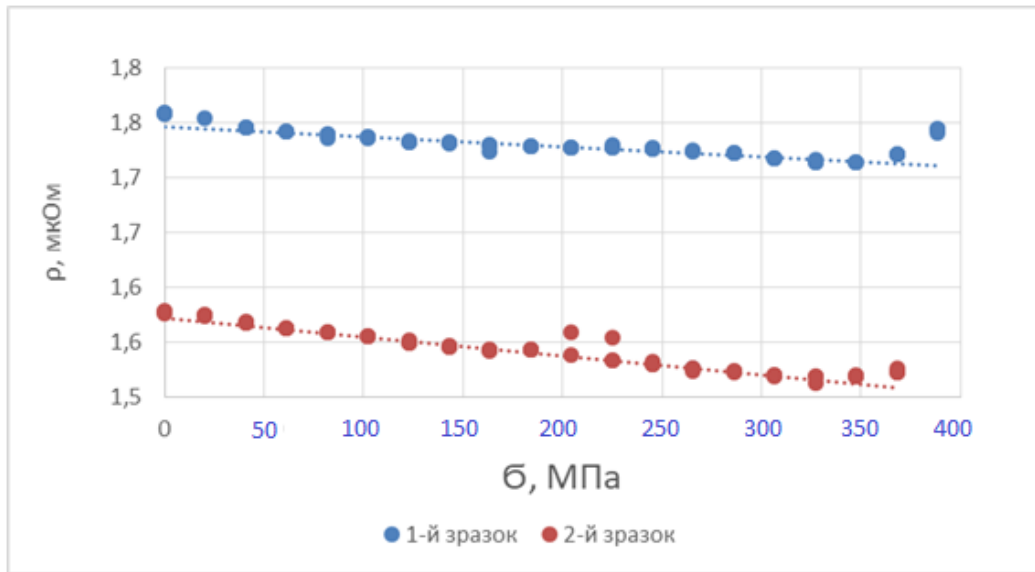
Функція лінії тренду для зразка №1 (похилий датчик): $V = 1E-0,4 \sigma + 19,473$

Функція лінії тренду для зразка №2 (прямий датчик): $V = 4E-0,6 \sigma + 12,957$

Функція лінії тренду для зразка №2 (похилий датчик): $V = 0,0022 \sigma + 16,391$

Рисунок 3.12 – Залежність між швидкістю поширення ультразвукових хвиль та напруженням

- залежність між питомим електричним опором та напруженням (рисунок 3.13)

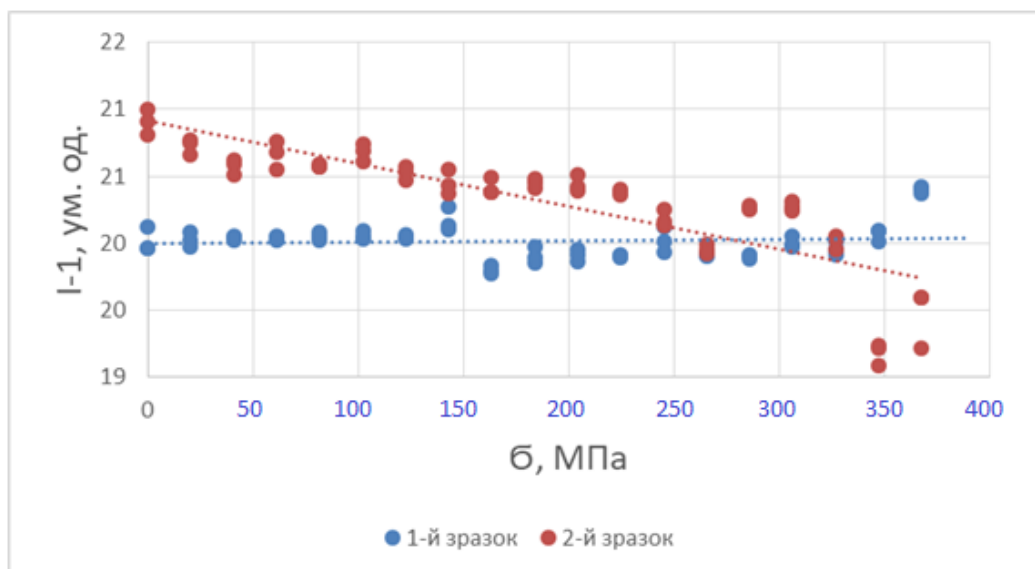


Функція лінії тренду для зразка №1: $\rho = -5E-05 \sigma + 1,7457$

Функція лінії тренду для зразка №2: $\rho = -9E-05 \sigma + 1,5712$

Рисунок 3.13 – Залежність між питомим електричним опором та напруженням

- залежність між магнітним параметром I-1 та напруженням (рисунок 3.14)

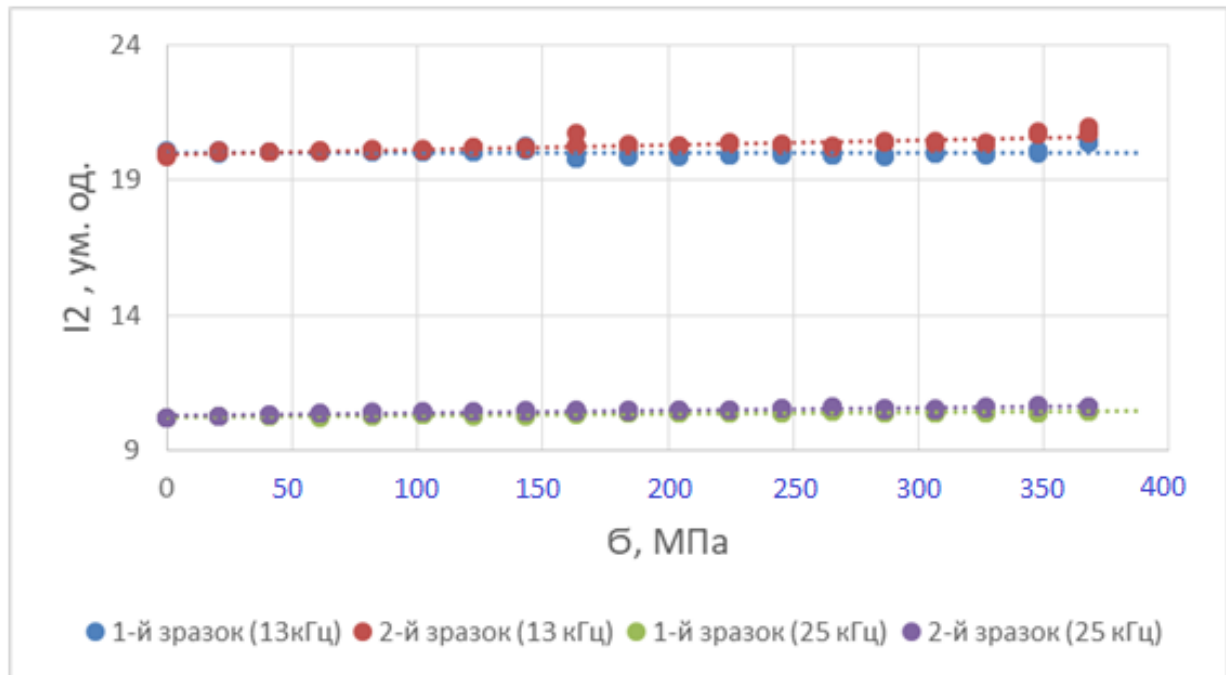


Функція лінії тренду для зразка №1: $I-1 = 5E-05 \sigma + 19,994$

Функція лінії тренду для зразка №2: $I-1 = -0,0016 \sigma + 20,909$

Рисунок 3.14 – Залежність між магнітним параметром I-1 та напруженням

- залежність між магнітним параметром I_2 та напруженням (рисунок 3.15)



Функція лінії тренду для зразка №1 (13кГц): $I_2 = 5E-05 \sigma + 19,994$

Функція лінії тренду для зразка №1 (25кГц): $I_2 = 0,0003 \sigma + 10,241$

Функція лінії тренду для зразка №2 (13кГц): $I_2 = 0,0008 \sigma + 19,976$

Функція лінії тренду для зразка №2 (25кГц): $I_2 = 0,0005 \sigma + 10,283$

Рисунок 3.15 – Залежність між магнітним параметром I_2 та напруженням

З графічних залежностей встановлено, що характер зв'язку між фізичними параметрами і напруженням металу зразків нелінійний.

За результатами вимірювання швидкостей поширення акустичних хвиль у зразках встановлено, що в зоні пружних деформацій (зона Гука), зміна швидкості ультразвукових хвиль при зміні величини внутрішніх напружень не фіксувалась. Це пов'язано з тим, що пружні константи нижчого порядку пов'язані з швидкостями поперечних та поздовжніх ультразвукових хвиль і не залежать від механічних напружень, які прикладені до матеріалу. Вимірюючи швидкість поширення ультразвукових хвиль можна оцінити тільки поведінку матеріалу в умовах напруженого стану. Для виявлення кореляції між швидкістю

ультразвукових хвиль та напруженням необхідно проводити більш точні вимірювання. Для цього потрібно використовувати складні методики контролю та технічні засоби. Окрім цього, вимірювання ускладнюються тим, що похибка визначення пружних констант приблизно вдвічі більша похибки вимірювання швидкості поздовжніх та поперечних ультразвукових хвиль [133].

Для встановлення кореляційних зв'язків між кожним окремим фізичним параметром та рівнем напружень було проведено кореляційний аналіз і визначено відповідні коефіцієнти кореляції за формулою [134]:

$$R = \frac{\frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n HC_i \cdot F_{ji} - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n HC_i \right) \left(\sum_{i=1}^n F_{ji} \right) \right]}{\sigma_{HC} \cdot \sigma_{F_j}} \quad (3.1)$$

де R – коефіцієнт кореляції; HC – відповідне значення напруження; F_j – відповідний інформативний параметр; σ_{HC} та σ_{F_j} – стандартні квадратичні відхилення відповідних величин; n – кількість спостережень.

Як правило, значення, що перебувають в межах від 0,4 до 0,8 вказують на наявність кореляційного зв'язку між обраними величинами. Знак «мінус» вказує на обернену залежність між цими величинами.

Результати кореляційного аналізу наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати кореляційного аналізу виміряних параметрів

№ зразка	Фізична величина						
	Твердість	Коерцитивна сила	Питомий електричний опір	Магнітний параметр I-1	Магнітний параметр I-2 (25кГц)	Магнітний параметр I-2 (13кГц)	Швидкість поширення ультразвуку
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

Результати кореляційного аналізу свідчать про наявність чітко вираженого зв'язку з осьовим напруженням наступних фізичних інформативних параметрів: твердість, коерцитивна сила, електричний опір та магнітний параметр I2 (25кГц) з напруженням. Величина коефіцієнта кореляції магнітного параметру I-1, магнітного параметру I2 (13кГц) та швидкості поширення ультразвукових хвиль вказують на відсутність взаємозв'язку між ними та зміною напруження.

Таким чином, за результатами кореляційного аналізу встановлено перелік фізичних інформативних параметрів, які чутливі до зміни величини напруження: твердість, коерцитивна сила, магнітний параметр I2, питомий електричний опір.

3.2 Експериментальні дослідження для встановлення зв'язку між фізичними інформативними параметрами та рівнем напружень металу посудин, що працюють під тиском

3.2.1 Розроблення конструкції експериментальних зразків посудин, що працюють під тиском для досліджень

Для підтвердження правильності вибору фізичних інформативних параметрів контролю НС було проведено другий етап експериментальних досліджень на дослідних зразках, що відтворюють конструктивні особливості обраного в роботі об'єкта контролю. В якості дослідних зразків, для подальших експериментальних досліджень було виготовлено 2 моделі посудин, у яких створювався надлишковий тиск, що зумовлював появу радіальних напружень у стінках посудин заданого значення, що, власне, відтворювало напруження, які виникають в процесі роботи ППТ АГНКС.

Загальний вигляд та геометричні параметри експериментальних взірців зображені на рисунку 3.15.

Експериментальний зразок №1 (рисунок 3.16, а) – посудина, виготовлена з фільтр-сепаратора, який експлуатувався на об'єктах ПАТ «Укртрансгаз» ~ 20 років. Матеріал зразка – сталь 09Г2С, що встановлено результатами хімічного

аналізу зразків металу у зв'язку із відсутністю сертифікату підтвердження (таблиця 3.2).

Експериментальний зразок №2 (рис. 3.16, б) – посудина, яка виготовлена з трубного елемента, який був у експлуатації понад 20 років на об'єктах ПАТ «Укртрансгаз». Матеріал посудини – сталь марки 17Г1С, що встановлено результатами хімічного аналізу, у зв'язку із відсутністю сертифікату на неї (табл.3.2).

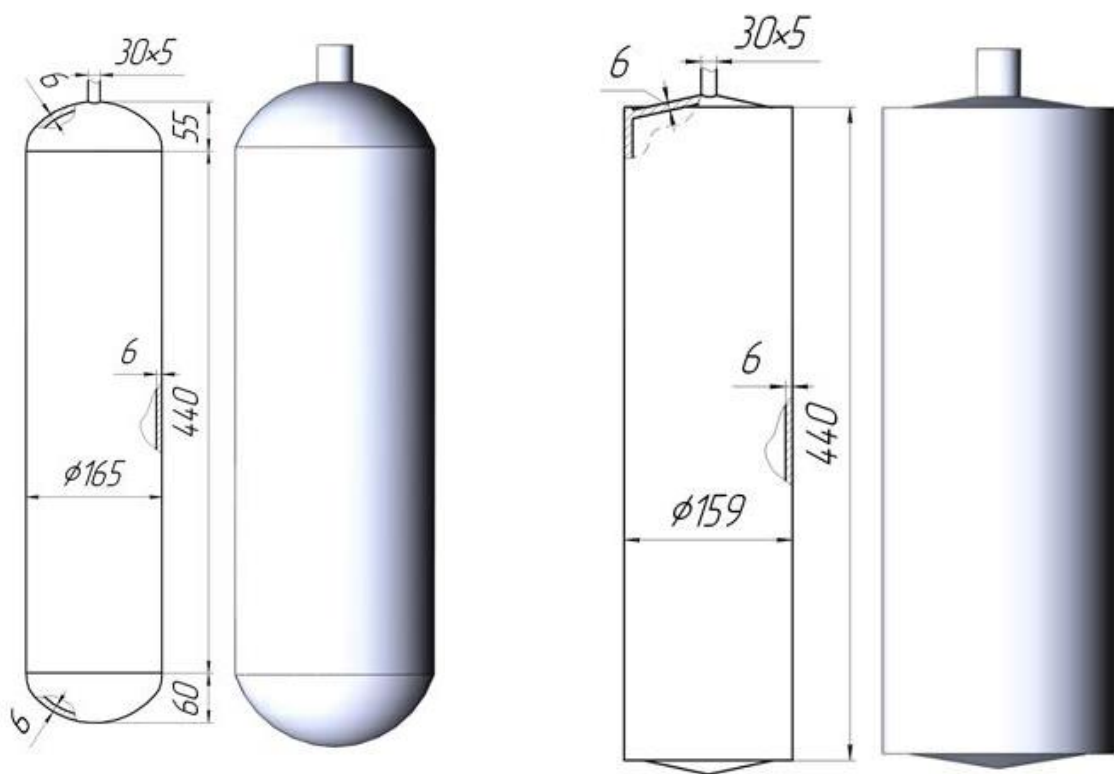


Рисунок 3.16 – Конструкції експериментальних моделей ППТ №1 (а) та №2 (б)

Таблиця 3.2 – Хімічний склад металу експериментальних зразків посудин за результатами хімічного аналізу

Зразок №1 (сталь 09Г2С)											
Хімічний склад за ГОСТ 5520-79	Хім. елемент	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As
	%	до 0.12	0.5-0.8	1.3-1.7	до 0.3	до 0.04	до 0.035	до 0.3	до 0.008	до 0.3	до 0.08
Хімічний склад за результатами хімічного аналізу	Хім. елемент	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As
	%	0.12	0.6	1.4	0.25	0,02	0,013	-	-	-	-
Зразок №2 (сталь 17Г1С)											
Хімічний склад за ГОСТ 5520-79	Хім. елемент	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As
	%	0.15-0.2	0.4-0.6	1.15-1.6	до 0.3	до 0.04	до 0.035	до 0.3	до 0.008	до 0.3	до 0.08
Хімічний склад за результатами хімічного аналізу	Хім. елемент	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As
	%	0.19	0.4	1.3	0.2	0,016	0,012	-	-	-	-

Механічні властивості та хімічний склад металу експериментальних зразків посудин регламентуються [135, 136] і наведені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Нормовані механічні властивості металу експериментальних зразків №1 та №2

Механічна властивість	Зразок №1	Посудина №2
Границя плинності, МПа	265-345	343-355
Границя міцності, МПа	430-490	490-630
Ударна в'язкість, кДж/м ²	590-640	390-440

Приварні елементи виконані ручним дуговим зварюванням і обстежені із застосуванням ультразвукового контролю з метою виявлення дефектів типу порушення суцільності. Результати контролю наведені у протоколах ультразвукового контролю (Додаток Г).

Конструктивні особливості експериментальних зразків №1 та №2 наведено в табл.3.4.

Таблиця 3.4 – Конструктивні особливості експериментальних зразків №1 та №2

Назва	Посудина №1	Посудина №2
Діаметр зовнішній, мм	165	159
Довжина корпусу, мм	440	680
Виконавча товщина корпусу, мм	6,0	6,0
Мінімальна товщина корпусу, мм	5,7	5,9
Тип днища	Еліптичне	Конічне
Виконавча товщина днищ, мм	6,0	6,0
Мінімальна товщина днищ, мм	5,9	5,8
Об'єм, м ³ (л)	0,0092 (9,2)	0,012 (12)
Робоче середовище	Газ, вода	Газ, вода

3.2.2 Вимірювання фізичних інформативних параметрів НДС металу експериментальних зразків посудин, навантажених внутрішнім тиском

Метою другого етапу експериментальних досліджень було вимірювання фізичних інформативних параметрів, що були попередньо встановлені в ході першого етапу експериментальних досліджень, на зразках посудин, у яких створювався надлишковий тиск для моделювання НС, а також для знаходження формули зв'язку між НС та обраними фізичними інформативними параметрами [121, 137].

Перед початком проведення випробувань дослідних зразків посудин було проведено теоретичний розрахунок максимально допустимого напруження у стінках посудин та максимально-допустимого внутрішнього тиску, що викликає ці напруження [107]. Для підвищення достовірності отриманих міцнісних розрахункових результатів також використовуємо метод розрахунку за вимірним значенням твердості металу [138, 139], метод скінченних елементів із застосуванням програмного пакету Solidworks 2014 SPO [140] та метод розрахунку, представлений у п. 2.2.

Допустимі напруження $[\sigma]$ металу стінок посудин для вуглецевих та низьколегованих сталей розраховуємо за границею плинності [107]:

$$[\sigma] = \eta \frac{R_e \text{ або } R_{p0,2}}{n_T}, \quad (3.2)$$

де, η – поправочний коефіцієнт допустимих напружень, рівний 1; R_e – мінімальне значення границі плинності при розрахунковій температурі, МПа (кгс/см²); $R_{p0,2}$ – мінімальне значення умовної границі плинності при розрахунковій температурі (напруження при якому відносне видовження складає 0,2%), МПа (кгс/см²); n_m – коефіцієнт запасу міцності за границею плинності.

Коефіцієнти запасу міцності повинні відповідати значенням, наведеним в таблиці 3.5 [107].

Таблиця 3.5 – Коефіцієнти запасу міцності

Умови навантаження	Коефіцієнт запасу міцності			
	n_m	n_e	n_d	n_n
При експлуатації	1,5	2,4	1,5	1,0
При випробуваннях:				
– гідравлічних	1,1	-	-	-
– пневматичних	1,2	-	-	-
При монтажі	1,1	-	-	-

Для визначення верхньої межі тиску $[p]$, при якому напруження у стінках посудини досягнуть заданих значень, використовуємо формулу [107]

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_p(S-c)}{D+(S-c)}, \quad (3.3)$$

де $[\sigma]$ – допустимі напруження, МПа (кгс/см²); φ_p – розрахунковий коефіцієнт міцності зварних швів; S – виконавча товщина стінки посудини, мм; c – сума надбавок до розрахункової товщини стінки посудини, мм; D – внутрішній діаметр посудини або апарату, мм (см).

Вихідні дані для розрахунку допустимого напруження і верхньої межі тиску експериментальних зразків посудин №1 та №2 наведені у табл.3.6.

Таблиця 3.6 – Вихідні дані для розрахунку допустимого напруження експериментальних зразків посудин №1 та №2

№	Назва величини	Посудина №1	Посудина №2
1	η	1,0	1,0
2	$R_e, \text{МПа}$	300	280
3	n_m	1,1	1,1
4	φ	1,0	1,0
5	$S, \text{мм}$	6,0	6,0
6	$C, \text{мм}$	1,0	1,0
7	$D, \text{мм}$	153	147

Результати розрахунку допустимого напруження і верхньої межі тиску для експериментальних зразків посудин №1 та №2 за формулами (3.2) та (3.3) наведені у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Результати розрахунку допустимого напруження і верхньої межі тиску для експериментальних зразків посудин №1 та №2

№	Назва	Посудина №1	Посудина №2
1	$[\sigma], \text{МПа}$	273	255
2	$p, \text{МПа}$	17,27	16,77

Для посудин, які експлуатувалися тривалий термін, доцільно визначати границю плинності за виміряним значенням твердості [138, 139, 141] з метою перевірки факту зміни фізико-механічних властивостей.

Вимірювання твердості матеріалу експериментальних зразків №1 та №2 проводилося динамічним твердоміром ТДМ-2 [142] (рисунок 3.17) у 12 точках, рівномірно розташованих на тілі корпусу посудин.

Усереднені результати виміряних значень твердості металу стінок експериментальних посудин становили:

- Для зразка №1 – 145 НВ (1450 МПа);
- Для зразка №2 – 139 НВ (1390 МПа).

За формулами (3.2) – (3.4) розраховано величини допустимих напружень, розрахункового тиску, величину границі плинності для посудин №1 та №2. Отримані результати представлені у таблиці 3.8.



Рисунок 3.17 – Вимірювання твердості металу приладом ТДМ-2

Величину границі плинності розраховано за формулою [138, 139]

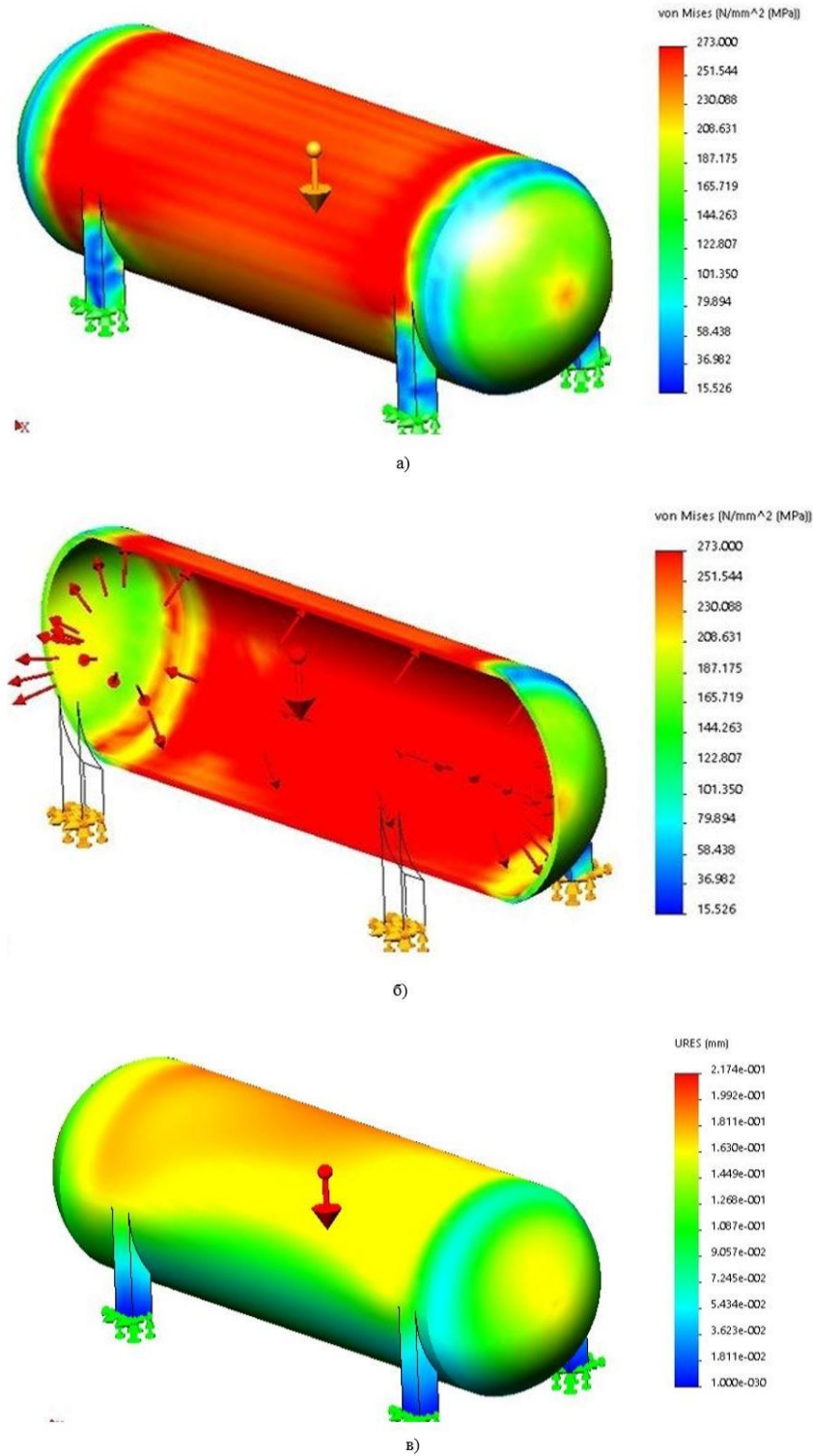
$$R_{p0,2} = 0,2 \cdot HB. \quad (3.4)$$

Таблиця 3.8 – Результати розрахунку допустимого напруження та розрахункового тиску для експериментальних зразків посудин №1 та №2

№	Назва	Посудина №1	Посудина №2
1	$R_{p0,2}$	290	278
2	$[\sigma]$, МПа	264	253
3	p , МПа	16,7	16,64

Розрахунок та моделювання розподілу напружень від внутрішнього тиску методом скінченних елементів проведено за допомогою програмного продукту

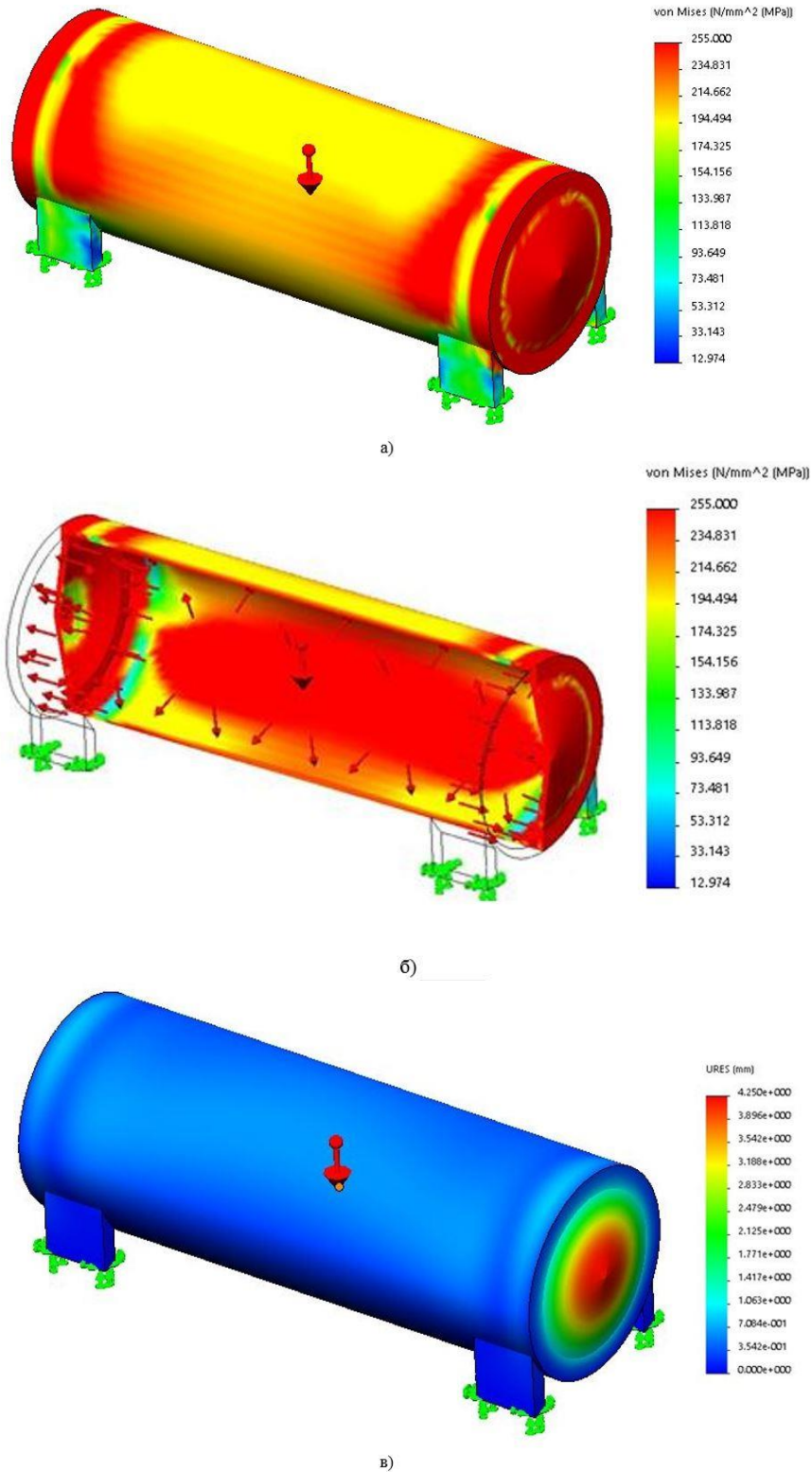
Solidworks 2014 SPO. Графічні зображення напружень для експериментальної посудини №1 наведені на рис 3.18.



а), б) – епюри напруження та деформації, в) – епюра переміщення

Рисунок 3.18 – Графічні епюри допустимих напружень для посудини №1

Графічні зображення напружень для експериментальної посудини №2 наведені на рис 3.19.



а), б) – епюри напруження та деформації, в) – епюра переміщення

Рисунок 3.19 – Графічні епюри допустимих напружень для посудини №2

Також експериментальні зразки ППТ було розраховано за методикою поданою у п. 2.2. Результати розрахунку наведені на рисунок 3.20.

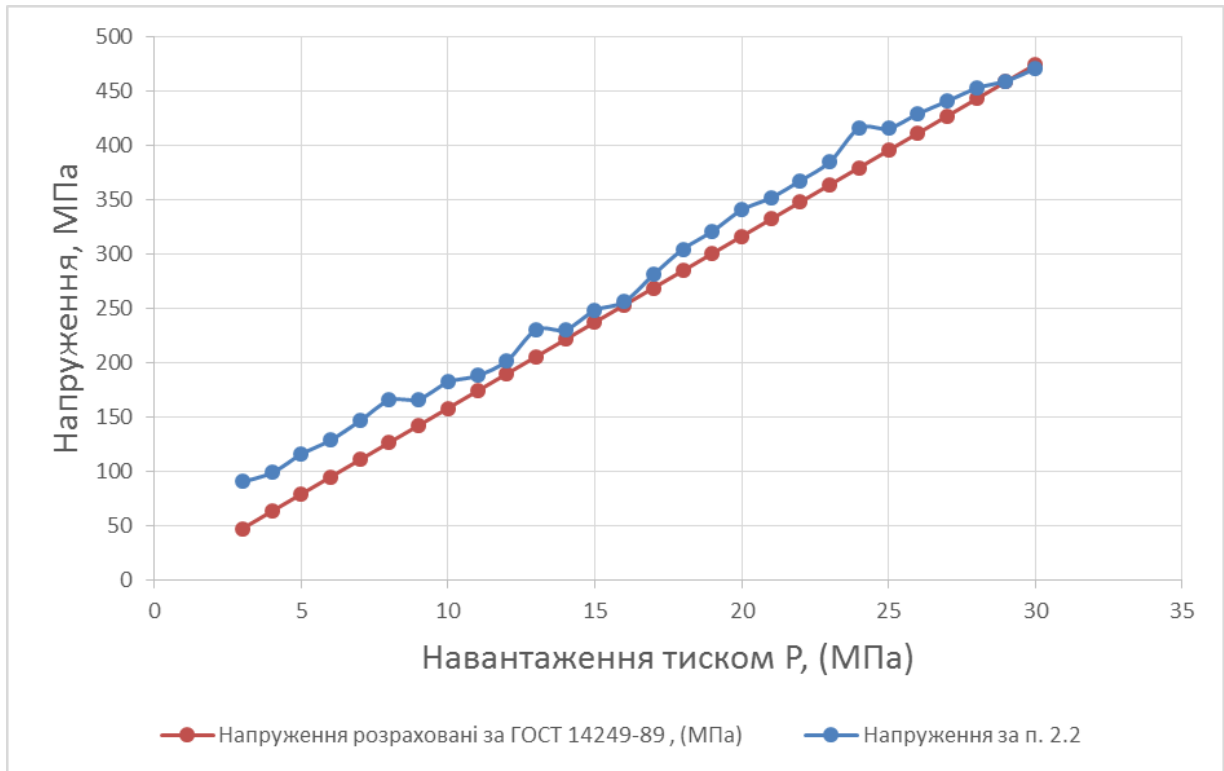


Рисунок 3.20 – Залежність розрахункових значень напружень від навантаження тиском

Наступним етапом роботи було проведення експериментальних досліджень щодо поведінки попередньо обраних фізичних інформативних параметрів в процесі зміни тиску та напружень у стінках посудин. Для забезпечення правильності постановки та достовірності результатів експерименту розроблена методика експериментальних досліджень, яка передбачає виконання наступних етапів:

- розроблення схеми вимірювання з ділянками вимірювання інформативних параметрів на експериментальних зразках посудин;
- підбір та налаштування засобів вимірювання інформативних параметрів;
- підготовка експериментальних зразків посудин до проведення вимірювання (очистка зразка від бруду, залишків захисних протикорозійних

покриттів, розмітка визначених ділянок та зон вимірювання, зачистка місць контролю);

– проведення вимірювань фізичних інформативних параметрів зі зміною навантаження тиском;

– опрацювання результатів вимірювання інформативних параметрів.

Корпус посудин №1 та №2 було розділено на три зони для вимірювань (рисунок 3.21).

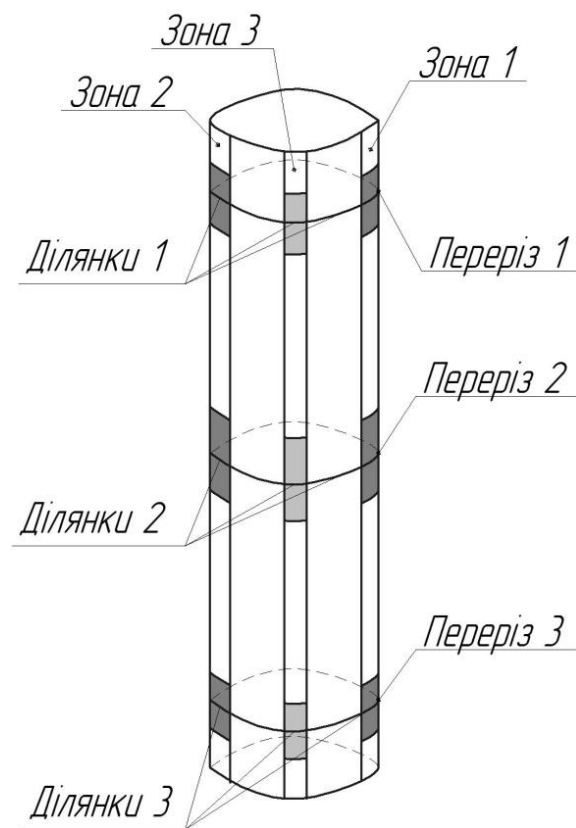


Рисунок 3.21 – Схема розташування ділянок вимірювання фізичних інформативних параметрів

Зона 1 та зона 2 розташовані паралельно осі посудини та діаметрально протилежно одна одній. Зона 3 зміщена на 90° від зони 1 за годинниковою стрілкою і розташована між зонами 1 та 2. Кожна із зон ділиться на три ділянки контролю у трьох однакових перерізах корпусу посудини: дві ділянки по краях і одна ділянка по центру корпусу посудини.

Вимірювання фізичних інформативних параметрів на зразках посудин проводилися при зміні навантаження збільшенням/зменшенням тиском рідини (води). Поступове збільшення тиску дало змогу визначити наявність та характер зміни обраних інформативних параметрів від росту напруження у стінці корпусу посудин.

Алгоритми та цикли випробувань експериментальних посудин №1 та №2 наведені у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Алгоритм циклів випробування посудин

№ циклу	Тиск, 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

Забезпечення плавного збільшення надлишкового тиску у дослідних посудинах із заданим кроком та чітка фіксація його значення здійснювалась ручною насосною установкою (ГН-500, зав. №72) та запірною арматурою. Значення тиску у посудині контролювалося манометром типу МПЗ-У. Загальний вигляд обладнання для навантаження експериментальних посудин тиском наведений на рисунку 3.22.

На фіксованих значеннях внутрішнього надлишкового тиску посудин проводилися вимірювання фізичних інформативних параметрів:

– коерцитивної сили H_c на всіх трьох ділянках. При цьому приставний електромагніт по чергово розташовувався вздовж осі посудини у протилежних

напрямках, а також перпендикулярно осі з метою урахування анізотропії фізико-механічних характеристик металу стінки від напрямку прокатування (рис.3.23);



Рисунок 3.22 – Загальний вигляд обладнання для забезпечення зміни тиску всередині зразків посудин

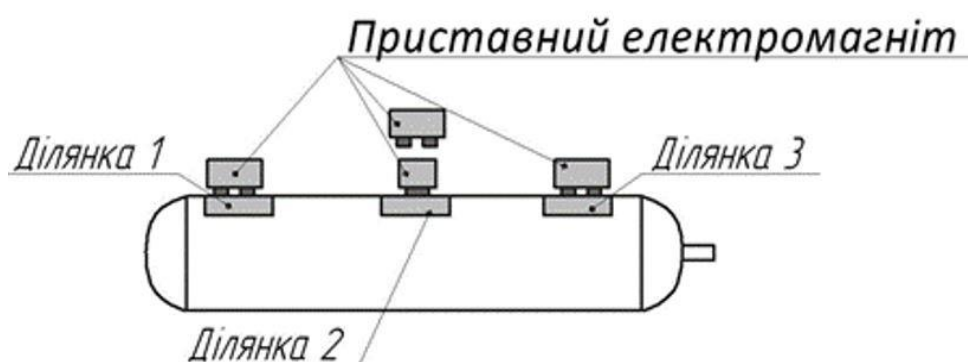


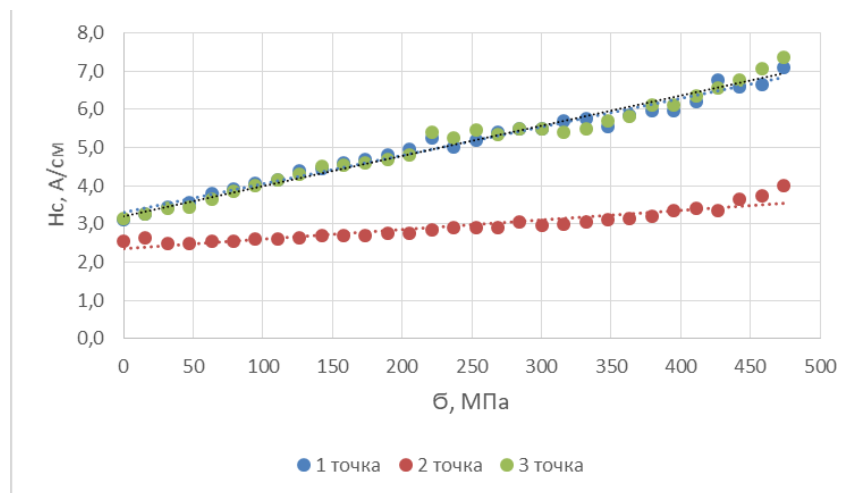
Рисунок 3.23 – Схема вимірювання коерцитивної сили

- твердості НВ металу стінки на встановлених ділянках вимірювання;
- магнітного параметру I_2 металу стінки на встановлених ділянках вимірювання;

– питомого електричного опору ρ на трьох ділянках зони №3.

Геометричні розміри корпусу експериментальної посудини, які змінювалися внаслідок деформації від дії надлишкового тиску, фіксувалися замірами кронциркулем на кожному встановленому перерізі корпусу посудин.

Результати вимірювань фізичних інформативних параметрів в залежності від зміни напруження, спричиненого випробувальним внутрішнім тиском, представлені для зразка №1 на рис. 3.24-3.27.

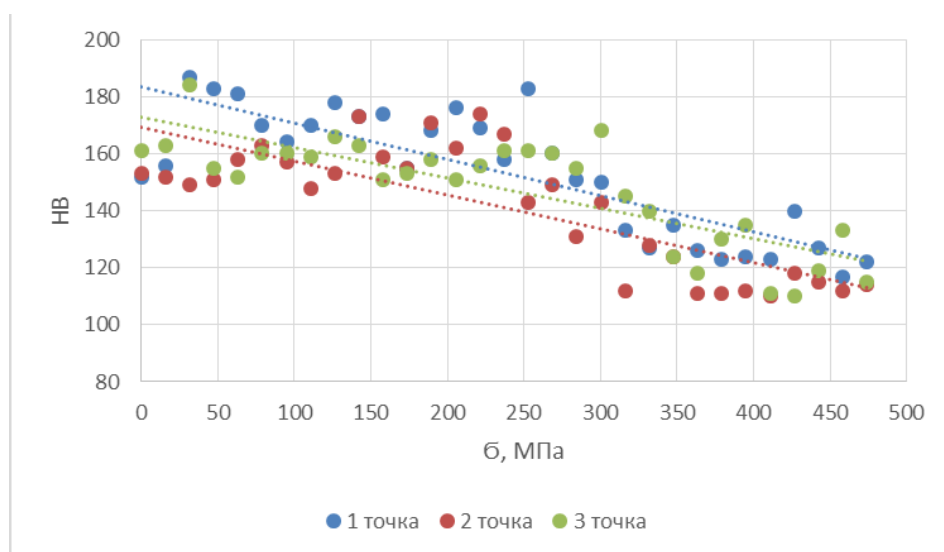


Функція лінії тренду для зразка №1 (Ділянка 1): $H_c = 0,075 \sigma + 3,2997$

Функція лінії тренду для зразка №1 (Ділянка 2): $H_c = 0,0025 \sigma + 2,3497$

Функція лінії тренду для зразка №1 (Ділянка 3): $H_c = 0,0079 \sigma + 3,2134$

Рисунок 3.24 – Залежність між коерцитивною силою та напруженням

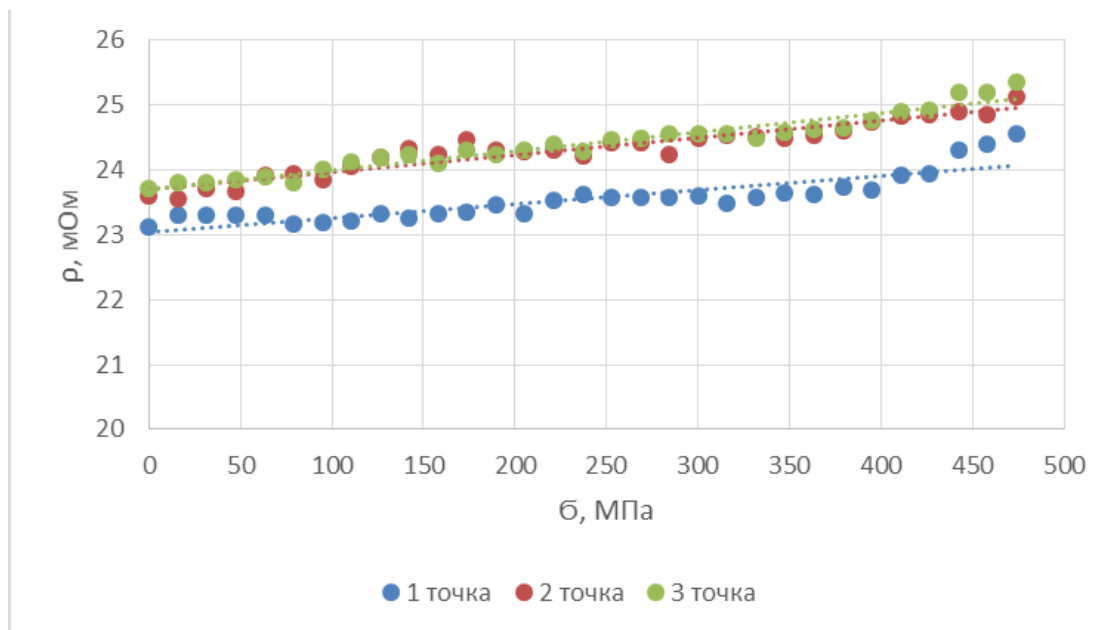


Функція лінії тренду для зразка №1 (Ділянка 1): $HB = -0,1271 \sigma + 183,52$

Функція лінії тренду для зразка №1 (Ділянка 2): $HB = -0,1067 \sigma + 172,94$

Функція лінії тренду для зразка №1 (Ділянка 3): $HB = -0,119 \sigma + 169,44$

Рисунок 3.25 – Залежність між твердістю та напруженням

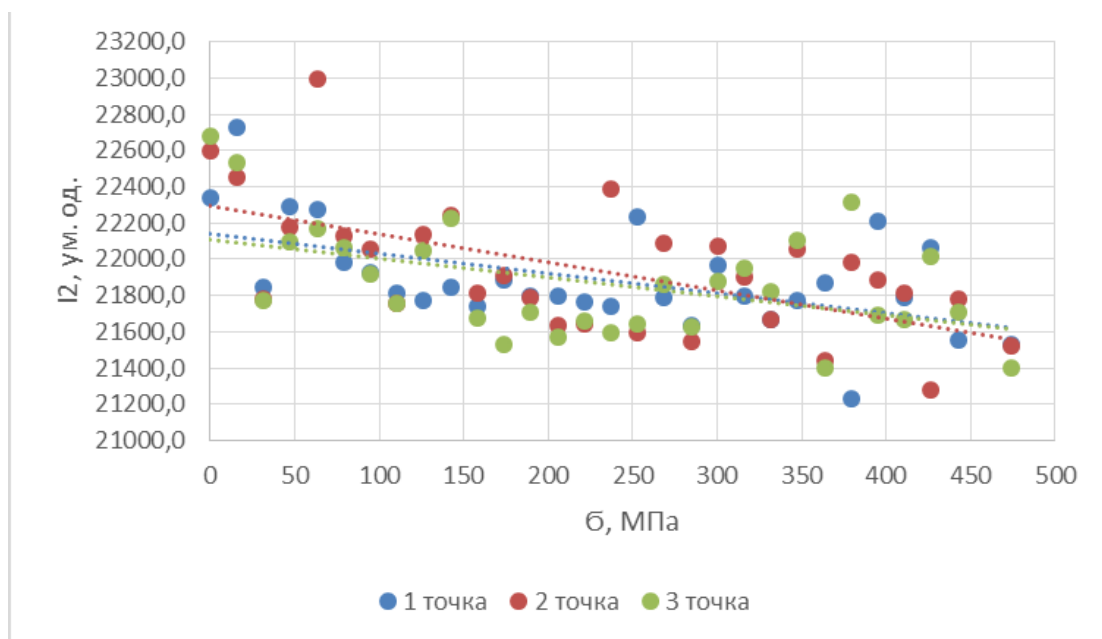


Функція лінії тренду для зразка №1 (Ділянка 1): $\rho = 0,0022 \sigma + 23,049$

Функція лінії тренду для зразка №1 (Ділянка 2): $\rho = 0,0027 \sigma + 23,70$

Функція лінії тренду для зразка №1 (Ділянка 3): $\rho = 0,0029 \sigma + 23,711$

Рисунок 3.26 – Залежність між питомим електричним опором та напруженням



Функція лінії тренду для зразка №1 (Ділянка 1): $I_2 = -1,0974 \sigma + 22141$

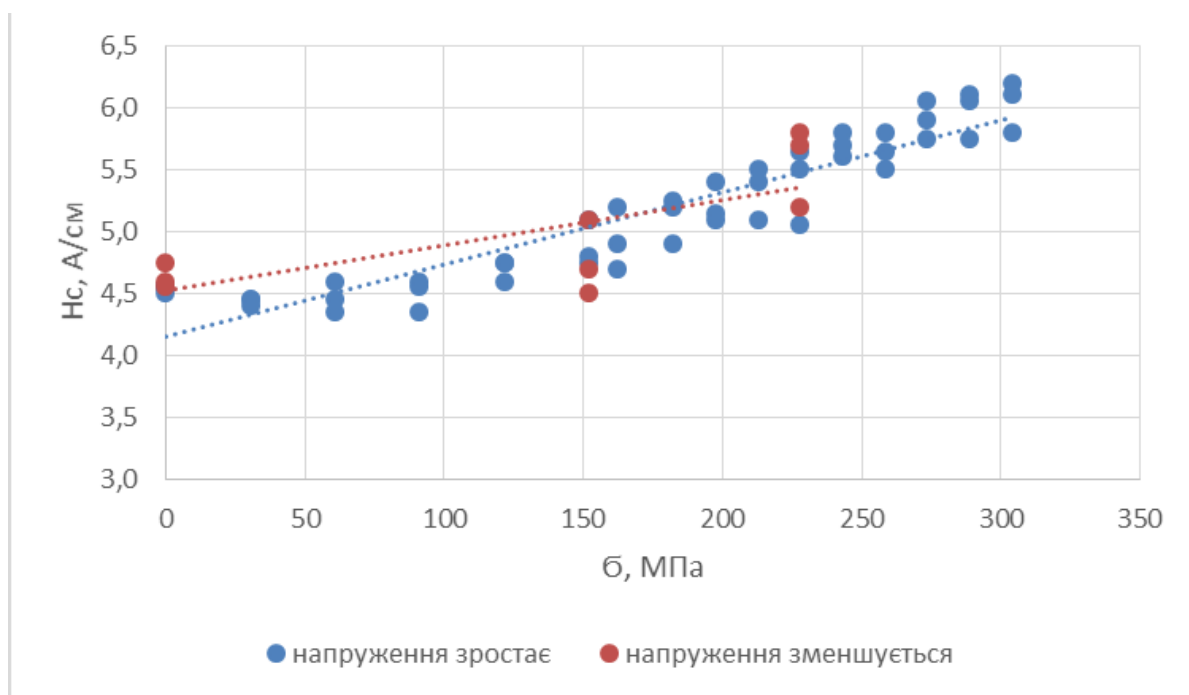
Функція лінії тренду для зразка №1 (Ділянка 2): $I_2 = -1,5424 \sigma + 22292$

Функція лінії тренду для зразка №1 (Ділянка 3): $I_2 = -1,0496 \sigma + 22111$

Рисунок 3.27 – Залежність між магнітним параметром та напруженням

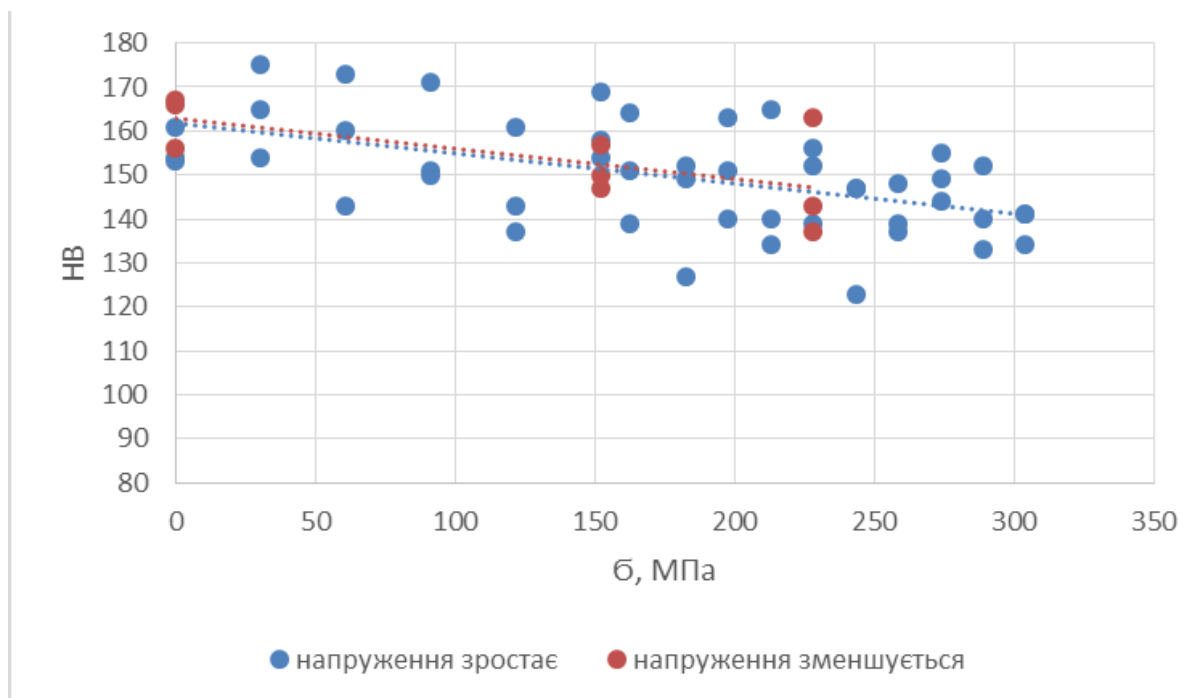
Відповідно результати вимірювань фізичних інформативних параметрів в залежності від зміни напруження, спричиненого випробувальним внутрішнім

тиском для зразка №2 представлені на рис. 3.28-3.31.



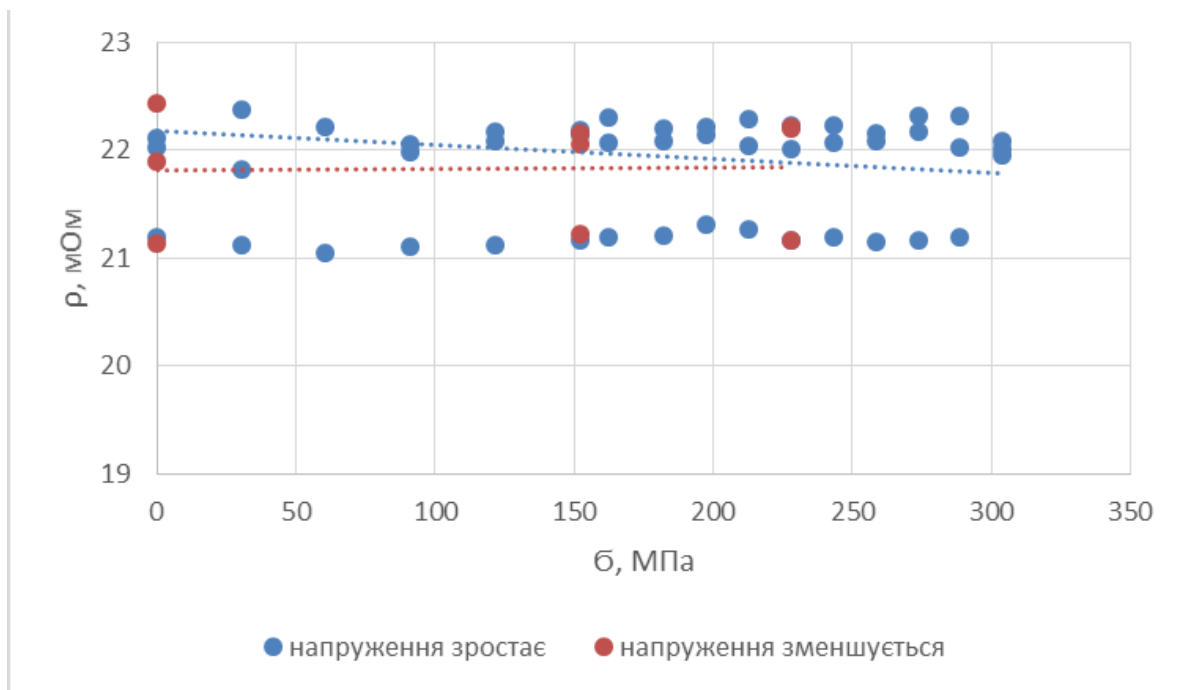
Функція лінії тренду для зразка №2(Ділянка 1-3): $H_c = 0,0058 \sigma + 4,1563$

Рисунок 3.28 – Залежність між коерцитивною силою та напруженням



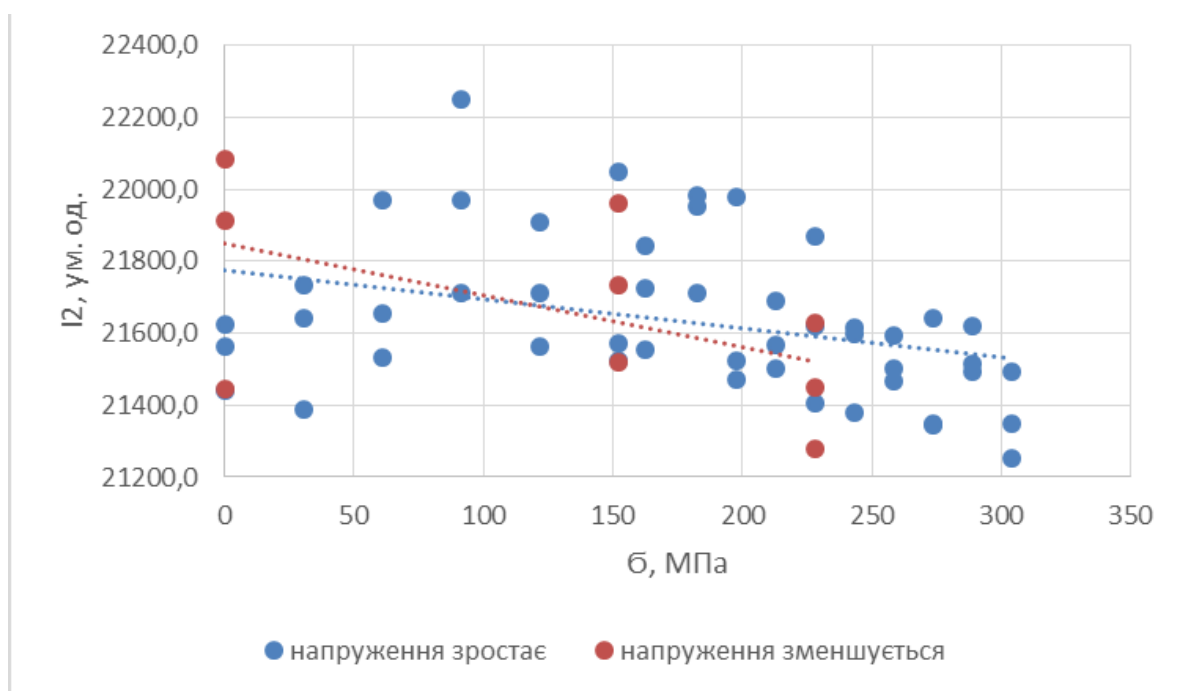
Функція лінії тренду для зразка №2(Ділянка 1-3): $H_V = -0,069 \sigma + 161,78$

Рисунок 3.29 – Залежність між твердістю та напруженням



Функція лінії тренду для зразка №2 (Ділянка 1-3): $\rho = -0,0013 \sigma + 22,183$

Рисунок 3.30 – Залежність між питомим електричним опором та напруженням



Функція лінії тренду для зразка №2(Ділянка 1-3): $I_2 = -0,7919 \sigma + 21,773$

Рисунок 3.31 – Залежність між магнітним параметром та напруженням

Результати кореляційного аналізу залежностей фізичних інформативних параметрів від зміни напруження наведено в табл.3.10.

Таблиця 3.10 – Результати кореляційного аналізу

№ зразка	Фізична величина			
	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

Графічний та кореляційний аналіз отриманих результатів вимірювань фізичних інформативних параметрів показав наявність тісної залежності зміни коерцитивної сили і твердості та менш виражену залежність питомого електричного опору і магнітного параметру від зміни напруження у металі стінки посудини. Таким чином, у подальшій роботі для визначення величини напружень було використано ці 4 вищевказані параметри в комплексі, оскільки характер зв'язків між досліджуваними параметрами носить нелінійний характер.

3.3 Отримання формул залежностей між комплексом фізичних параметрів металу та рівнем напружень посудин, що працюють під тиском

Кореляційний аналіз дав можливість встановити тільки наявність чи відсутність залежності між обраними фізичними інформативними параметрами (твердість, коерцитивна сила, питомий електричний опір та магнітний параметр) та величиною радіальних напружень, а не оцінити її характер, тому метою подальших досліджень було встановлення, власне, характеру зв'язку між ними. Для вирішення цього завдання було використано алгоритми штучних нейронних мереж [144].

Метою використання алгоритмів штучних нейронних мереж є одночасне врахування кількох експериментально-одержаних параметрів, що дає можливість оцінити напружений стан ППТ комплексним способом, а також встановити між фізичними інформативними параметрами та напруженнями

аналітичний зв'язок. Додатковим завданням досліджень слугувало встановлення оптимального набору інформативних параметрів для найбільш точного визначення напружень за мінімальної кількості самих параметрів.

Робота із нейронними мережами передбачає наступні етапи: підготовка даних, формування та тренування нейронної мережі, тестування та перевірка на інших невідомих даних.

Перший етап містить у собі підготовку даних для подальшої роботи в нейронній мережі, тобто включає процеси опрацювання та набору даних з одержаних експериментальних результатів. Окрім того, виконується нормування даних з метою зведення їх до діапазону значень [4].

Другий етап роботи з нейронною мережею полягає у формуванні і тренуванні навчальних пар. У даному випадку були сформовані навчальні пари з трьох (H_b_1 , H_c_1 , ρ_1) та чотирьох (H_b_1 , H_c_1 , ρ_1 , $I2_1$) інформативних параметрів із відповідними розрахунковими значеннями напружень (σ_p) (таблиця 3.11). Виміряні значення, які формують навчальні пари для тренування, бралися із першої зони (1-го перерізу) експериментальної посудини №1.

Таблиця 3.11 – Результати вимірювань, які формують навчальні пари для тренування з 3-ох і 4-ох параметрів

№ Циклу	H_b_1	H_c_1	ρ_1	$I2_1$	σ_p	№ циклу	H_b_1	H_c_1	ρ_1	$I2_1$	σ_p
1	152	3,1000	22,1200	2,2341	0	17	183	5,2000	22,5800	2,1791	252,8000
2	156	3,2500	22,3100	2,2729	15,8000	18	160	5,4000	22,5900	2,1638	268,6000
3	187	3,4500	22,3000	2,1843	31,6000	19	151	5,5000	22,3700	2,1971	284,4000
4	183	3,5500	22,4800	2,2293	47,4000	20	150	5,5000	22,0900	2,1795	300,2000
5	181	3,8000	22,3000	2,2271	63,2000	21	133	5,7000	22,4800	2,1671	316,0000
6	170	3,9000	22,5000	2,1979	79,0000	22	127	5,7500	22,5800	2,1777	331,8000
7	164	4,0500	22,0300	2,1925	94,8000	23	135	5,5500	22,7800	2,1873	347,6000
8	170	4,1500	22,2200	2,1813	110,6000	24	126	5,8500	22,6000	2,1232	363,4000
9	178	4,4000	22,7100	2,1774	126,4000	25	123	5,9500	22,7300	2,2213	379,2000
10	173	4,4500	22,4600	2,1847	142,2000	26	124	5,9500	22,6000	2,1790	395,0000
11	174	4,6000	22,4600	2,1743	158,0000	27	123	6,2000	22,9300	2,2068	410,8000
12	155	4,7000	22,6200	2,1882	173,8000	28	140	6,7500	22,9400	2,1558	426,6000
13	168	4,8000	22,4700	2,1796	189,6000	29	127	6,6000	23,3200	2,1540	442,4000
14	176	4,9500	22,3400	2,1765	205,4000	30	117	6,6500	23,4200	2,1530	458,2000
15	169	5,2500	22,5400	2,1741	221,2000	31	122	7,100	23,5700		474,0000
16	158	5,000	22,6200	2,2234	237,0000						

Наведені вище значення були зведені до діапазону від 0 до 1 шляхом зведення їх до максимально спостережних значень по кожному вимірюваному параметру.

Наступним кроком було створено неймережу для типових задач та архітектур відповідно для трьох і чотирьох параметрів. Навчання проводилось за стандартною процедурою у середовищі програми Matlab Neural Network Toolbox. У прихованих шарах міститься функція перетворення \tanh , а у вихідному нейроні відображений $\log\text{sig}$ [144] (рисунок 3.32).

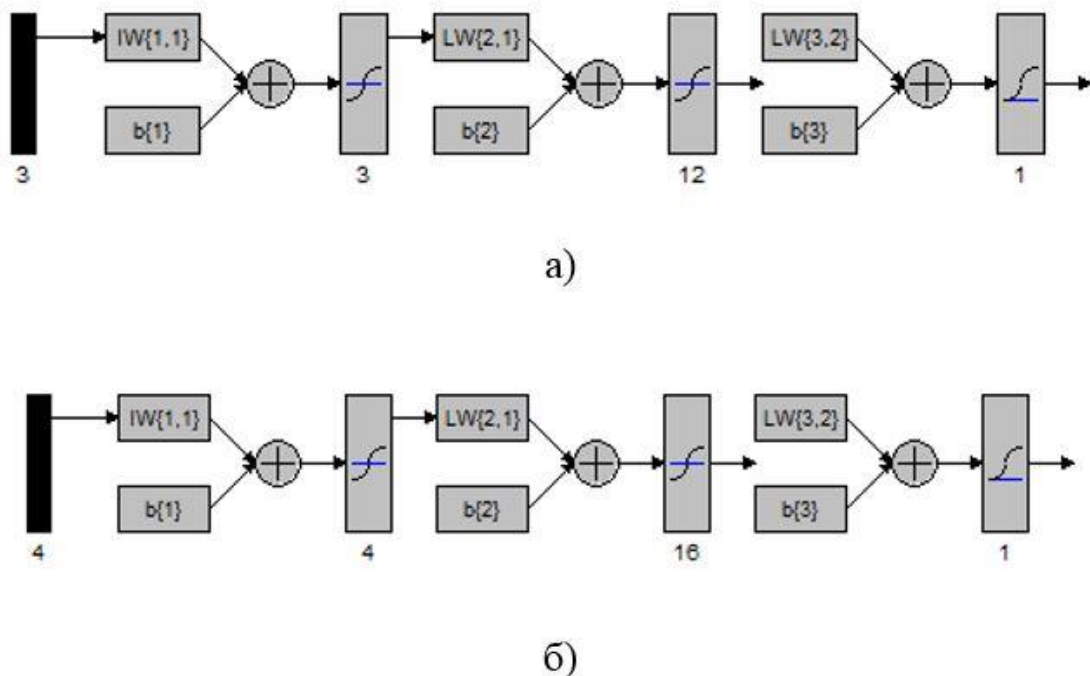


Рисунок 3.32 – Архітектура неймережі для визначення напружень:
а) за трьома параметрами; б) за чотирма параметрами

Після стандартного процесу навчання на навчальних парах, сформованих із даних першої зони (1-го перерізу) експериментального зразка №1, наступним етапом є тестування натренованих неймереж. Дані для тестування, а саме тестові пари для трьох (H_b_3 , H_c_3 , ρ_3) і чотирьох (H_b_3 , H_c_3 , ρ_3 , $I2_3$) інформативних параметрів бралися з третьої зони (3-го перерізу)

експериментальної посудини №1 (таблиця 3.12). Вони не використовувалися під час процесу тренування і є невідомими для нейромережі.

Таблиця 3.12 – Результати вимірювань, які формують тестові пари для тестування з 3-ох та 4-ох параметрів

№ цикл у	Hb_3	Hc_3	p_3	I2_3	σ_p	№ циклу	Hb_3	Hc_3	p_3	I2_3	σ_p
1	161	3,2000	23,9200	2,2683	0	17	161	5,4500	24,4800	2,1646	252,8000
2	163	3,2500	24,1600	2,2537	15,8000	18	160	5,3500	24,2800	2,1861	268,6000
3	184	3,4000	23,6000	2,1772	31,6000	19	155	5,5000	24,5600	2,1631	284,4000
4	155	3,4500	23,8600	2,2099	47,4000	20	168	5,5000	24,5700	2,1875	300,2000
5	152	3,6500	23,9100	2,2168	63,2000	21	145	5,4000	24,4500	2,1954	316,0000
6	160	3,8500	23,0400	2,2060	79,0000	22	140	5,5000	24,4800	2,1820	331,8000
7	160	4,0000	24,1900	2,1920	94,8000	23	124	5,7000	24,5900	2,2103	347,6000
8	159	4,1500	24,1300	2,1757	110,6000	24	118	5,8000	24,3500	2,1397	363,4000
9	166	4,3000	24,0200	2,2045	126,4000	25	130	6,1000	24,5100	2,2317	379,2000
10	163	4,5000	24,0300	2,2223	142,2000	26	135	6,1000	25,1100	2,1695	395,0000
11	151	4,5500	23,9400	2,1677	158,0000	27	111	6,3500	25,2900	2,1665	410,8000
12	153	4,6000	23,8900	2,1526	173,8000	28	110	6,5500	25,3900	2,2017	426,6000
13	158	4,7000	23,2600	2,1710	189,6000	29	119	6,7500	25,5800	2,1704	442,4000
14	151	4,8000	24,0800	2,1572	205,4000	30	133	7,0500	25,9200	2,1660	458,2000
15	156	5,4000	24,0800	2,1661	221,2000	31	115	7,3500	26,4100	2,1404	474,0000
16	161	5,2500	21,7500	2,1593	237,0000						

Після тестування одержано табличні та графічні результати тестового напруження (σ_T) для 3-ох та 4-ох інформативних параметрів (таблиця 3.13, рисунок 3.33).

Таблиця 3.13 – Результати тестового напруження для 3-х та 4-ох параметрів

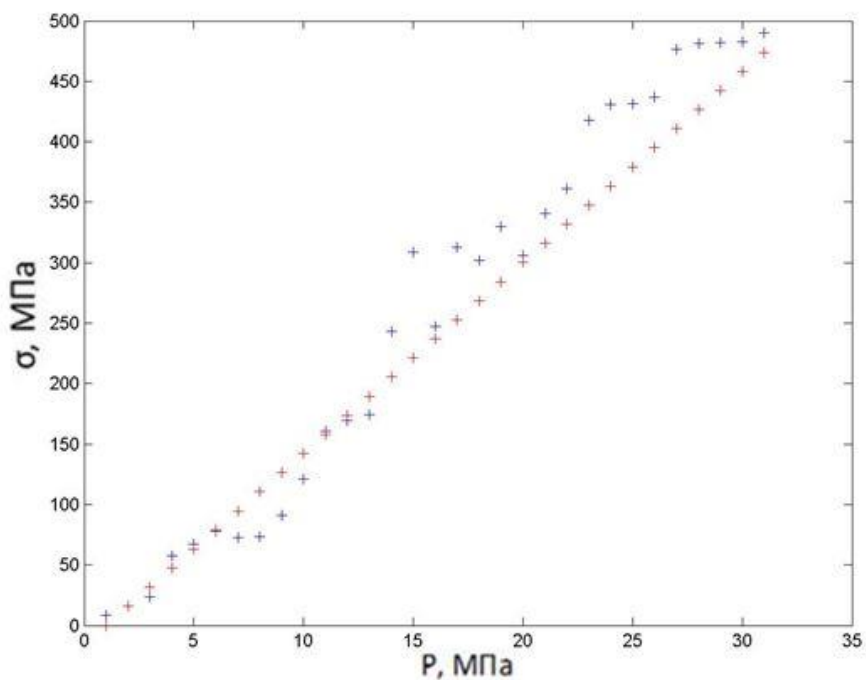
Для 3-ох параметрів								
№ циклу	σ_p	σ_T	№ циклу	σ_p	σ_T	№ циклу	σ_p	σ_T
1	0	8,6681	12	173,8000	169,6637	23	347,6000	418,1062
2	15,8000	15,9820	13	189,6000	174,3125	24	363,4000	430,6116
3	31,6000	23,7849	14	205,4000	242,8877	25	379,2000	431,5938
4	47,4000	57,9770	15	221,2000	308,5387	26	395,0000	436,9876
5	63,2000	67,4354	16	237,0000	247,1077	27	410,8000	476,6633
6	79,0000	78,0489	17	252,8000	312,6606	28	426,6000	481,4177

Продовження таблиці 3.12

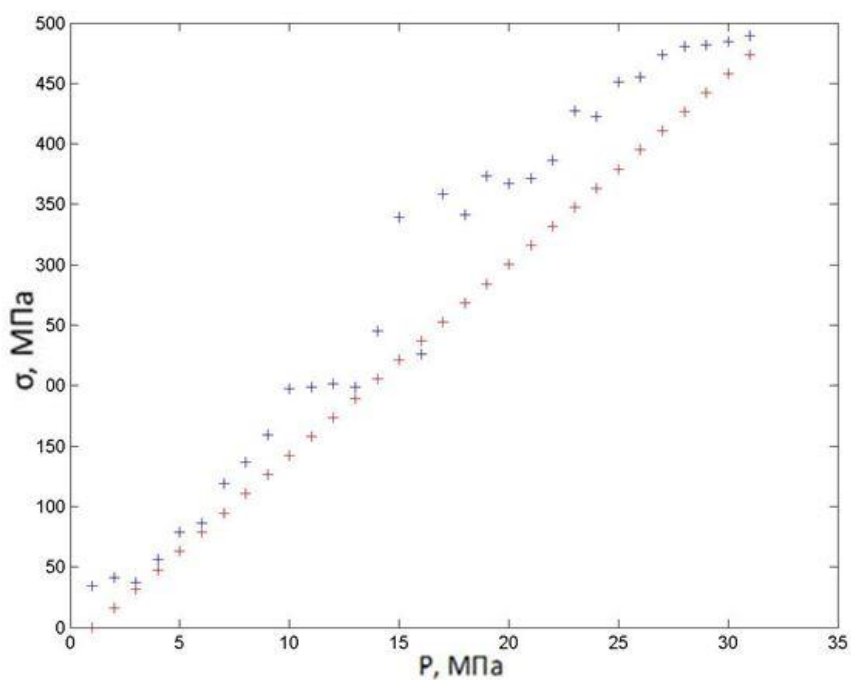
7	94,8000	72,9595	18	268,6000	302,0068	29	442,4000	481,7637
8	110,6000	73,4069	19	284,4000	330,0168	30	458,2000	482,5426
9	126,4000	90,9740	20	300,2000	305,8433	31	474,0000	490,4028
10	142,2000	121,0522	21	316,0000	340,8225			
11	158,0000	160,5068	22	331,8000	360,9450			
Для 4-ох параметрів								
№ циклу	σ_p	σ_T	№ циклу	σ_p	σ_T	№ циклу	σ_p	σ_T
1	0	34,3113	12	173,8000	201,2956	23	347,6000	427,2056
2	15,8000	41,1171	13	189,6000	198,7092	24	363,4000	422,7019
3	31,6000	37,2444	14	205,4000	244,8952	25	379,2000	450,9717
4	47,4000	56,2453	15	221,2000	339,4137	26	395,0000	455,1968
5	63,2000	78,8201	16	237,0000	225,8009	27	410,8000	473,9439
6	79,0000	86,1075	17	252,8000	358,5463	28	426,6000	480,2470
7	94,8000	118,7270	18	268,6000	341,7251	29	442,4000	481,7797
8	110,6000	136,4392	19	284,4000	373,4156	30	458,2000	484,3236
9	126,4000	159,3184	20	300,2000	367,3988	31	474,0000	489,5550
10	142,2000	197,6886	21	316,0000	371,1362			
11	158,0000	198,6906	22	331,8000	386,6234			

Зображені на рисунку 3.33 результати свідчать про високу точність і повторюваність результатів розрахунку напружень у стінці змодельованих ППТ по всьому діапазону значень. Це підтверджується кількісними оцінками під час визначення тестового значення напруження σ_T за допомогою трьох інформативних параметрів, де абсолютна похибка становить 30,20 МПа, а відносна похибка складає 6,04%. Для чотирьох інформативних параметрів середня абсолютна похибка становить 44,99 МПа, відносна похибка складає 9,01%. Це може свідчити про надмірну стохастичність даних – більша кількість інформативних параметрів, а також інформація, яку вони несуть, є надмірними для апроксимації напруження в стінці посудини як функції інформативних

параметрів. Що, власне, і було підтверджено результатами експериментальних та кореляційних досліджень.



а)



б)

Рисунок 3.33 – Результати тестового напруження σ_t (сині – тестові значення) порівняно до розрахункового напруження σ_p (червоні – розраховані значення) залежно від тиску випробування P : а) для 3-ох та б) для 4-ох параметрів

Четвертим та останнім етапом є перевірка (верифікація) роботи нейромережі на інших невідомих даних. Для перевірки нейромережі були використані дані, одержані експериментальним шляхом із дослідного зразка ППТ №2. Для початку перевірки нейромережі були сформовані тестові пари з 3-ох (H_{b_1-3} , H_{c_1-3} , ρ_{1-3}) та 4-ох (H_{b_1-3} , H_{c_1-3} , ρ_{1-3} , I_{2_1-3}) параметрів (таблиця 3.14). Дані взято з 3-ох зон (3-ох перерізів) експериментальної посудини.

Таблиця 3.14 – Тестові набори даних з 3-ох і 4-ох параметрів для перевірки нейромережі

№	H_{b_1-3}	H_{c_1-3}	ρ_{1-3}	I_{2_1-3}	σ_p
1	161	4,6000	21,1900	2,1625	0
2	165	4,4000	22,3800	2,1389	30,4000
	175	4,5000	21,8200	2,1641	30,4000
	154	4,5000	21,1200	2,1735	30,4000
3	160	4,5000	28,2000	2,1533	60,8000
	143	4,6000	22,2100	2,1657	60,8000
	173	4,4000	21,0500	2,1970	60,8000
4	150	4,6000	22,0500	2,1711	91,2000
	151	4,6000	21,9800	2,1970	91,2000
	171	4,4000	21,1000	2,2251	91,2000
5	143	4,8000	22,0800	2,1562	121,6000
	161	4,8000	22,1700	2,1910	121,6000
	137	4,6000	21,1200	2,1713	121,6000
6	158	4,8000	22,1400	2,2048	152,0000
	154	5,1000	22,1900	2,1522	152,0000
	169	4,8000	21,1600	2,1571	152,0000
7	151	4,9000	22,0700	2,1727	162,2000
	139	5,2000	22,3000	2,1555	162,2000
	164	4,7000	21,2000	2,1845	162,2000
8	149	5,2000	22,2000	2,1709	182,4000
	127	5,3000	22,0800	2,1983	182,4000
	152	4,9000	21,2100	2,1952	182,4000
9	151	5,1000	22,1400	2,1473	197,6000
	140	5,4000	22,2100	2,1525	197,6000
	163	5,2000	21,3100	2,1979	197,6000
10	134	5,4000	22,2900	2,1689	212,8000
	140	5,5000	22,0400	2,1500	212,8000
	165	5,1000	21,2600	2,1569	212,8000
11	156	5,5000	22,2300	2,1405	228,0000
	139	5,7000	22,0100	2,1871	228,0000
	152	5,1000	21,1700	2,1621	228,0000

Продовження таблиці 3.14

12	147	5,6000	22,2300	2,1381	243,2000
	123	5,8000	22,0700	2,1617	243,2000
	147	5,7000	21,1900	2,1597	243,2000
13	139	5,8000	22,1500	2,1594	258,4000
	148	5,7000	22,0800	2,1469	258,4000
	137	5,5000	21,1500	2,1500	258,4000
14	149	5,9000	22,3100	2,1350	273,6000
	144	6,1000	22,1700	2,1641	273,6000
	155	5,8000	21,1700	2,1345	273,6000
15	140	6,1000	22,3200	2,1515	288,8000
	133	6,1000	22,0300	2,1492	288,8000
	152	5,8000	21,1900	2,1619	288,8000
16	141	6,2000	22,0900	2,1349	304,0000
	134	6,1000	22,0100	2,1251	304,0000
	141	5,8000	21,9500	2,1495	304,0000
17	143	5,8000	22,2200	2,1280	228,0000
	137	5,7000	22,2000	2,1448	228,0000
	163	5,2000	21,1600	2,1628	228,0000
18	147	5,1000	22,1600	2,1517	152,0000
	150	4,5000	22,0600	2,1734	152,0000
	157	4,7000	21,2200	2,1962	152,0000

Після виконаної перевірки нейромережі з невідомими даними на відповідно сформованих тестових парах одержано табличні та графічні результати тестового значення напруження σ_T за відомого розрахункового значення σ_p (табл.3.15, рис.3.34).

Таблиця 3.15 – Результати перевірки нейромережі з визначення тестового значення σ_T

Для 3-ох параметрів								
№	σ_p	σ_T	№	σ_p	σ_T	№	σ_p	σ_T
1	0	69,3000	8	182,4000	262,1210	14	273,6000	335,1848
2	30,4000	102,3000		182,4000	306,6386		15	273,6000
	30,4000	91,5000	9	182,4000	214,4560	288,8000		346,7486
3	30,4000	155,8828		197,6000	246,0279	288,8000	353,4465	
	60,8000	120,3000	10	197,6000	294,7686	16	288,8000	286,2801
60,8000	163,3251	197,6000		243,5542	304,0000		346,8254	
60,8000	134,3419	11	212,8000	306,4363	17	304,0000	350,8004	
4	91,2000		158,9454	212,8000		298,4546	304,0000	314,6647
	91,2000	159,5901	12	212,8000	236,8942	18	228,0000	317,0751
91,2000	135,9391	228,0000		278,5863	228,0000		319,9417	
5	121,6000	208,5419	13	228,0000	312,5776	19	228,0000	244,6296
	121,6000	191,9125		228,0000	236,9155		152,0000	253,0097

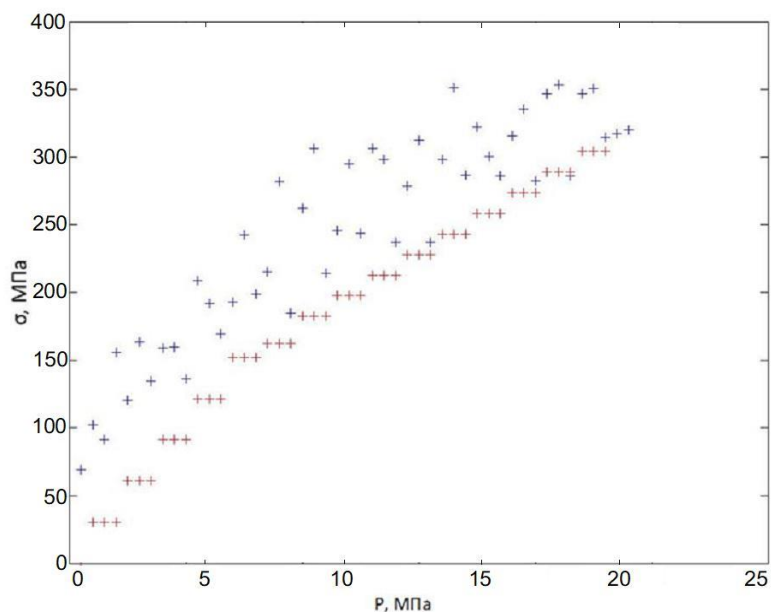
Продовження таблиці 3.15

	121,6000	169,2806		243,2000	298,2399		152,0000	140,9849
6	152,0000	192,7478	12	243,2000	351,0026		152,0000	185,8112
	152,0000	242,3489		243,2000	286,5624			
	152,0000	198,8227		258,4000	322,2179			
7	162,2000	215,1495	13	258,4000	300,3764			
	162,2000	281,6993		258,4000	286,3474			
	162,2000	184,8947	14	273,6000	315,8764			
Для 4-ох параметрів								
№	σ_p	σ_T	№	σ_p	σ_T	№	σ_p	σ_T
1	0	135,7311	8	182,4000	242,6554	14	273,6000	358,6738
2	30,4000	127,7975		182,4000	274,0480		273,6000	273,9361
	30,4000	130,7740	9	182,4000	179,7348	15	288,8000	365,1160
	30,4000	126,4653		197,6000	221,6337		288,8000	359,5746
3	60,8000	135,9000	10	197,6000	273,0342	16	288,8000	281,3675
	60,8000	141,7000		197,6000	213,4183		304,0000	363,8543
	60,8000	112,7810	11	212,8000	284,2955	17	304,0000	353,5924
4	91,2000	156,8378		212,8000	279,6074		228,0000	314,0882
	91,2000	159,0774	12	212,8000	193,4630	18	228,0000	318,5891
	91,2000	117,3461		228,0000	272,4875		228,0000	313,4228
5	121,6000	185,2174	13	228,0000	312,8174	19	228,0000	204,4554
	121,6000	184,7817		228,0000	197,8580		152,0000	225,5173
	121,6000	142,9037	14	243,2000	291,9623	20	152,0000	144,3275
6	152,0000	187,8217		243,2000	336,4444		152,0000	153,9594
	152,0000	222,2296	15	243,2000	272,2808			
	152,0000	155,3081		258,4000	325,4496			
7	162,2000	197,3875	16	258,4000	300,1749			
	162,2000	250,1193		258,4000	251,5114			
	162,2000	149,6889	14	273,6000	330,9292			

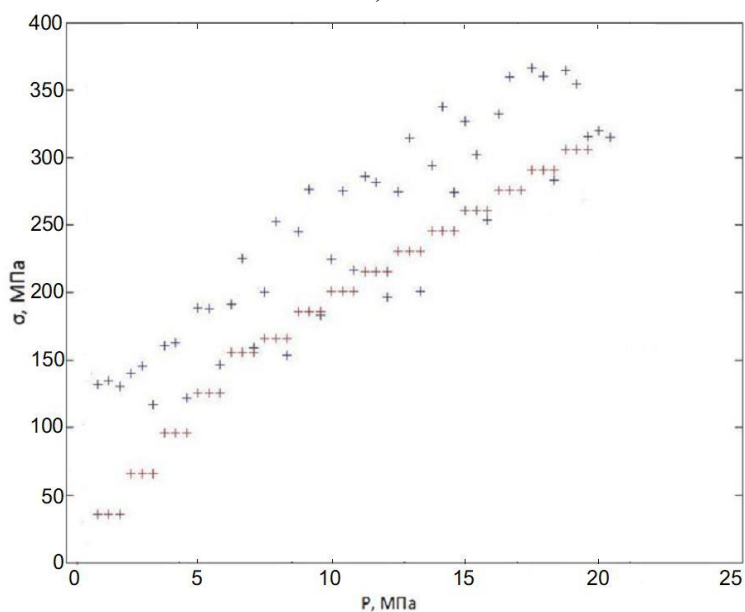
Під час перевірки нейромережі з визначення напруження σ_T за допомогою 3-ох параметрів середня абсолютна похибка становить 59,98 МПа, відносна похибка складає 12,0%. Для 4-ох інформативних параметрів середня абсолютна похибка становить 53,15 МПа, відносна похибка складає 10,6%. У цьому випадку спостерігається протилежна попереднім результатам ситуація, яка загалом узгоджується із теорією – чим більше інформативних параметрів, тим вища точність апроксимації.

Графічно представлені результати верифікації роботи нейромереж на невідомих для них зразках ППТ (рисунок 3.34) вказують на достатню чутливість до зміни значень інформативних параметрів в усьому діапазоні значень

напружень і реакцію на зниження напружень, відсутність суттєвої відмінності у точності вимірювань між трьома та чотирма інформативними параметрами.



а)



б)

Рисунок 3.34 – Результати перевірки нейромережі з визначення напруження σ_T (сині – значення, одержані за результатами роботи нейромереж) порівняно до розрахункового напруження σ_p (червоні – дійсні значення за результатами розрахунку) залежно від тиску випробування P :
а) для 3-ох параметрів, б) для 4-ох параметрів.

Використання штучних нейронних мереж дає можливість також одержати апроксимовану залежність в аналітичному вигляді – матричне рівняння з функціями перетворення та ваговими коефіцієнтами, що змінюються в процесі навчання нейронної мережі. Отже, формула для визначення величини радіального напруження за трьома параметрами (Нв, Нс, ρ) має вигляд:

$$\text{Sigma} = \frac{500}{1 + e^{-2 \left(\sum_{n=1}^{12} -LW\{2,3\} \cdot \left[\frac{2}{1 + e^{-2 \cdot \sum_{n=1}^{12} (IW\{1,1\} \cdot \left(\frac{HB}{200} \right) \cdot \left(\frac{HC}{8} \right) \cdot \left(\frac{RO}{27} \right) \right]^{1+b\{1\}}}} \right)^{1+b\{2\}}} \right)} + b\{3\}, \quad (3.5)$$

де Sigma – напруження, МПа; НВ – твердість за шкалою Брінеля; НС – коерцитивна сила, А/см; R₀ – питомий електричний опір, мкОм·м; IW{1,1} = [1.7431 -3.0389 -3.0193; 0.042401 -6.5667 1.2504; 3.8403 -1.8042 2.4633]; b{1} = [3.1597; 1.6562; 0.83545]; LW{2,1} = [-2.6414 2.439 -2.6484; -0.11555 -1.3002 -2.3494; -0.26707 -3.4977 -0.9879; -4.3283 -0.56173 -1.7194; 3.6251 3.3037 0.0079697; 3.0503 0.4122 -0.75152; 1.4864 -2.2745 2.2322; -0.58323 -0.99362 2.9626; -1.0301 2.231 -2.0604; -3.8824 -4.8745 2.9746; -2.8029 -2.9665 0.26002; 1.9492 -0.56367 2.4798]; LW{2,3} = [3.4791 -0.72835 1.6159 -1.513 -0.58511 0.10175 0.30046 -0.020476 0.82736 3.7615 2.2226 -1.1307]; b{2} = [2.6779; 3.0984; 2.2409; 2.522; -0.52367; -2.0915; 0.90781; -0.90616; -1.4632; 0.64351; -1.9935; 3.2007]; b{3} = [-0.35259].

Формула (3.5) насправді відображає порядок виконання розрахунків виходів вихідного та прихованих шарів нейромережі відповідно до використовуваної архітектури (рисунок 3.32) при поданні на вхід вектора з трьома інформативними параметрами – перемноження цього вектору на вагові коефіцієнти, розрахунку їх за функцією перетворення з передачею на наступний нейрон і так далі [144].

Таким чином, застосування алгоритмів штучних нейронних мереж для опрацювання одержаних експериментальних результатів дало змогу зробити наступні висновки. За умови мінімальної кількості інформативних параметрів похибка визначення напруження за трьома інформативними параметрами (H_b , H_c , ρ) за формулою (3.5) є меншою за похибку визначення напруження за чотирма параметрами (H_b , H_c , ρ , I_2) і складає 6,04 %, що не перевищує 12% на нових зразках посудин під тиском. Такий рівень похибок є цілком прийнятним для виробничої практики за умови відсутності інших підходів і методик. Окрім того, рівень похибки можна суттєво знизити завдяки більшій кількості дослідів на посудинах під тиском, особливо на початку і в кінці діапазону вимірювань (рисунок 3.34).

Доцільно навести пояснення чому похибка тестування нейронних мереж в разі використання чотирьох параметрів вища, ніж для трьох, а у випадку верифікації – навпаки. Загальним поясненням цього є значна стохастичність інформативних параметрів у випадку верифікації нейронних мереж, а конкретним поясненням може слугувати недостатня репрезентативність результатів вимірювань, використаних для верифікації. Крім того, різниця похибок (в межах 1,5%) не є значною для такого роду досліджень і ніяким чином не спростовує обґрунтованості запропонованого підходу.

Одержана аналітична залежність (3.5) дає можливість визначати напруження, що виникають в процесі роботи ППТ АГНКС, за допомогою комплексу вимірюваних інформативних параметрів відповідно до описаної вище методики.

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [121, 137, 145].

Висновки до розділу 3

1. Розроблена програма і методика експериментальних досліджень щодо можливості діагностування технічного стану ППТ за рівнем напружень із застосуванням фізичних методів контролю, що передбачала два етапи: дослідження на плоских пропорційних зразках на першому та моделях посудин, що працюють під тиском, - на другому. Перед початком проведення випробувань дослідних зразків посудин було проведено теоретичний перевірочний розрахунок максимально допустимого напруження у стінках посудин та максимально-допустимого внутрішнього тиску, що викликає ці напруження, для відтворення граничних міцнісних експлуатаційних умов.

2. Проведені в два етапи експериментальні дослідження передбачали визначення наявності та характеру зв'язку структурночутливих фізичних параметрів зі зміною величини внутрішніх осьових та радіальних напружень на сталевих модельних зразках. Дослідження проводились з використанням засобів контролю, що ґрунтуються на використанні різних фізичних принципів.

3. Проведений графо-аналітичний та кореляційний аналіз для визначення якості кореляційних зв'язків кожного окремого з вимірних фізичних параметрів з значеннями напружень в стінці дослідних зразків. За результатами кореляційного аналізу вибраний мінімальний набір інформативних фізичних параметрів для можливості комплексного їх застосування для контролю напруженого стану ППТ.

4. Кореляційно-регресійний дав можливість виміряти величину зв'язку між двома або більше змінними і визначити необхідності включення тих чи інших чинників до рівнянь регресії, а також оцінити отримане рівняння регресії на відповідність виявленим зв'язкам.

5. З використанням алгоритму штучних нейронних мереж було отримане рівняння зв'язку між напруженням в стінці ППТ від комплекту вхідних інформативних фізичних параметрів.

6. Оцінена точність аналітичного визначення величини напруження на результатах вимірювання, що не брали участь в тестуванні нейронної мережі. Одержане значення найменшої відносної похибки складає 6,04% при визначенні напруження чотирма та трьома фізичними параметрами: твердістю, коерцитивною силою, магнітним параметром I_2 та питомим електричним опором. При окремому застосуванні обраних методів визначення напружень в металі найменша відносна похибка вимірювання становить не менше 10%.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИЯВЛЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ НАПРУЖЕНЬ У СТІНКАХ ПОСУДИН АГНКС, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПІД ТИСКОМ

Для проведення промислової апробації результатів теоретичних та експериментальних досліджень було розроблено комплексний підхід (методологію) для визначення напружень у виробничих умовах реальних експлуатуючих об'єктів АГНКС, а саме ППТ, за значеннями виміряних фізичних інформативних параметрів. Також був розроблений проект нормативного документу (методики) проведення контролю в промислових умовах.

Як зазначалося раніше [19], на практиці визначення напружень в металоконструкціях зводиться до одного, інколи двох методів контролю [20-22, 113], тобто напруження визначають на основі одного або двох інформативних параметрів, а при оцінці ФТС об'єктів підвищеної небезпеки чимало чинників, набутих у ході тривалої експлуатації (залишкові напруження й деформації, зміни у мікроструктурі, старіння, втома, деградація, міжкристалічна корозія, явище наклепу, складні умови експлуатації), які впливають на стан металоконструкції, не враховуються, результатом чого є спотворення реальних даних, що характеризують стан об'єкту.

Перелік чинних нормативних документів за якими проводиться оцінка ФТС та визначається залишковий ресурс ППТ, регламентує проведення контролю технічного стану неруйнівними методами, які є необхідними, але не достатніми для точної та повної оцінки об'єкта, що піддається технічному діагностуванню. Відомі методики розрахунку залишкового ресурсу посудин та галузеві стандарти носять узагальнений характер та не дозволяють адекватно врахувати в розрахунках всі навантаження та фактори впливу, яким піддається посудина під час експлуатації. Крім того, визначення напружень у стінках ППТ, через врахування ФМХ зводиться, здебільшого, до вимірювання твердості

поверхневого шару металу об'єкта контролю та узагальнених розрахунків, що не дає змоги отримати достовірні результати.

Враховуючи вище сказане, була розроблена методологія, яка регламентує використання цілого комплексу методів та засобів контролю та визначення рівня напружень у стінках ППТ без руйнування матеріалу. Достовірні результати вимірювання величин фізичних інформативних параметрів (твердість, коерцитивна сила, електричний опір, магнітний параметр) та визначення рівня напружень за комплексом вимірюваних параметрів дадуть змогу експлуатуючим організаціям найбільш точно прогнозувати безпечні режими роботи технологічного обладнання підвищеної небезпеки на об'єктах промисловості та планово проводити їх модернізацію і оновлення.

4.1 Розроблення методології виявлення та визначення величини напружень металу посудин, що працюють під тиском удосконаленим комплексним методом

Запропонована методологія установлює порядок визначення напружень у стінках ППТ в умовах АГНКС, за результатами якого формуватиметься висновок про ФТС посудини, величину залишкового ресурсу, відповідність нормам безпеки і прийматиметься рішення про терміни наступного обстеження, доцільність ремонту, реконструкції або виведення з експлуатації, тощо.

Методологію можуть використовувати фахівці експертних та спеціалізованих організацій, які здійснюють контроль ФТС технологічного обладнання та визначають залишковий ресурс, в тому числі і ППТ як в умовах АГНКС, так і у різних галузях промисловості.

Розроблена методологія базується на раніше встановлених експериментальним шляхом кореляційних зв'язках між вимірними фізичними інформативними параметрами і напруженнями у стінках ППТ.

Методологія визначення напружень, які діють у стінках ППТ включає в себе наступні операції (рисунок 4.1):

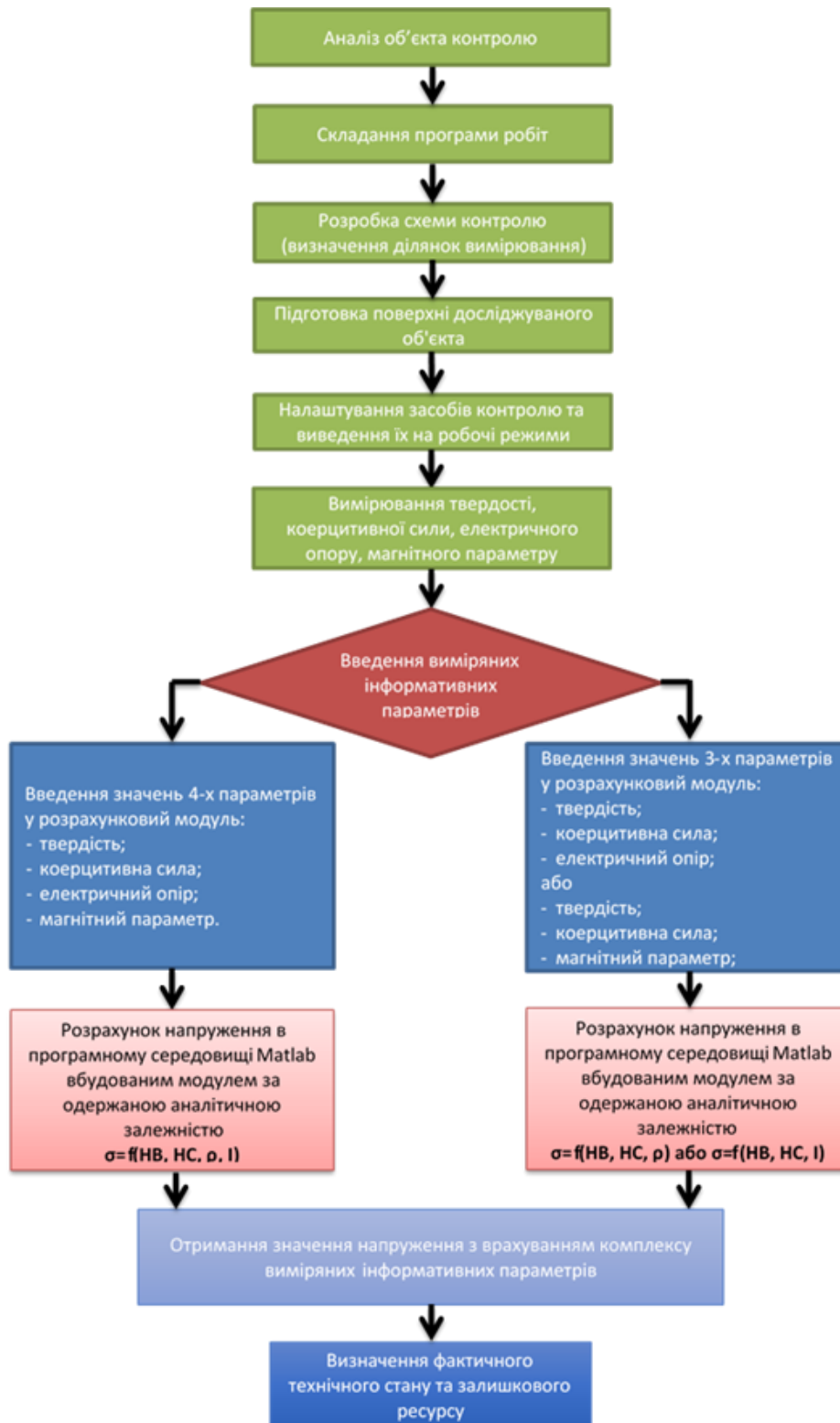


Рисунок 4.1 – Послідовність визначення напружень у стінках ПШТ

- аналіз об'єкта контролю;
- складання програми робіт;

- розробка схеми контролю (визначення ділянок вимірювання);
- підготовка поверхні досліджуваного об'єкта;
- налаштування засобів контролю та виведення їх на робочі режими;
- вимірювання інформативних параметрів: твердості, електричного опору, коерцитивної сили, магнітного параметру;
- обробка результатів та введення вимірюваних інформативних параметрів у розрахунковий модуль;
- отримання значення напруження з врахуванням комплексу вимірюваних інформативних параметрів;
- визначення ФТС та залишкового ресурсу

Перед початком робіт з визначення ФТС та прогнозування залишкового ресурсу через контроль рівня напружень у стінках ППТ, замовник (представник експлуатаційної служби АГНКС) зобов'язаний:

- видати наказ про призначення відповідальної особи за організацію обстеження посудини;
- підготувати сталеві конструкції до проведення контролю;
- надати представникам організації, яка проводить роботи з неруйнівного контролю, необхідну технічну документацію;
- представити результати попереднього технічного діагностування (якщо згадане проводилося).

Право виконання робіт з неруйнівного контролю та визначення напружень у стінках ППТ мають організації (лабораторії), які акредитовані на технічну компетентність згідно з [146, 147] і мають дозвіл Держгірпромнагляду України на право проведення вказаних робіт.

Фахівці повинні досконало володіти апаратурою та обладнанням, які використовуються для контролю, а також регулярно проходити інструктажі з охорони праці, пожежної та електробезпеки і здавати іспити згідно з [148, 149].

Апаратура, що використовується для визначення інформативних параметрів, повинна відповідати вимогам чинних стандартів та нормативних

документів з охорони праці. Перед використанням апаратури необхідно вивчити вказівки з її безпечної експлуатації.

Засоби вимірювальної техніки, які використовуються під час проведення контролю посудин, що працюють під тиском, повинні знаходитись під метрологічним контролем. Їх придатність до використання повинна підтверджуватись свідоцтвом про метрологічну атестацію або перевірку.

Перед початком роботи працездатність та точність вимірювання засобів повинна бути перевірена на зразках для настроювання або іншими методами у відповідності до експлуатаційної документації на неї.

Перед підключенням апаратури до зовнішньої мережі живлення слід перевірити надійність заземлення та цілісність силових кабелів. Підключення (відключення) і заземлення апаратури на місці проведення контролю повинно здійснюватися з дозволу чергового електрика і в його присутності. Кабелі живлення та заземлення слід розміщувати таким чином, щоб виключити можливість їх пошкодження.

Перед проведенням досліджень на ППТ, у промисловості необхідно ознайомитись з технічною, конструкторською та експлуатаційною документацією, до якої відноситься:

- паспорт посудини (містить інформацію про основні технічні характеристики, терміни виготовлення та експлуатації, гарантії заводу-виготовлювача, дані про ремонт та режими експлуатації);
- робочі журнали (містять інформацію про відповідальних осіб за обладнання, особливості та режими експлуатації, про проведені ремонти, аварії або аварійні зупинки, тощо);
- звіти, акти, висновки або інші документи, які представляють результати попередніх проведених діагностичних обстежень (містять інформацію про фактичний технічний стан обладнання, допустимі і не допустимі виявлені дефекти у конкретний момент часу);
- інформація про термін експлуатації посудини;

- відомості про аварії та відмови обладнання;
- сертифікати на вироби (труби, елементи металоконструкцій тощо) та матеріали, з яких вони виготовлені;
- конструкторські документи (містять інформацію про особливості будови посудин під тиском, відображають процес виготовлення, тощо).

Дана інформація використовується для подальшого визначення ділянок на посудинах, на яких повинен здійснюватися контроль напруженого стану. В першу чергу під контроль підпадають ділянки, на яких очікується надмірна або значна концентрація напружень в ході експлуатації металоконструкції.

Ділянки елементів конструкції посудин, які підлягають контролю, необхідно очистити від бруду, фарби, рихлих продуктів корозії, залишків мастила. Також слід забезпечити необхідну освітлюваність зони контролю.

За умови відповідності геометричних параметрів посудини нормативним значенням та відсутності дефектів типу порушення суцільності проводять вимірювання значень інформативних параметрів.

У випадку відсутності попередньої інформації про об'єкт контролю, а саме про матеріал виготовлення та механічні характеристики, і у випадку, коли неможливо провести контроль неруйнівними методами, рекомендованим є використання руйнівних методів контролю з наступною вирізкою зразків з відповідного елемента металоконструкції (якщо це можливо) і проведення їх випробування відповідно до [122].

Наступним етапом є вимірювання значень інформативних параметрів, а саме: твердості, електричного опору, коерцитивної сили, магнітного параметру I_2 .

Вимірювання твердості металу посудини рекомендується проводити з використанням динамічних твердомірів типу ТД-32, контактено-резонансних типу ТКР-35 або аналогічних. Твердість визначається за шкалою Брінеля (НВ).

Обсяги та зони контролю визначаються в залежності від ступеню складності конструктивного виконання, а також від рівня навантаженості або

пошкодженості окремих елементів, та у випадку, якщо є підозри на неоднорідність механічних характеристик металу стінок посудини. Для визначення твердості рекомендується проводити контроль не менше як у трьох перерізах ППТ і не менше як у 4-ох точках одного перерізу.

Методика проведення вимірів твердості серійними динамічними або контактнo-резонансними твердомірами наводиться в їх експлуатаційних документах.

Результати вимірювання твердості заносять до протоколу вимірювання, а також вводять у спеціально розроблений розрахунковий модуль з метою їх опрацювання.

Визначення питомого електричного опору металу посудини рекомендується проводити з використанням установки, яка складається з атестованого мікроомметра типу БСЗ-010-2 та контактнoго чотиризондoвого вимірювального перетворювача. Мікроомметр дозволяє вимірювати активний електричний опір на чотирьох діапазонах в одноразовому і багаторазовому режимах, проводити автокалібрування за зовнішніми еталонами.

Для визначення інформативного параметру рекомендується здійснити 3-разові вимірювання електричного опору не менш як у 3-ох перерізах металоконструкції посудини. Порядок вимірювання електричного опору описано у відповідній експлуатаційній документації на прилад.

Результати визначення електричного опору перераховують в питомий електричний опір з урахуванням геометричних параметрів посудини і заносять до протоколу вимірювання, а також вводять у спеціально розроблений розрахунковий модуль з метою їх опрацювання.

Визначення коерцитивної сили металоконструкцій рекомендується проводити з використанням коерцитиметра КРМ-Ц-КЗМ з П-подібним намагнічувачем.

Для визначення інформативного параметру рекомендується здійснити вимірювання коерцитивної сили не менше, як у трьох перерізах тіла посудини, та не менше, як 4 вимірювання у одному перерізі.

Порядок вимірювання коерцитивної сили описано у відповідній експлуатаційній документації на прилад.

Результати визначення коерцитивної сили заносять до протоколу вимірювання, а також вводять у спеціально розроблений розрахунковий модуль з метою їх опрацювання.

Визначення магнітного параметру рекомендується проводити з використанням приладу ІВС-І2.

Для визначення інформативного параметру рекомендується здійснити 3-разові вимірювання не менше, як у 3-ох перерізах посудини, та не менше, як у 4-ох ділянках одного перерізу.

Порядок вимірювання магнітного параметру описано у відповідній експлуатаційній документації на прилад.

Результати визначення магнітного параметру заносять до протоколу вимірювання, а також вводять у спеціально розроблений розрахунковий модуль з метою їх опрацювання.

Для опрацювання інформації, яка отримана за результатами вимірювання значень інформативних параметрів, служить портативний комп'ютер, який виконує розрахунок значення напруження за одержаними даними відповідно до алгоритму розрахунку, що знаходиться в пам'яті комп'ютера.

Після введення у портативний комп'ютер виміряних значень твердості (H_b), питомого електричного опору (ρ), коерцитивної сили (H_c) та магнітного параметру (I_2) відбувається розрахунок напруження за розробленим алгоритмом штучних нейронних мереж.

Результати контролю та розрахунку напружень за розробленим алгоритмом оформляються протоколом. Протокол контролю обов'язково повинен містити:

- ідентифікаційні дані про контрольовану посудину (тип, заводський або інший номер, тощо);
- дані про організацію та спеціалістів, які здійснили контроль (рівень кваліфікації, номер посвідчення, прізвище);
- дані про види, методи та обсяги проведення контролю, а також про прилади і апаратуру, які застосовують під час контролю, з зазначенням дати їх повірки або метрологічної атестації;
- перелік нормативних документів, згідно з якими проводиться контроль;
- значення вимірних інформативних параметрів;
- результати розрахунку напружень у стінках ППТ.

У випадку наявності дефектів в протоколі повинна бути детальна інформація про виявлені дефекти з зазначенням їх місцезнаходження та параметри. Протокол може бути доповнений схемами, ескізами, та іншими необхідними матеріалами.

Протоколи контролю повинні бути внесені в облікові документи, які ведуться на АГНКС, де здійснюють контроль, та в організації, яка здійснювала контроль.

Одержані результати є вихідними даними для визначення напружень у стінках ППТ та підставою для прийняття рішення відповідними службами про необхідність проведення ремонту або виведення їх з подальшої експлуатації.

4.2 Промислова апробація розробленої методології на посудинах, що працюють під тиском об'єктів АГНКС

З метою оцінки ефективності та достовірності розробленої методології визначення напружень у стінці ППТ, проведено промислову апробацію на об'єктах АГНКС-Львів з РВУ «ЛЬВІВАВТОГАЗ» ДП «УКРАВТОГАЗ» та ПАТ «УКРСПЕЦТРАНСГАЗ», а також розроблену методологію визначення та контролю рівня напружень з врахуванням комплексу фізичних інформативних

параметрів було впроваджено в умовах ДП «Карпатський експертно-технічний центр», фахівці якого використали її при проведенні експертних обстежень ППТ.

У виробничих умовах реальних експлуатуючих об'єктів нафтогазового комплексу було здійснено апробацію методології визначення напружень у стінці ППТ з врахуванням комплексу інформативних параметрів (твердість, електричний опір, коерцитивна сила та магнітний параметр).

Дослідження проводились з метою підтвердження достовірності визначення напружень за комплексом вимірюваних інформативних параметрів за розробленою методологією та значенням, розрахованим згідно з [107].

Робочій групі були надані:

- опис проведення контролю фізичних інформативних параметрів, за якими визначають напруження у стінках ППТ;
- результати попередньо проведених експериментальних досліджень у лабораторії випробувального центру ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд» та ІФНТУНГ;
- інформаційно-вимірювальну систему ІВС-І2, твердомір динамічний ТД-32, магнітний структуроскоп (коерцитиметр) КРМ-ЦК і мікроомметр БСМ-010-2.

На території АГНКС-Львів з РВУ «ЛЬВІВАВТОГАЗ» ДП «УКРАВТОГАЗ» дослідження проводилися на двох ППТ – акумуляторах газу (назва – балони для метану, рік виготовлення – 1986, внутрішній діаметр – 376 мм, товщина стінки – 25,0 мм, довжина – 2620 мм, тип днищ – горловини) (рисунок 4.2).

Отримані результати вимірювання інформативних параметрів наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати вимірювання інформативних параметрів металу стінки ППТ

Назва	1-переріз	2-переріз	3-переріз
	За тиском 10,0 МПа		
Нс	4,2; 4,2; 4,3	4,2; 4,4; 4,3	4,3; 4,3; 4,6

Продовження таблиці 4.1

Hb	151; 155; 149	152; 151; 159	150; 164; 162
ρ	22,46; 22,43; 23,41	22,0; 23,31; 24,10	23,10; 23,20; 24,13
I2	21483,2; 21462,3; 21356,4	21523,2; 21562,3; 21756,4	21383,2; 21456,3; 21556,4
За тиском 15,0 МПа			
Hc	5,3; 5,2; 5,5	5,2; 5,4; 5,5	5,8; 5,3; 5,6
Hb	141; 138; 136	136; 140; 149	139; 137; 142
ρ	21,40; 22,00; 22,13	21,0; 22,30; 22,10	22,11; 22,50; 21,73
I2	21282,2; 21252,3; 21255,4	21228,2; 21222,3; 21236,4	21253,2; 21256,3; 21226,4
За тиском 20,0 МПа			
Hc	6,5; 6,2; 6,3	6,2; 6,6; 6,0	6,4; 6,5; 6,6
Hb	132; 135; 130	132; 132; 134	131; 128; 133
ρ	21,41; 21,40; 21,40	22,0; 21,31; 21,10	22,10; 21,20; 21,18
I2	21243,1; 21242,2; 21356,1	21453,1; 21422,5; 21226,5	21233,8; 21306,1; 21246,5



Рисунок 4.2 – Вимірювання інформативних параметрів на об'єкті ДП
«УКРАВТОГАЗ»

В таблиці 4.2 наведено розраховані значення напружень згідно з ГОСТ – 14249-89 та за комплексом вимірних інформативних параметрів за розробленою методологією та алгоритмом штучних нейронних мереж.

Таблиця 4. 2 – Результати розрахованих значень напружень

№п/п	Акумулятор газу (балон для метану) №1			Акумулятор газу (балон для метану) №2		
	P, МПа	σ_p , МПа	σ_e , МПа	P, МПа	σ_p , МПа	σ_e , МПа
1	10,0	83,3	85,6	10,0	83,3	90,9
2	15,0	125,0	128,6	15,0	125,0	131,1
3	20,0	166,7	170,1	20,0	166,7	173,0
	Середня відносна похибка, МПа		4,3%	Середня відносна похибка, МПа		9,1%
σ_p – розраховане значення напруження за ГОСТ – 14249-89; σ_e – значення напруження розраховане за комплексом вимірних інформативних параметрів						

Результати визначення напружень на досліджуваних об'єктах підтвердили достовірність запропонованої методології, однак були виявлені ряд несуттєвих недоліків:

– запропонована методологія потребує використання декількох технічних засобів для вимірювання інформативних параметрів, які потребують підключення до окремих джерел живлення, що є не зручним у процесі вимірювання;

– процес визначення напружень у стінках ППТ потребує залучення ЕОМ та додаткової витрати часу.

В цілому, робоча група встановила, що розроблена методологія визначення напружень може бути використана для контролю рівня та визначення напружень у стінках ППТ об'єктів АГНКС.

На наступному етапі промислової апробації здійснено вимірювання трьох та чотирьох інформативних параметрів з метою встановлення достатнього набору інформативних параметрів для найбільш точного визначення напружень за мінімальної кількості самих параметрів.

Дослідження проводилися на ППТ, а саме: цистерна (робоче середовище – пропан, зав №2232, рік виготовлення – 1971, внутрішній діаметр – 2600 мм, товщина стінки – 24,0 мм, довжина – 9060 мм, тип днищ – еліптичне) (рисунок 4.3).

Після проведення контролю були отримані результати контролю (таблиця 4.3) та розраховані значення напружень за комплексом вимірюваних 3-ох та 4-ох параметрів (таблиця 4.4, 4.5).

Таблиця 4.3 – Результати вимірювання інформативних параметрів металу стінки ППТ

Назва	1-переріз	2-переріз	3-переріз
	За тиском 1,5 МПа		
Нс	3,2; 3,1; 3,3	3,3; 3,4; 3,4	3,6; 3,5; 3,4
Нб	149; 151; 148	151; 151; 156	147; 144; 152
ρ	21,48; 21,44; 22,40	21,55; 22,41; 23,50	22,10; 22,30; 22,90
I2	21475,2; 21480,3; 21349,9	21512,2; 21545,3; 21689,4	21362,2; 21495,2; 21662,4
	За тиском 2,0 МПа		
Нс	4,9; 4,8; 4,5	4,5; 4,9; 5,0	4,8; 5,0; 5,1
Нб	142; 140; 139	139; 141; 150	141; 139; 144
ρ	21,30; 21,00; 22,13	22,0; 22,50; 22,30	22,17; 22,20; 21,00
I2	21118,5; 21252,3; 21255,9	21300,2; 21320,3; 21150,4	21159,2; 21321,3; 21298,4
	За тиском 2,5 МПа		
Нс	6,0; 5,9; 6,1	6,3; 6,5; 6,1	6,2; 6,0; 6,3
Нб	133; 135; 131	129; 130; 136	132; 132; 129
ρ	21,29; 21,25; 21,12	21,0; 21,10; 21,10	22,20; 21,00; 20,91
I2	21213,1; 21223,2; 21332,1	21475,1; 21421,5; 21229,5	21223,8; 21423,1; 21199,5

В таблиці 4.4 та 4.5 наведено розраховані значення напружень згідно з ГОСТ 14249-89 та за комплексом вимірних 4-ох та 3-ох інформативних параметрів за розробленою методологією.



Рисунок 4.3 – Вимірювання інформативних параметрів на об'єкті ПАТ «УКРСПЕЦТРАНСГАЗ»

Таблиця 4.4 – Розраховані значення напружень за 4-ма інформативними параметрами (твердість, коерцитивна сила, питомий електричний опір та магнітний параметр)

№п/п	Цистерна для транспортування зрідженого газу		
	P, МПа	σ_p , МПа	σ_e , МПа
1	10,0	83,3	85,6
2	15,0	125,0	128,6
3	20,0	166,7	170,1
Середня відносна похибка, МПа			6,3%

Таблиця 4.5 – Розраховані значення напружень за 3-ма інформативними параметрами (твердість, коерцитивна сила та питомий електричний опір)

№п/п	Цистерна для транспортування зрідженого газу		
	P, МПа	σ_p , МПа	σ_e , МПа
1	10,0	83,3	85,1
2	15,0	125,0	127,9
3	20,0	166,7	169,8
Середня відносна похибка, МПа			5,2%

Результати промислової апробації підтвердили достовірність методології, відносна похибка визначення напружень за допомогою трьох параметрів склала 5,2 %, за допомогою чотирьох – 6,3%, що є цілком прийнятним для таких робіт за умови відсутності інших методик [150].

Акти промислової апробації та впровадження розробленого методу та методології визначення та контролю напружень ППТ подані в додатках Д і Е відповідно.

4.3 Розроблення проекту нормативного документу, що реалізує методологію визначення напружень у стінках посудин комплексним методом

Наведений в розділі 1 аналіз нормативних документів, які регламентують методики визначення напружень у стінках ППТ, показав, що в них відсутні описи технологій проведення контролю та розрахунку на основі комплексного використання сучасних неруйнівних методів контролю та засобів оброблення інформації.

Розроблена методологія визначення напружень у стінках ППТ, базується на вимірюванні комплексу інформативних параметрів і на подальшому їх опрацюванні за допомогою алгоритмів штучних нейронних мереж. Опис такого підходу до визначення напружень в існуючих та застосовуваних методиках відсутній.

Тому, доцільно розробити нормативний документ типу СОУ (Стандарт організації України), який би регламентував весь перелік необхідних робіт щодо вимірювання комплексу інформативних параметрів та розрахунку напружень у стінках ППТ, за результатами якого прийматимуть рішення щодо відповідності обладнання нормам безпеки, величини залишкового ресурсу обладнання і термінів наступного контролю.

Для фахівців експертних організацій, які здійснюють контроль ФТС ППТ на АГНКС, розроблено проект стандарту організації України (СОУ) та методіку проведення робіт з визначення напружень, який складається з 12 розділів (Додаток Ж).

Перші три розділи містять загальну інформацію («Сфера застосування», «Нормативні посилання», «Терміни та визначення понять»).

У розділі 4 «Загальні положення» зазначено основні методи неруйнівного контролю, які необхідно застосовувати для вимірювання інформативних параметрів, а також зазначено необхідність їх опрацювання за допомогою штучних нейронних мереж.

Розділи 5 «Вимоги до організацій та персоналу» та 6 «Вимоги охорони праці під час проведення робіт» містять вимоги до компетентності організацій згідно з ДСТУ ISO/IEC 17025 та ДСТУ ISO/IEC 1702, кваліфікації персоналу згідно з ДСТУ EN 473, і охорони праці при проведенні робіт згідно з ДНАОП 0.00-1.21 та ДНАОП 0.00-1.07.

Розділ 7 «Аналіз технічної та оперативної документації щодо об'єкту контролю» визначає перелік вхідної інформації про об'єкт контролю, аналіз якої

необхідний для визначення ділянок вимірювання інформативних параметрів та складання програми робіт.

Розділ 8 «Вимоги до апаратури» містить вимоги до апаратури та засобів вимірювальної техніки, що використовуються для вимірювання інформативних параметрів. Також відмічена необхідність метрологічної повірки даних засобів.

У розділі 9 «Обсяг та види контролю» передбачено вимірювання комплексу інформативних параметрів методами неруйнівного контролю та їх опрацювання в програмному середовищі Matlab.

Організаційні та підготовчі роботи відображені у розділі 10. Організація-власник об'єкта контролю повинна видати всі необхідні дозволи на проведення робіт, а також підготувати посудину до проведення контролю у нормальних умовах.

У розділі 11 «Методика визначення напружень у стінках посудин, що працюють під тиском» детально описано послідовність операцій при вимірюванні комплексу інформативних параметрів з вказання місць контролю та кількості необхідних вимірювань.

Розділ 12 «Опрацювання результатів» містить алгоритм проведення розрахунку напружень у стінках ППТ, за всіма виміряними інформативними параметрами за допомогою програмного забезпечення. Також наведено вимоги до оформлення Протоколу неруйнівного контролю. Форма «Протоколу» наведена у додатку до методики.

Висновки до розділу 4

1. За результатами вимірювання фізичних інформативних параметрів та отриманих закономірностей між цими параметрами і напруженням удосконалено та розроблено методику визначення напружень у стінках ППТ.

2. Проведено успішну промислову апробацію та дослідження меж застосування розробленої методики визначення напружень у стінці ППТ на об'єктах АГНКС-Львів з РВУ «ЛЬВІВАВТОГАЗ» ДК «УКРАВТОГАЗ» та ПАТ «УКРСПЕЦТРАНСГАЗ»;

3. Розроблену методику визначення та контролю рівня напружень впроваджено в умовах ДП «Карпатський експертно-технічний центр» при експертному обстеженні посудин, що працюють під тиском.

4. Розроблено проект Стандарту організації України (методики), що регламентує порядок визначення напружень у стінках ППТ за комплексом фізичних інформативних параметрів.

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. Обгрунтовано 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 тривалої 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про схвалення Концепції Державної програми забезпечення технологічної безпеки в основних галузях економіки: Розпорядження КМУ від 11.06.2003 р. №351-р. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/351-2003-%D1%80> (дата звернення: 15.06.2017).

2. Карпаш М.О. Обґрунтування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій. *Методи та прилади контролю якості*. 2004. № 12. С. 30-33.

3. Карпаш О.М., Яворський А.В., Карпаш М.О., Райтер П.М., Зінчак Я.М. Нові технології та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики нафтогазового обладнання. *Енергетика, контроль та діагностика об'єктів нафтогазового комплексу*. 2009. №1 (10). С. 67-74.

4. Про затвердження Державної науково-технічної програми «Ресурс»: Постанова Кабінету Міністрів України від 8 жовтня 2004 р. № 1331. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1331-2004-%D0%BF> (дата звернення: 20.06.2017).

5. Про затвердження Порядку видачі дозволів на виконання робіт підвищеної небезпеки та на експлуатацію (застосування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки: Постанова Кабінету Міністрів України від 26 жовтня 2011 р. №1107. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/1107-2011-%D0%BF> (дата звернення: 20.06.2017).

6. Інструкція з експертного обстеження (технічного діагностування) «Посудини, що працюють під тиском, на промислових підприємствах» №428. – Чинна від 01.04.2006 р. – Харків: Міністерство промислової політики України, 2006. – 289 с.

7. НПАОП 0.00-1.59-87. Правила будови і безпечної експлуатації посудин що працюють під тиском. [Чинний від 27.11.1987]. Київ: Госгортехнадзор ССРСР, 1987. 135 с.

8. Про затвердження Порядку проведення огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки: Постанова Кабінету Міністрів України від 26 травня 2004 р. №687. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/687-2004-%D0%BF> (дата звернення: 20.06.2017).

9. ДСТУ 4046-2001. Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних, та хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги. [Чинний від 01.07.2002]. Вид. офіц. К.: Держстандарт України, 2001.

10. ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. [Чинний від 1995-01-01]. Вид. офіц. К.: Держстандарт України, 1995. 24 с.

11. Сафарбаков А.М., Лукьянов А.В., Пахомов С.В. Основы технической диагностики. Иркутск: ИрГУПС, 2006. 216 с.

12. Доценко Є. Р. Контроль механічних характеристик конструкційних сталей за їх питомим електричним опором: дис. на здобуття наукового ступеню канд. тех. наук: 05.11.13 / Івано-Франківський університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2010. 141 с.

13. Миндюк В. Д. Розроблення методу оцінки якісних змін матеріалів нафтогазового обладнання за комплексом фізичних характеристик: дис. на здобуття наукового ступеню канд. тех. наук: 05.15.12 / Івано-Франківський університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2014. 135 с.

14. Карпаш М. О. Розроблення методу та засобу визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій довготривалої експлуатації: дис. на здобуття наукового ступеню канд. тех. наук: 05.11.13 / Івано-Франківський університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2006. 125 с.

15. Тацакович Н. Л. Удосконалення методу технічної діагностики нафтогазопроводів: дис. на здобуття наукового ступеню канд. тех. наук: 05.15.13 / Івано-Франківський університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2009. 154 с.

16. Касаткин Б. С., Кудрин А. Б., Лобанов Л. М. и др. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. Киев: Техника, 1981. 415 с.
17. Башкатов А.В., Бондарь А.В., Булков А.Б. Напряжения и деформации при сварке: учебное пособие. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 1999. 82 с.
18. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Филинов В.Н. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / ред. Клюева В.В. М.: Машиностроение, 1995. 448 с.
19. 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. XXXI*, №1 (187). 2016. С. 319-324.
20. Карпаш А.М. Аналіз відомих методів контролю фізико-механічних характеристик металу. *Нафтогазова енергетика*. 2012. №1(17). С. 70-82.
21. 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.
22. Ващишак С.П., Карпаш А.М. Современные подходы к определению физико-механических характеристик металлов объектов нефтегазового комплекса. *SCIENTIFIC PROCEEDINGS. XXVII*, №1 (133). 2012. С. 260-264.
23. Билокур І. П. Акустический контроль: учебное пособие. К.: ІЗМН, 1997. 244 с.
24. Ботаки А.А., Ульянов В.А., Шарко В.А. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. М.: Машиностроение, 1983. 80 с.
25. Карпаш О.М, Молодецкий И.А., Карпаш М.О. Общий обзор методов оценки физико-механических характеристик металлов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2004. №2. С.18-22.
26. 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.

27. Шарко А.В. Современное состояние и перспективы развития акустических методов контроля прочностных свойств конструкционных материалов. *Дефектоскопия*. 1983. № 5. С. 72-87.

28. ГОСТ 20415-82. Контроль неразрушающий. Методы акустические. Общие положения. [Чинний від 1983-07-01]. Вид. офіц. М.: Стандартінформ, 2010. 4 с.

29. ДСТУ 4227:2003. Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки. [Чинний від 2003-12-01]. Вид. офіц. К.: Держспоживстандарт України, 2003.

30. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов: справочное издание. М.: Металлургия, 1991. 752 с.

31. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996. 184 с.

32. Муравьев В.В. Взаимосвязь скорости ультразвука в сталях с режимами их термической обработки. *Дефектоскопия*. 1989. №2. С. 66-68.

33. Полетика И., Егорова Н., Куликова О., Зуев Л. Об ультразвуковом контроле неоднородности механических свойств горячекатаной стали. *Журнал технической физики*. 2001. Т.71, Вып. 3. С. 37-40.

34. Бернштейн М.Л. Структура деформированных металлов. М.: Металлургия, 1977. 431 с.

35. Иванов А.И., Лебедев А.А., Шарко А.В. Использование продольно-поверхностных волн при контроле твердости стали. *Дефектоскопия*. 1990. №2. С. 89-91.

36. Лебедев А.А., Шарко А.В. Акустический контроль механических свойств стальных изделий поверхностными волнами Рэлея. *Дефектоскопия*. 1990. №10. С. 14-19.

37. Способ измерения физико-механических характеристик материала листового проката: Пат. № 2224249 Россия: МПК G 01 N 29/18; заявл. 06.05.2002; опубл. 20.02.2004. 6 с.

38. Кошовий В.В., Левицький О.Є., Лозинський А.Б., Романишин І.М. Технології і засоби ультразвукової комп'ютерної томографії для неруйнівної оцінки об'ємної однорідності властивостей матеріалу в товстолистових конструкціях обладнання АЕС. *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2004-2006 рр.* К: ІЕЗ ім.Є.О. Патона НАН України. 2006. С. 196-201.

39. Пенкин А.Г., Терентьев Л.Г., Маслов В.Ф. Оценка степени деградации механических свойств и остаточного ресурса работоспособности трубных сталей с использованием методов акустической эмиссии и кинетической твердости. URL: www.sds.ru/articles/degradation/index.html (дата звернення: 30.08.2017).

40. Дробот Ю.Б., Корчевский В.В. Применение акустической эмиссии при определении предела упругости. *IX Всесоюзная н/т конф. по неразрушающим методам контроля: тезисы докл.* Минск, 1981. Ч. 2. – С. 173-174.

41. Корякина В.Е., Новоселова Т.М., Соломатин В.Е. Возможности рентгеновского измерения остаточных напряжений в направлениях валике и основном металле крупнозернистой заустенитной стали 15х23Н18Л. *Сварочное производство.* №9. 2000. С. 37-38.

42. Белокур И.П., Коваленко В.А. Дефектоскопия материалов и изделий. К.: Техника, 1989. 192 с.

43. Michael, B. Heaney. Electrical Conductivity and Electrical Conductivity and Resistivity. *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook.* CRC Press LLC, 1999. Chapter 43.

44. Кузнецов И.А. Термоэлектрические датчики для контроля материалов и изделий без разрушений. *Дефектоскопия.* 1973. №1. С. 5-12.

45. Данилевин М.Н., Ярковский В.С. Термоэлектрический прибор ТМС-МП для сортировки сталей по маркам. *Дефектоскопия*. 1982. №9. С. 94-95.
46. Кузнецов И.А., Окунев В.М. Термоэлектрические свойства сталей и прибор для контроля химического и фазового состава. *Дефектоскопия*. 1993. №8. С. 78-85.
47. Кашубский А.Н. Идентификация конструкционных материалов методами неразрушающего контроля физико-механических характеристик и структурных параметров: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: 05.11.13 / Красноярский гос. техн. ун-т. Красноярск, 2006. 20 с.
48. Плотникова Г.А. О совмещении вихретокового и термоэлектрического методов при сортировке сталей по маркам. *Дефектоскопия*. 1983. №10. С. 19-25.
49. Журавлёв Л.Г., Филатов В.И. Физические методы исследования металлов и сплавов: учебное пособие для студентов металлургических специальностей. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. 157 с.
50. Bowler N., Yongqlang H. Electrical conductivity measurement of metal plates using broadband eddy-current and four-point methods. *Measurement science & technology*. 2005. V. 16. N11. P. 2193-2200.
51. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов : учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1987. 239 с.
52. Heaney Michael B. Electrical Conductivity and Electrical Resistivity. *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*. CRC Press LLC, 1999. Chapter 43.
53. Асанов М.В. Плотников Ю.А., Пятыйшин А.Е., Чернов Л.А. Электротепловой метод отдельного контроля удельной электрической проводимости и толщины покрытий. *Дефектоскопия*. 1993. №12. С. 41-48.
54. Nahm S.H., Kim Y.I., Yu K.M., Kim A. Evaluation of fracture toughness of degraded Cr-Mo-V steel using electrical resistivity. *Journal of Materials Science*. 2002. V.37. N16. P.3549-3553.

55. Takeo F., Saka M., Sagae T. Distinction of Alloy Steels by Means of the Closely Coupled Probes Potential Drop Technique. 15th World Conference on NDT, 15-21 October 2000, Rome. URL: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn497/idn497.htm> (дата звернення: 02.08.2017).

56. Доценко Е.Р., Карпаш М.О. Контроль удельного электрического сопротивления стальных изделий плоской формы четырёхзондовым методом. *Вестник Тернопольского национального технического университета*. 2013. № 3 (71). С.88-98.

57. Карпаш М.О., Доценко Є.Р., Карпаш О.М. Питомий електричний опір як інформативний параметр визначення фактичних фізико-механічних характеристик конструкційних сталей. *Сучасне матеріалознавство - матеріали та технології*: всеукр. конф. молодих вчених, Київ, 12-14 листопада 2008 р. Київ, 2008. С.233.

58. Карпаш О.М., Доценко Є.Р., Карпаш М.О., Василик А.В. Питомий електричний опір як інформативний параметр визначення фактичних фізико-механічних характеристик матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2009. №1. С. 36-41.

59. Карпаш О.М., Доценко Є.Р., Карпаш М.О. Теоретичні аспекти контролю питомого електричного опору сталей чотирьохзондовим методом. Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів «Леотест-2010»: 15 Міжнар. наук.-техн. конф., Славське, 15-20 лютого 2010 р. Львів, 2010. С.53-54.

60. Улыбин А. В. Метод измерения электрического сопротивления для контроля механических напряжений в стальных конструкциях: автореф. диссерт. на ст. к.т.н.: 05.11.01 / СПб.: СПбГПУ, 2010. 20с.

61. Badidi Boudaa A. Lebailib S., Benchaalaa A. Grain size influence on ultrasonic velocities and attenuation. *NDT&E International*. 2003. Vol. 36. P. 1-5.

62. ГСТУ 320.02829777.013-99. Рекомендації по проведенню неруйнівного контролю бурового обладнання. [Чинний від 01.05.2000]. Івано-Франківськ: НВФ «ЗОНД», 2000.

63. Криничний П.Я., Молодецький І.А. Прилад для контролю фізико-механічних характеристик труб нафтового сортаменту СІГМА-5Т. *Методи та прилади контролю якості*. 1998. № 2. С. 9-10.

64. Химченко Н.В. Ультразвуковой структурный анализ металлических материалов и изделий. М.: Машиностроение, 1976. 62 с.

65. Дубов А.А. Диагностика котельных труб с использованием магнитной памяти металла. М.: Энергоатомиздат, 1995. 280 с.

66. Дорофеев А.Л. Индуктивная структуроскопия. М.: Энергия, 1973. 96 с.

67. Ершов Р.Е. Контроль термообработки ферромагнитных изделий методом вихревых токов. *Изв. вузов. Физика*. 1966. №4. С. 52-61.

68. Способ неразрушающего контроля механических свойств ферромагнитных изделий : авт. свид. № 552553. Бюлл. изобр., 1977. № 12. С. 103.

69. Способ магнитного контроля механических свойств ферромагнитных изделий: пат. RU 2051380 С1 РФ, МПК G 01 N 27/80.; опубл. 27.12.1995. 6 с.

70. Способ контроля механических свойств проката: пат. RU 2069361 С1 РФ, МПК G 01 N 27/72.; опубл. 20.11.1996. 5 с.

71. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль: практ. пос. /ред. В.В. Сухорукова. М.: Высш. шк., 1992. 312 с.

72. «Энергосила».: Измерители удельной электрической проводимости ВЭ-17НЦ/5. URL: <http://inergo.ru/catalog/element.php?ID=25966> (дата звернення: 11.09.2017).

73. Горкунов Э.С. Взаимосвязь между магнитными, электрическими свойствами и структурным состоянием термически обработанных сталей – основа определения прочностных характеристик изделий неразрушающими методами: методические рекомендации. Свердловск: УЦ АН СССР, 1985. 130 с.

74. Бида Г.В., Ничипурук А.П. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле. *Дефектоскопия*. 2000. №10. С. 3-28.

75. Мусихин С.А., Новиков В.Ф., Борисенко В.Н. Об использовании коэрцитивной силы в качестве индикаторного параметра при неразрушающем контроле механических напряжений. *Дефектоскопия*. 1987. №9. С.57-60.

76. ДСТУ ISO 6506-1:2007. Національний стандарт України. Матеріали металеві. Визначення твердості за Брінеллем. Частина 1. Метод випробування; (ISO 6506-1:2005, IDT). [Чинний від 01.09.2009]. Вид. офіц. К.: Держспоживстандарт України, 2010.

77. Бида Г.В., Горкунов Э.С., Шевнин В.М. Магнитный контроль механических свойств проката. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 250 с.

78. Бида Г.В., Камардин В.М. Физическое обоснование контроля ударной вязкости проката из малоуглеродистых и низколегированных сталей магнитными методами. *Дефектоскопия*. 1995. №10. С. 3-31.

79. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Связь магнитных свойств со структурным состоянием вещества – физическая основа магнитного структурного анализа. *Дефектоскопия*. 1981. № 8. С. 8-21.

80. Назарчук З.Т., Тетерко А.Я., Рибачук В.Г., Кулинич Я.П. Комплекс технічних засобів для електромагнітного неруйнівного контролю конструкцій тривалої експлуатації. *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2004-2006 рр.* К.: ІЕЗ ім.Є.О.Патона НАН України. 2006. С. 42.

81. Неклюдов І.М., Ажажа В.М., Ожигов Л.С., та ін. Діагностичний контроль напружено-деформованого стану основного металу та зварних з'єднань трубопроводів енергоблоків за допомогою коерцитиметричного методу / І.М. Неклюдов. *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2004-2006 рр.* К.: ІЕЗ ім.Є.О.Патона НАН України. 2006. С. 150.

82. Михеев М.Н., Кузнецов И.А., Царькова Т.П. Зависимость показаний коэрцитиметра с приставным электромагнитом от параметров испытуемых изделий. *Дефектоскопия*. 1973. №2. С. 116-120.

83. Дубов А. Исследование свойств металла с использованием метода магнитной памяти. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1997. №9. С. 35-39.

84. Бида Г.В., Почуев Н.Д., Сташков А.Н. Неразрушающий метод контроля механических свойств труб нефтяного сортамента. *Дефектоскопия*. 2002. №10. С. 14-29.

85. Perez-Benitez J.A., Caro-Sanchez J., Anglada-Rivera J., Padovese L.R.. A study of plastic deformation around a defect using the magnetic Barkhausen noise in ASTM 36 steel. *NDT&E International*. 2008. vol.41. P. 53-58.

86. Ботаки А.А., Ульянов В.В., Шарко А.В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. М.: Машиностроение, 1983. 74 с.

87. Велев Г.С., Латковски В.В. Автоматизированная система для комплексного неразрушающего контроля структуры и механических свойств материалов. *Неразрушающий контроль и диагностика: XVII Российская научно-техническая конф. с междунар. участием*. Екатеринбург, 2005. С. 258.

88. Спосіб неруйнівного контролю ударної в'язкості елементів металоконструкцій / Карпаш О.М., Тацакович Н.Л., Карпаш М.О., Рибіцький І.В. Патент UA 42294 U. – заявл. 19 лют. 2009; опубл. 25 чер. – 2009. – U 200901410.

89. Тацакович Н.Л., Карпаш О.М., Карпаш М.О. Експериментальне дослідження можливості визначення ударної в'язкості неруйнівним методом. *Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів «Леотест-2009»*: 14 Міжнар. наук.-техн. конф., Славське, 16-21 лютого 2009 р. Львів, 2009. С.75-76.

90. Тацакович Н.Л., Карпаш О.М. Дослідження неруйнівного методу визначення ударної в'язкості. *Техніка і прогресивні технології в нафтогазовій*

інженерії: міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених, Івано-Франківськ, 16-20 вересня 2008 р. Івано-Франківськ, 2008. С.54.

91. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформированного тела. М.:Наука, 1973. 576 с.

92. Лимаренко А.М., Оборский Г.А., Сурьянинов Н.Г. Экспериментальные методы исследования в механике: учебное пособие/ ред. Н.Г. Сурьянинова. Астропринт, 2011. 541 с.

93. Муравский Л.И., Гвоздюк М.М., Половинко Т.И. Определение поверхностных деформаций композитов методами цифровой спекл-корреляции. *Физ.-хим. механика материалов*, 2007. N4. С.103-106.

94. Разумовский И.А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. М.: изд. МГТУ им. Баумана, 2007. 237 с.

95. ГОСТ 22761-77. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия. [Чинний від 01.01.1979]. Вид. офіц. М.: Госкомитет по станд. СССР, 1979.

96. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. К.: Наукова думка, 1988. 736 с.

97. Мельников Н.П. Металлоконструкции: справочник проектировщика. М. Стройиздат, 1980 р., 776 с.

98. Власов В. З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике. М. Гостехиздат, 1979, 784 с.

99. Седов Л. И. Механика сплошных сред. М.: Наука, 1984. 560 с.

100. Алфутов Н. А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. М.: Машиностроение, 1991 р. 336 с.

101. Бидерман В. Л. Механика тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1977 р. 488 с.

102. Григоренко Я. М. Некоторые подходы к численному решению линейных и нелинейных задач теории оболочек в классической и уточненной постановках. *Прикладная механика*, 1996, т.32 (42). №6. с. 3-39.

103. Тимошенко С. П. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.
104. Олійник А. П. Математичні моделі процесу квазістаціонарного деформування трубопровідних та промислових систем при зміні їх просторової конфігурації. Наукове видання: Івано-Франківськ, ІФНТУНГ, 2010, 320 с.
105. Морозов В. А. Регулярные методы решения некорректно поставленных задач. М.: Наука, 1987, 240 с.
106. Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с.
107. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. [Действ. от 01.01.1990]. Изд. офиц. М.: Издательство стандартов, 1989. 55 с.
108. ГОСТ 18661-73. Сталь. Измерение твердости методом ударного отпечатка. [Действ. от 01.01.1974]. Изд. офиц. М.: Издательство стандартов, 1973. 25 с.
109. СОУ МПП 71.120-217:2009. Посудини та апарати сталеві зварні. Загальні технічні умови. [Чинний від 01.09.2009]. Вид. офіц. ВАТ "УкрНДІхіммаш", 2009. 344 с.
110. ДСТУ 4046-2001. Обладнання нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги. [Чинний від 01.07.2002]. Вид. офіц. К.: Держстандарт України, 2001.
111. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. [Действ. от 01.01.1986]. Изд. офиц. М.: Издательство стандартов, 1985. 66 с.
112. 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.

113. Тацакович Н.Л., Карпаш А.М., Карпаш О.М. Проблемы технического диагностирования технологического оборудования автомобильных газонаполнительных компрессорных станций. *NDT days 2013: SCIENTIFIC PROCEEDINGS. XXVIII*, №2 (139). 2013. С. 40-43.

114. API Standart 653. Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction. [чинний від 1996.08.01]. American Petroleum Institute. Second edition.

115. API Standart 650. Welded Tanks for Oil Storage. [чинний від 1997.08.17]. American Petroleum Institute. Seventh edition.

116. ДБН В.2.6.-163:2010. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. [Чинний від 01.01.2015]. Вид. офіц. К.: Мінрегіонбуд України, 2014.

117. Гулин А.В., Самарский А.А. Численные методы. М.: Наука, 1989. 432 с.

118. Дорошенко В. М. Основы научных исследований. К.: ІСДО. 1993. 128 с.

119. 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.

120. 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.

121. 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.

122. ГОСТ 1497-84. Методы испытаний на растяжение. [Действ. от 01.01.1986]. М.: Издательство стандартов, 1984. 23 с.

123. ГОСТ 20295-85 Трубы стальные сварные для магистральных газонефтепроводов. Технические условия. [Действ. от 01.01.1987]. М.: Издательство стандартов, 1985. 39 с.

124. ГОСТ 19282-73. Сталь низколегированная толстолистовая и широкополосная универсальная. Технические условия. [Действ. от 01.01.1975]. М.: Издательство стандартов, 1987. 16 с.

125. Разрывная машина для статических испытаний металлов. Паспорт Р-50. URL: <http://www.prompassport.ru/index.php/pasporta-kpo/prochie-kpo-pressa/1632-r50> (дата звернення: 08.07.2017).

126. Динамічний твердомір ТД-32. Паспорт. URL: <http://nktd.com.ua/wp-content/uploads/2009/01/td32.pdf> (дата звернення: 10.08.2017).

127. Контактно-резонансний твердомір ТКР-35. Паспорт. URL: <http://nktd.com.ua/wp-content/uploads/2009/01/tkr35.pdf> (дата звернення: 10.08.2017).

128. Структуроскоп-коерцитиметр NOVOTEST КРЦ-М. URL: <http://novotest.ua/magnitnyi-magnitoporoshkovyi-kontrol/strukturoskop-koercitimetr-krc-m.html> (дата звернення: 12.08.2017).

129. Ультразвуковой дефектоскоп DIO – 562. Руководство по эксплуатации дополненное 06.2004 4276-003-56173681-02 РЭ. URL: <https://loversletter.weebly.com/blog/instrukciya-dio-562-instrukciya> (дата звернення: 12.08.2017).

130. Микроомметры БСЗ-010-2, БСЗ-010-3. URL: http://ukrsk.com.ua/mikroommetry_BSZ-010.html. (дата звернення: 10.04.2015).

131. Прилад для визначення ударної в'язкості сталей. URL: <http://uapatents.com/3-42294-sposib-nerujnivnogo-kontrolyu-udarno-vyazkosti-elementiv-metalokonstrukcijj.html>. (дата звернення: 10.03.2015).

132. Тацакович Н.Л. Удосконалення методу технічної діагностики нафтогазопроводів: автореф. дис. на здобуття наук. ступ. к.т.н.: 05.15.13 / Тацакович Н.Л. – Івано-Франківськ, 2009. – 20с.

133. Ключев В.В., Соснин Ф.Р., Филинов В.Н и др. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник в 2-х кн. Кн. 1 / ред. В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 1995. 448 с.

134. Кореляційний аналіз. URL: http://pidruchniki.com/12461220/statistika/korelyatsiyniy_analiz. (дата звернення: 10.08.2017).

135. ГОСТ 5520-79. Прокат листовой из углеродистой, низколегированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением. [Действ. от 01.01.1980]. Изд. офиц. М.: Издательство стандартов, 1980. 17 с.

136. ГОСТ 10705-80. Трубы стальные электросварные. Технические условия. [Действ. от 01.01.1982]. Изд. офиц. М.: Издательство стандартов, 1982. 19 с.

137. 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.

138. Писаранеко Н. С. Справочник по сопротивлению материалов. К.:Наукова думка, 1975. 151 с.

139. НПАОП-0.00-7.02-93. Проведення робіт щодо оцінювання залишкової роботоздатності технологічного устаткування нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. [Чинний від 1993-05-19]. Вид. офіц. К.: Держнаглядохоронпраці України, 1993.

140. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. М.: Энергія, 2010. 45 с.

141. Соотношения между числами твёрдости HRC, HRA, HB и HV. URL: http://www.highexpert.ru/content/engineers/hardness_conversions.html. (дата звернення: 10.05.2017).

142. Динамический твердомер ТДМ – 2. Паспорт. URL: http://www.promprilad.ua/hardnes_2.html (дата звернення: 10.08.2017).

143. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. / пер. с польского И.Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2004 . 344 с.
144. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс: 2-е издание / Пер. с англ. С.Хайкин. М.: ИД «Вильямс», 2006. 1104 с.
145. 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.
146. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. [Чинний від 2007-07-01]. Вид. офіц. К.: Держспоживстандарт України, 2007. 32 с.
147. ДСТУ ISO/IEC 17020:2001. Загальні критерії щодо діяльності органів різного типу, що здійснюють інспектування. [Чинний від 2002-03-01]. Вид. офіц. К.: Держстандарт України, 2002. 25 с.
148. ДНАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. [Чинний від 20.02.1998]. Вид. офіц. К.: Дернаглядохоронпраці України, 1998. 72 с.
149. НПАОП 0.00-1.59-87. Правила будови і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском. [Чинний від 27.11.1987]. Вид. офіц. М.: Надра, 1989. -.135 с.
150. 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.

ДОДАТОК А

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)**

Продовження додатку А

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 наукометричними 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.

Продовження додатку А

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.

ДОДАТОК В

Технічні характеристики засобів вимірювання інформативних параметрів

Технічні характеристики твердомірів



TKP-35

Диапазоны измерения твердости по шкалам:

Роквелла (20-70) HRC

Бринелля (100-450) HB

Виккерса (150-950) HV

Время одного измерения, с 1,5

Питание прибора батарея типа КРОНА или аккумулятор 9В

Потребляемый ток не более, мА 6,5

Определение значения твердости при количестве измерений 3...20

Время автоматического отключения прибора после проведения последней операции,

мин.....

3

Объем энергонезависимой памяти, измерений

4000

Шероховатость контролируемой поверхности, не более, Ra

2,5

Диапазон температур, °С

.....0...+40

Масса прибора, кг..... 0,4

Габаритные размеры, мм

145x82x32



TD-32

Диапазоны измерений твердости по шкалам :

Роквелла, HRC **20 - 68**

Бринелля, HB **95 - 460**

Виккерса, HV **95 - 950**

Время одного измерения, с..... 2

Питание приборабатарея типа КРОНА или аккумулятор 9В

Потребляемый ток не более, мА 12,5

Определение значения твердости при количестве измерений .

.....3...10

Время автоматического отключения прибора после проведения последней операции..... 3

Объем энергонезависимой памяти, измерений

4000

Шероховатость контролируемой поверхности, не более, Ra

..... 2,5

Диапазон температур, °С-5...+40

Масса прибора, кг

0,4

Габаритные размеры, мм 165x82x32

Технічні характеристики приладу ІВС-І2



Найменування параметра	Значення
1 Границі визначення ударної в'язкості, Дж/см ² : - нижня границя, не менше - верхня границя, не більше	10 175
2 Відносна допустима похибка визначення ударної в'язкості, %, не більше	5
3 Час встановлення робочого режиму, хв, не більше	2
4 Час безперервної роботи, год, не менше	8
5 Живлення приладу: вмонтований акумулятор - напруга, В, - ємність, А/год, не менше	12 4,5
6 Потужність, що споживається, Ва, не більше	20
7 Довжина кабелю з'єднання блоку оброблення інформації з індуктивним перетворювачем, м, не менше	2
8 Габаритні розміри, мм, не більше	300x260x130
9 Маса, кг, не більше	10

Технічні характеристики коерцитиметра КРМ-Ц-КЗ



Прилад розрахований для використання в лабораторних, цехових та польових умовах, при:

- температурі зовнішнього середовища -20 до $+50$ $^{\circ}\text{C}$;
- відносній вологості повітря до 80% при $+35$ $^{\circ}\text{C}$;
- атмосферному тиску 760 мм рт.ст. ($101,3$ кПа)

Діапазон вимірювання коерцитивної сили, А/см $1,00 \dots 40,00$.

Межа основної допустимої похибки вимірювання коерцитивної сили Н с при температурі оточуючого повітря $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$, не більше, $\% \pm(0,025\text{Hc} + 0,03)$.

Межа додаткової допустимої похибки приладу при відхиленні температури зовнішнього середовища від нормальної на кожні 10°C , не більше, $\%$ не перевищує $0,5$ від основної похибки.

Тривалість циклу вимірювання, с, не більше ...8.

Амплітуда імпульсів намагнічування, А, не менше ... 2,0.

Час встановлення робочого режиму після включення живлення приладу, хв. ...15.

Внутрішня пам'ять у вигляді журналу, із заданою кількістю рядків та стовпців (до 16 рядків, до 250 вимірювань у кожному) з можливістю посторінкового перегляду.

Зв'язок з ЕОМ по інтерфейсу RS-232.

Швидкість передавання даних, бод ... 57600.

Час безперервної роботи – не менше 8 год.

Габаритні розміри, мм,:

- вимірювальний блок з акумулятором:

- довжина - 215;

- ширина - 210;

- висота - 80;

- зарядний пристрій:

- довжина - 120;

- ширина - 70;

- висота - 45.

- перетворювач:

- довжина - 80;

- ширина - 110;

- висота - 140.

Маса приладу, кг:

- вимірювальний блок з акумулятором – 2;

- зарядний пристрій – 0,35;

- перетворювач – 1,7.

Технічні характеристик приладу БСЗ-010-2



Допустима основна приведена похибка, одиниця меншого розряду та значення вимірюваного струму повинні відповідати значенням, наведеним у таблиці 1

Межа вимірювання	Одиниця молодшого розряду (о.м.р.), мкОм	Допустима основна похибка γ , %	Значення вимірювального струму, А, не більше
1000 мОм	10,0	$\pm(0,1 + 2 \text{ о.м.р})$	0,2
100 мОм	1,0	$\pm(0,1 + 2 \text{ о.м.р})$	0,3
10 мОм	0,1	$\pm(0,1 + 4 \text{ о.м.р})$	3,0
1000 мкОм	0,01	$\pm(0,1 + 4 \text{ о.м.р})$	3,0

Допустима основна приведена похибка мікрометра реалізується при наступних умовах:

- температура оточуючого повітря, °С 20 ± 5 ;
- відносна вологість повітря, % 55 ± 25 ;
- атмосферний тиск, кПа (мм рт.ст.) $84-106 (630-795)$;
- напруга мережі, В $220,0 \pm 4,4$;
- частота напруги мережі, Гц $50,0 \pm 0,5$.

Допустима приведена похибка мікрометра, яка викликана відхиленням температури оточуючого повітря від нормальної, до будь-якої в межах від плюс 10 °С до плюс 40 °С, %, не більше ... плюс мінус 0,2.

Допустима приведена похибка мікрометра, яка викликана відхиленням напруги живлення від номінального до будь-якого в межах від 198 В до 242 В, %, не менше ... плюс мінус 0,1.

Допустиме перевищення вимірюваного опору над верхнім значенням межі вимірювання, %, не менше ... плюс мінус 10.

Час вимірювання без врахування часу перевірки контактування контактора мікрометра з об'єктом вимірювання, с, не більше ... 2.

Інтервал між двома послідовними однократними вимірюваннями, с, не менше ... 6.

Час установлення робочого режиму, хв., не більше ... 15.

Час безперервної роботи мікрометра в режимі:

- однократних вимірювань в межах діапазону 1000 мОм і 100 мОм, год., не менше ... 8;

- багатократних вимірювань в межах вимірювань 10 мОм і 1000 мкОм, год., не більше ... 15;

Відновлення роботи можливе після витримки мікрометра в режимі перевірки контактування (див. порядок роботи з мікрометром) на протязі не менше 10 хв.

Потужність, яку споживає мікрометр під час процедури вимірювання, ВА, не більше ... 100 ВА.

Габаритні розміри вимірювально блоку, мм, не більше ... (325 x 135 x 220).

Довжина вхідного кабелю контактора ... $(1,5 \pm 0,05)$ м.

Маса вимірювального блоку, кг, не більше ... 6.

ДОДАТОК Г

Протоколи ультразвукового контролю якості зварних швів експериментальних посудин №1 та №2

ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд»

ПРОТОКОЛ № 10123

від 10 лютого 2016 р.

ультразвукового контролю якості зварних швів

Назва обладнання: Експериментальна посудина №1

Підприємство-власник: -

Апаратура: дефектоскоп УДЗ-71, зав. № 046, свідоцтво про повірку № 452 від 24.12.15 р.

Параметри контролю: частота 5,0 МГц, кут вводу УЗК 70⁰, S_{екв}=1,2 мм²

П'єзоперетворювач: П121-5,0-70-М-002

Нормодокумент на контроль: ГОСТ 14782-86 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые»; ГСТУ 3-037-2003 «Посудини і апарати, що працюють під тиском. Методика ультразвукового контролю зварних з'єднань»; Посудини, що працюють під тиском на промислових підприємствах. Інструкція з експертного обстеження (технічного діагностування), Мінпромполітики, 2006 р.

Схема розташування місць контролю: Карта-схема обстеження експериментальних посудин №1 та №2

Результати контролю:

№ зварного шва	Виконавча товщина стінки, мм	Кут вводу променя, °	Гранична чутл., мм ²	Об'єм контролю, %	Опис дефекту	Висновок
UT1	6,0	70	1,2	100	ДНВ*	Придатний
UT2	6,0	70	1,2	100	ДНВ	Придатний

*ДНВ - дефектів, що перевищують норму, не виявлено.

Висновок: зварні шви відповідають вимогам ГСТУ 3-037-2003.

Фахівець з НК _____



В. Б. Проців, УТ, II рівень,
посв. № 33020 видане 18.08.2016 р.

Продовження додатку Г

ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд»

ПРОТОКОЛ № 10124

від 10 лютого 2016 р.

*ультразвукового контролю якості зварних швів*Назва обладнання: Експериментальна посудина №2

Підприємство-власник: -

Апаратура: дефектоскоп УДЗ-71, зав. № 046, свідоцтво про перевірку № 452 від 24.12.15 р.Параметри контролю: частота 5,0 МГц, кут вводу УЗК 70°, S_{екв}=1,2 мм²П'єзоперетворювач: П121-5,0-70-М-002

Нормодокумент на контроль: ГОСТ 14782-86 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые»; ГСТУ 3-037-2003 «Посудини і апарати, що працюють під тиском. Методика ультразвукового контролю зварних з'єднань»; Посудини, що працюють під тиском на промислових підприємствах. Інструкція з експертного обстеження (технічного діагностування), Мінпромполітики, 2006 р.

Схема розташування місць контролю: Карта-схема обстеження експериментальних посудин №1 та №2

Результати контролю:

№ зварного шва	Виконавча товщина стінки, мм	Кут вводу променя, °	Гранична чутл., мм ²	Об'єм контролю, %	Опис дефекту	Висновок
УТ1	6,0	70	1,2	100	ДНВ*	Придатний
УТ2	6,0	70	1,2	100	ДНВ	Придатний

*ДНВ - дефектів, що перевищують норму, не виявлено.

Висновок: зварні шви відповідають вимогам ГСТУ 3-037-2003.

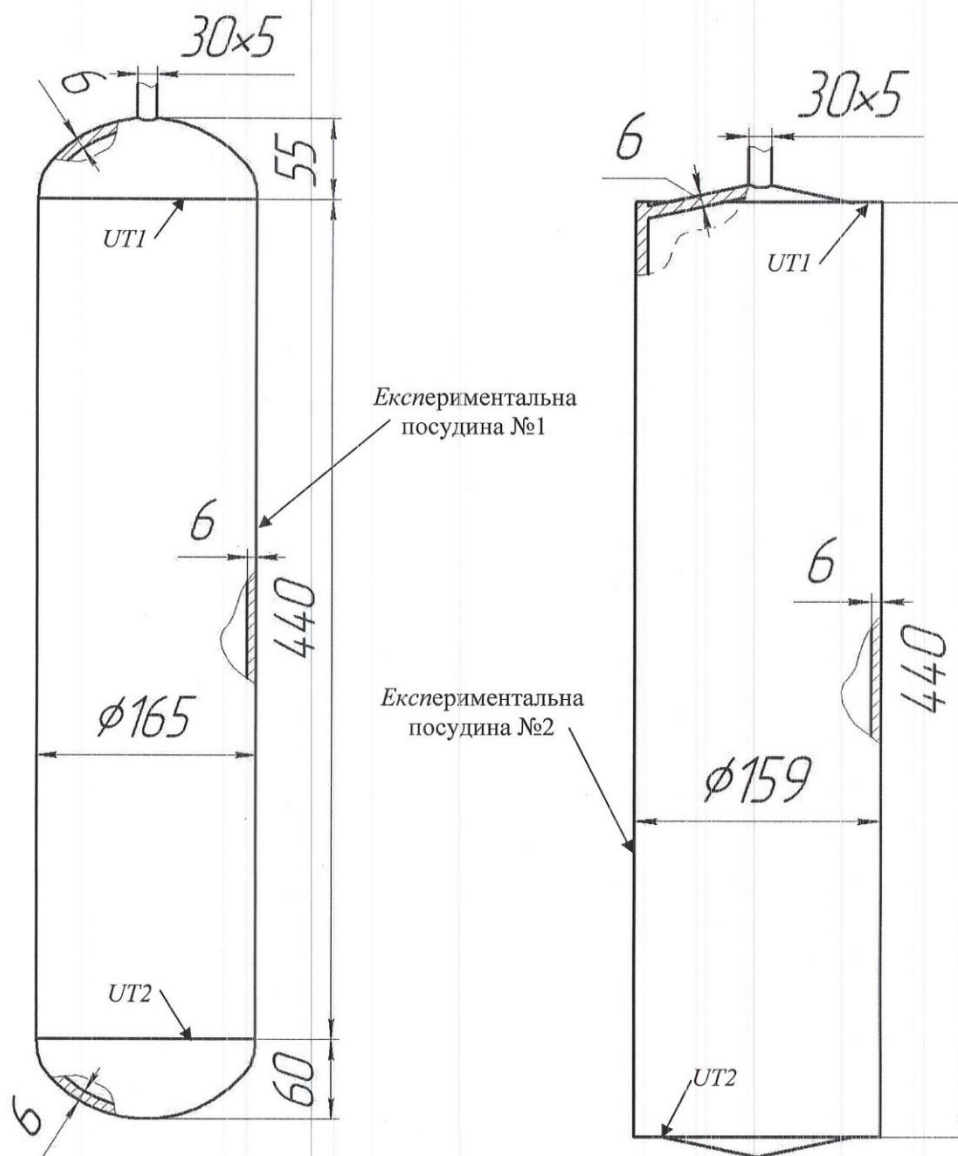
Фахівець з НК _____



В. Б. Проців, УТ, II рівень,
посв. № 33020 видане 18.08.2016 р.

ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд»

Карта-схема обстеження експериментальних посудин №1 та №2



UT1...UTn – зварні шви які піддавалися ультразвуковому контролю

Схему розробив
Фахівець з НК

В. Б. Проців, УТ, II рівень,
посв. № 33020 видане 18.08.2016 р.

ДОДАТОК Д

Акт промислової апробації методики визначення напружень у стінці посудин, що працюють під тиском, в умовах РВУ «ЛЬВІВАВТОГАЗ», ДП «УКРАВТОГАЗ» та ПАТ «УКРСПЕЦТРАНСГАЗ»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Головний інженер

РВУ «ЛЬВІВАВТОГАЗ»

ДП «УКРАВТОГАЗ»

НАК «Нафтогаз України»

Швець Є. П.

«17» 02 2017 р.



АКТ

промислової апробації способу визначення напружень у стінці посудин, що працюють під тиском

Робоча група у складі:

голови – Процика І. Я. – начальника служби експлуатації та ремонту АГНКС РВУ «ЛЬВІВАВТОГАЗ», ДП «УКРАВТОГАЗ», НАК «Нафтогаз України»,

і членів робочої групи:

- 1 Городецького Т. В. – провідного інженера РВУ «ЛЬВІВАВТОГАЗ», ДП «УКРАВТОГАЗ», НАК «Нафтогаз України»,
- 2 Мельничука Р. В. – начальника АГНКС-Львів 3, РВУ «ЛЬВІВАВТОГАЗ», ДП «УКРАВТОГАЗ», НАК «Нафтогаз України»,
- 3 Козакевича О. І. – заступника начальника служби експлуатації та ремонту АГНКС РВУ «ЛЬВІВАВТОГАЗ», ДП «УКРАВТОГАЗ», НАК «Нафтогаз України»,
- 4 Карпапа А. М. – начальника відділу випробувально-діагностичного центру об'єктів котлонагляду (ВДЦ ОК) ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд»,
- 5 Власійчука І. М. – головного інженера ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд»,

склали цей акт про таке:

1 17.02.2017 р. робоча група здійснила апробацію способу визначення напружень у стінці посудини, що працює під тиском з використанням запропонованої методології комплексного врахування параметрів (коерцитивна сила, твердість, питомий електричний опір та магнітний параметр).

2 Робочій групі були надані:

- опис способу контролю інформативних параметрів, за якими визначають напруження у стінках посудин, що працюють під тиском;

Продовження додатку Д

- результати попередньо проведених експериментальних досліджень у лабораторії випробувального центру ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд» та ІФНТУНГ;
- інформаційно-вимірвальну систему ІВС-І2, твердомір контактнo-резонансний ТКР-35 та динамічний ТД-32, магнітний структуроскоп (коерцитиметр) КРМ-ЦК та мікроомметр БСМ-010-2 (рисунок 1).



Рисунок 1 – Засоби для вимірювання інформативних параметрів, передбачені методикою контролю

- 3 Робоча група розглянула запропоновані матеріали та погодилася провести промислову апробацію.
- 4 Робоча група провела апробацію способу визначення напружень у стінці посудин, що працюють під тиском на території АГНКС-Львів з РВУ «ЛЬВІВАВТОГАЗ».
- 5 Дослідження проводилися на двох посудинах, що працюють під тиском (рисунок 2), а саме: акумулятори газу (назва – балони для метану, рік виготовлення – 1986, внутрішній діаметр – 376 мм, товщина стінки – 25,0 мм, довжина – 2620 мм, тип днищ – горловини).

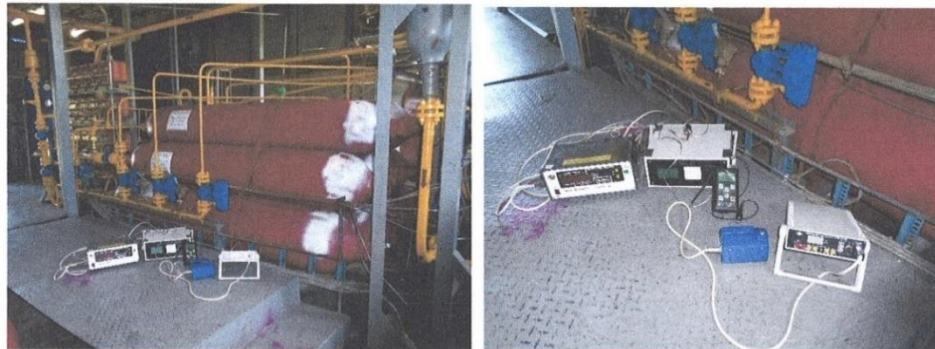


Рисунок 2 – Вимірювання інформативних параметрів передбачених методикою контролю

- 6 Контроль проводився із метою перевірки рівня напружень у стінці посудин відповідно до розробленої методики контролю.
- 7 Після проведення контролю, були отримані результати контролю (таблиця 1, 2) та розраховані значення напружень за комплексом виміряних параметрів (таблиця 3).

Продовження додатку Д

Таблиця 1 – Результати контролю фізичних параметрів металу стінки акумулятора газу (балон для метану) №1

Назва	1-переріз	2-переріз	3-переріз
	За тиском 10,0 МПа		
Нс	4,2; 4,2; 4,3	4,2; 4,4; 4,3	4,3; 4,3; 4,6
Нб	151; 155; 149	152; 151; 159	150; 164; 162
ρ	22,46; 22,43; 23,41	22,0; 23,31; 24,10	23,10; 23,20; 24,13
I2	21483,2; 21462,3; 21356,4	21523,2; 21562,3; 21756,4	21383,2; 21456,3; 21556,4
	За тиском 15,0 МПа		
Нс	5,3; 5,2; 5,5	5,2; 5,4; 5,5	5,8; 5,3; 5,6
Нб	141; 138; 136	136; 140; 149	139; 137; 142
ρ	21,40; 22,00; 22,13	21,0; 22,30; 22,10	22,11; 22,50; 21,73
I2	21282,2; 21252,3; 21255,4	21228,2; 21222,3; 21236,4	21253,2; 21256,3; 21226,4
	За тиском 20,0 МПа		
Нс	6,5; 6,2; 6,3	6,2; 6,6; 6,0	6,4; 6,5; 6,6
Нб	132; 135; 130	132; 132; 134	131; 128; 133
ρ	21,41; 21,40; 21,40	22,0; 21,31; 21,10	22,10; 21,20; 21,18
I2	21243,1; 21242,2; 21356,1	21453,1; 21422,5; 21226,5	21233,8; 21306,1; 21246,5

Таблиця 2 – Результати контролю фізичних параметрів металу стінки акумулятора газу (балон для метану) №2

Назва	1-переріз	2-переріз	3-переріз
	За тиском 10,0 МПа		
Нс	4,3; 4,4; 4,3	4,3; 4,3; 4,3	4,1; 4,5; 4,4
Нб	153; 155; 148	150; 151; 150	155; 161; 162
ρ	22,42; 22,43; 23,43	22,2; 22,31; 24,10	23,20; 23,21; 24,05
I2	21484,2; 21469,3; 21456,4	21633,2; 21422,3; 21696,4	21363,2; 21416,3; 21496,4
	За тиском 15,0 МПа		
Нс	5,1; 5,5; 5,6	5,2; 5,5; 5,5	5,7; 5,3; 5,9
Нб	141; 139; 139	137; 141; 147	140; 139; 142
ρ	21,30; 22,10; 22,15	21,10; 22,50; 22,20	22,12; 22,30; 21,62
I2	21262,2; 21272,3; 21265,4	21248,2; 21232,3; 21236,4	21243,2; 21266,3; 21256,4
	За тиском 20,0 МПа		
Нс	6,4; 6,4; 6,5	6,2; 6,6; 6,0	6,4; 6,5; 6,6
Нб	1392; 1365; 132	133; 133; 135	138; 129; 131
ρ	21,44; 21,42; 21,43	22,30; 21,32; 21,20	22,20; 21,20; 21,15
I2	21252,1; 2125,2; 21356,1	21423,1; 21452,5; 21236,5	21253,8; 21316,1; 21286,5

Продовження додатку Д

Таблиця 3 – Результати розрахованих значень напружень

№п/п	Акумулятор газу (балон для метану) №1			Акумулятор газу (балон для метану) №2		
	P, МПа	σ_p , МПа	σ_e , МПа	P, МПа	σ_p , МПа	σ_e , МПа
1	10,0	83,3	85,6	10,0	83,3	90,9
2	15,0	125,0	128,6	15,0	125,0	131,1
3	20,0	166,7	170,1	20,0	166,7	173,0
Середня відносна похибка, МПа			4,3%	Середня відносна похибка, МПа		9,1%

σ_p – розраховане значення напруження за ГОСТ – 14249-89;







σ_e – значення напруження розраховане за комплексом вимірних інформативних параметрів.

8 Робочою групою встановлені наступні недоліки:

- запропонована методика потребує використання декількох технічних засобів для вимірювання інформативних параметрів, які потребують підключення до окремих джерел живлення, що є не зручним у процесі вимірювання;
- процес визначення напружень у стінках посудин, що працюють під тиском потребує залучення ЕОМ та додаткової витрати часу.

9 Робоча група встановила, що метод визначення напружень пройшов успішну промислову апробацію та може бути використаний для контролю рівня та визначення напружень у стінці посудин, що працюють під тиском.

Члени робочої групи:

 Проник І. Я.
 Городецький Т. В.
 Мельничук Р. В.
 Козакевич О. І.
 Карпаш А. М.
 Власійчук І.

Продовження додатку Д

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Перший заступник голови
правління

ПАТ «УКРСПЕЦТРАНСГАЗ»



Федорович Б. В.

3 2017 р.

АКТ

промислової апробації способу визначення напружень у стінці посудин, що працюють під тиском

Робоча група у складі:

голови – Костур Ф. Ф. – начальник відділу охорони праці, екології, технічного нагляду та пожежної безпеки ПАТ «Укрспецтрансгаз»

і членів робочої групи:

- 1 Журов І. Т. – начальник ремонтно-експлуатаційної служби ПАТ «Укрспецтрансгаз»,
- 2 Роп'яник Ю. З. – інженер відділу охорони праці, екології, технічного нагляду та пожежної безпеки ПАТ «Укрспецтрансгаз»,
- 3 Карпаша А. М. – начальника відділу випробувально-діагностичного центру об'єктів котлонагляду (ВДЦ ОК) ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд»,
- 4 Цюцяк І. І. – радник директора, технічний експерт у нафтогазовидобувній промисловості ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд»,

склали цей акт про таке:

1 02.03.2017 р. робоча група здійснила апробацію способу визначення напружень у стінці посудини, що працює під тиском з використанням запропонованої методології комплексного врахування параметрів (коерцитивна сила, твердість, питомий електричний опір та магнітний параметр).

2 Робочій групі були надані:

- опис способу контролю інформативних параметрів, за якими визначають напруження у стінках посудин, що працюють під тиском;
- результати попередньо проведених експериментальних досліджень у лабораторії випробувально центру ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд» та ІФНТУНГ;

Продовження додатку Д

- прилади та засоби контролю інформативних параметрів, а саме: інформаційно-вимірювальну систему ІВС-12, твердомір контактнo-резонансний та динамічний ТКР-35 та ТД-32, магнітний структуроскоп (коерцитиметр) КРМ-ЦК та мікроомметр БСМ-010-2 (рисунок 1).



Рисунок 1 – Засоби для вимірювання інформативних параметрів, передбачені методикою контролю

3 Робоча група розглянула запропоновані матеріали та погодилася провести промислову апробацію.

4 Робоча група провела апробацію способу визначення напружень у стінці посудини, що працює під тиском на території ремонтної дільниці ПАТ «УКРСПЕЦТРАНСГАЗ».

5 Об'єктом дослідження (рисунок 2) була посудина, що працюють під тиском, а саме: цистерна (робоче середовище – пропан, зав №2232, рік виготовлення – 1971, внутрішній діаметр – 2600 мм, товщина стінки – 24,0 мм, довжина – 9060 мм, тип днищ – еліптичне).

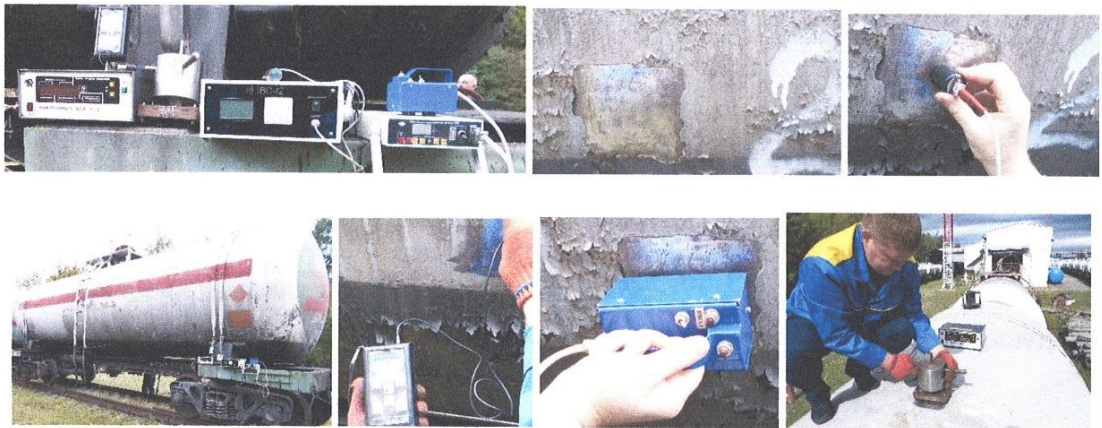


Рисунок 2 – Вимірювання інформативних параметрів необхідних для визначення напружень

6 Контроль проводився з метою оцінки рівня напружень у металі стінки цистерни відповідно до розробленої методики контролю.

7 Результати контролю отримані шляхом вимірювання представлені у таблиці 1, розраховані значення напружень за комплексом виміряних 3-ох та 4-ох інформативних параметрів наведені у таблиці 2,3.

Продовження додатку Д

Таблиця 1 – Результати контролю фізичних параметрів металу стінки посудини, що працює під тиском

Назва	1-переріз	2-переріз	3-переріз
	За тиском 1,5 МПа		
Нс	3,2; 3,1; 3,3	3,3; 3,4; 3,4	3,6; 3,5; 3,4
Нв	149; 151; 148	151; 151; 156	147; 144; 152
ρ	21,48; 21,44; 22,40	21,55; 22,41; 23,50	22,10; 22,30; 22,90
I2	21475,2; 21480,3; 21349,9	21512,2; 21545,3; 21689,4	21362,2; 21495,2; 21662,4
	За тиском 2,0 МПа		
Нс	4,9; 4,8; 4,5	4,5; 4,9; 5,0	4,8; 5,0; 5,1
Нв	142; 140; 139	139; 141; 150	141; 139; 144
ρ	21,30; 21,00; 22,13	22,0; 22,50; 22,30	22,17; 22,20; 21,00
I2	21118,5; 21252,3; 21255,9	21300,2; 21320,3; 21150,4	21159,2; 21321,3; 21298,4
	За тиском 2,5 МПа		
Нс	6,0; 5,9; 6,1	6,3; 6,5; 6,1	6,2; 6,0; 6,3
Нв	133; 135; 131	129; 130; 136	132; 132; 129
ρ	21,29; 21,25; 21,12	21,0; 21,10; 21,10	22,20; 21,00; 20,91
I2	21213,1; 21223,2; 21332,1	21475,1; 21421,5; 21229,5	21223,8; 21423,1; 21199,5

Нс – коерцитивна сила, Нв – твердість, ρ – електричний опір, I2- магнітний параметр

Таблиця 2 – Результати розрахованих значень напружень за 4-ма інформативними параметрами (твердість, коерцитивна сила, електричний опір та магнітний параметр)

№п/п	Цистерна для транспортування зрідженого газу		
	P, МПа	σ_p , МПа	σ_e , МПа
1	10,0	83,3	85,6
2	15,0	125,0	128,6
3	20,0	166,7	170,1
Середня відносна похибка, МПа			6,3%

σ_p – розраховане значення напруження за ГОСТ – 14249-89;

σ_e – значення напруження розраховане за комплексом вимірних інформативних параметрів.

Таблиця 3 – Результати розрахованих значень напружень за 3-ма інформативними параметрами (твердість, коерцитивна сила та електричний опір)

№п/п	Цистерна для транспортування зрідженого газу		
	P, МПа	σ_p , МПа	σ_e , МПа
1	10,0	83,3	85,1
2	15,0	125,0	127,9
3	20,0	166,7	169,8
Середня відносна похибка, МПа			5,2%

Кінець додатку Д


8 Робочою групою встановлені наступні недоліки:

- необхідність попередньої підготовки ділянок контролю посудин, що працюють під тиском (видалення бруду, мастильних матеріалів, фарбового та антикорозійного покриття, зачистка ділянки контролю до металічного блиску) для забезпечення надійного контакту і отримання необхідної точності під час вимірювання інформативних параметрів.

- для визначення комплексу інформативних параметрів необхідно залучати декілька технічних засобів, що відносяться до спеціалізованого обладнання.

9 Робоча група встановила, що метод визначення напружень пройшов успішну промислову апробацію та може бути використаний для контролю рівня та визначення напружень у стінці посудин, що працюють під тиском за 3 інформативними параметрами. За необхідності, використання 4-ох інформативних параметрів підвищує точність контролю рівня напружень.

Члени робочої групи:



Костур Ф. Ф.
Журов І. Т.
Роп'яник Ю. З.
Карпаш А. М.
Цюцяк І. І.

ДОДАТОК Е

Акт впровадження результатів дисертаційних досліджень під час експертного обстеження ППТ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ДП «Карпатський ЕТЦ»

О. Л. Александрович

15.06.2017 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
аспіранта кафедри енергетичного менеджменту і технічної діагностики
Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу
Карпаша Андрія Михайловича

на тему:

«Удосконалення методів контролю напруженого стану металоконструкцій довготривалої експлуатації (на прикладі АГНКС)»
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю
05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

Комісія у складі:


голови – Головного інженера ДП «Карпатський експертно-технічний центр» Піруга М. Б.
і членів комісії:

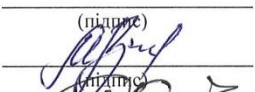
- 1 Гелетканич М. І. – технічний експерт ДП «Карпатський експертно-технічний центр»
- 2 Буній М. В. – провідний інженер ДП «Карпатський експертно-технічний центр»
- 3 Даниляк Я. Б. – технічний експерт ДП «Карпатський експертно-технічний центр»

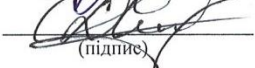
цим актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження (метод визначення та оцінки напружень посудин, що працюють під тиском, і методика проведення контролю) Карпаша Андрія Михайловича на тему «Удосконалення методів контролю напруженого стану металоконструкцій довготривалої експлуатації (на прикладі АГНКС)» використані фахівцями ДП «Карпатський експертно-технічний центр» під час проведення робіт з експертного обстеження посудин, що працюють під тиском, на підприємствах «Долина нафтогаз», ПАТ «УКРНАФТА».

В подальшому планується застосування результатів дисертаційного дослідження Карпаша А. М. фахівцями ДП «Карпатський експертно-технічний центр» під час дослідження інших об'єктів нафтогазопромислового комплексу, які експлуатують посудини, що працюють під тиском.

Комісія:


(підпис)


(підпис)


(підпис)

Піруг М. Б.
(ініціали, прізвище)

Гелетканич М. І.
(ініціали, прізвище)

Буній М. В.
(ініціали, прізвище)

Даниляк Я. Б.
(ініціали, прізвище)

ДОДАТОК Ж

Проект СОУ

Проект

СТАНДАРТ ОРГАНІЗАЦІЇ УКРАЇНИ

**ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ У СТІНКАХ ПОСУДИН,
ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПІД ТИСКОМ. МЕТОДИКА**

СОУ _____

Івано-Франківськ
2017

ЗМІСТ

1. Сфера застосування.....	1
2. Нормативні посилання.....	1
3. Терміни та визначення понять.....	2
4. Загальні положення.....	2
5. Вимоги до організацій та персоналу.....	3
6. Вимоги охорони праці під час проведення робіт.....	3
7. Аналіз технічної та оперативної документації щодо об'єкту контролю.....	4
8. Вимоги до апаратури.....	4
9. Обсяг та види робіт з визначення напружень у стінках посудин, що працюють під тиском.....	5
10. Організація та підготовка до проведення робіт з визначення напружень у стінках посудин, що працюють під тиском.....	5
11. Методика визначення напружень у стінках посудин, що працюють під тиском	6
12. Опрацювання результатів.....	7
Додатки:	
Додаток А Апаратура, рекомендована для використання під час вимірювання інформативних параметрів.....	9
Додаток Б Форма протоколу оформлення результатів контролю.....	10
Бібліографія.....	11

ПЕРЕДМОВА

1. РОЗРОБЛЕНО:

2. ВНЕСЕНО

3. ПОГОДЖЕНО

4. ПРИЙНЯТО та НАДАНО ЧИННОСТІ Наказом

5. ВВЕДЕНО ВПЕРШЕ

СТАНДАРТ ОРГАНІЗАЦІЇ УКРАЇНИ

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ У СТІНКАХ ПОСУДИН, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПІД ТИСКОМ

Методика

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЕНКАХ СОСУДОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Методика

Чинний від _____

1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

Цей стандарт поширюється на посудини, що працюють під тиском, призначені для здійснення в них хімічних і теплових процесів, а також для зберігання та перевезення стиснених, зріджених і розчинених газів та рідин.

Цей стандарт установлює порядок визначення напружень у стінках посудини, за результатами якого прийматимуть рішення щодо відповідності обладнання нормам безпеки, величини залишкового ресурсу обладнання і термінів наступного контролю.

Цей стандарт призначений для фахівців експертних організацій, які здійснюють контроль за фактичним технічним станом посудин, що працюють під тиском, у промисловості.

2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

ДСТУ 2389-94 Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення

ДСТУ 2681-94 Метрологія. Терміни та визначення

ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення

ДСТУ 2865-94 Контроль неруйнівний. Терміни та визначення

ДСТУ 1.1-2001 Національна стандартизація. Стандартизація та суміжні види діяльності. Терміни та визначення понять.

ДСТУ ISO/IEC 17020-2001 Загальні критерії щодо діяльності органів різного типу, що здійснюють інспектування

Продовження додатку Ж

ДСТУ ISO/IEC 17025-2001 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій

ДСТУ EN 473-2001 Неруйнівний контроль. Кваліфікація й сертифікація персоналу в галузі неруйнівного контролю

ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів

ДНАОП 0.00-1.07-94 "Правила будови і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском"

ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение

3 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ

3.1 В цьому стандарті використані такі терміни за ДСТУ 2389:

- технічне діагностування – визначення технічного стану об'єкта з означеною (заданою) точністю;
- технічний стан – стан, який характеризується в певний момент часу, за певних умов зовнішнього середовища значеннями параметрів, установлених технічною документацією на об'єкт;
- контроль (технічного стану) – перевірення відповідності значень параметрів об'єкта вимогам технічної документації та визначення на цій основі одного із заданих видів технічного стану в даний момент часу.

3.2 В цьому стандарті використані такі терміни за ДСТУ 2865:

- неруйнівний контроль – контроль якості продукції, за якого не повинна бути порушена придатність щодо застосування із повним збереженням з самого початку закладених функцій;
- метод неруйнівного контролю – правила застосування певних прийомів та засобів випробувань, за якими не повинна бути порушена придатність об'єкта щодо застосування;
- методика неруйнівного контролю – організаційно-технічний документ, який встановлює порядок та правила неруйнівного контролю об'єкта.

3.3 В цьому стандарті використані такі терміни за ДСТУ 2860:

- ресурс, технічний ресурс – сумарний наробіток об'єкта від початку його експлуатації чи поновлення після ремонту до переходу в граничний стан;
- залишковий ресурс – сумарний наробіток об'єкта від моменту контролю його технічного стану до переходу у граничний стан.

3.4 В цьому стандарті використані такі терміни за ДСТУ 2681:

- точність вимірювання – головна характеристика якості вимірювання, що відображає близькість до нуля систематичної похибки вимірювання;

Продовження додатку Ж

- збіжність (результатів) вимірювань – характеристика якості вимірювань, що відображає близькість повторних результатів вимірювань однієї й тієї ж величини в однакових умовах.

3.5 В цьому стандарті використані такі терміни за ДСТУ 1.1:

- протокол випробування (контролю) - документ, що містить результати випробувань (контролю) та іншу інформацію стосовно них.

4 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

4.1 Для визначення напружень у стінках посудин, що працюють під тиском, у даному стандарті використовують твердометрія, коерцитиметричний, електричний та магнітний методи неруйнівного контролю.

4.2 Для розрахунку напружень у стінках посудин, що працюють під тиском, застосовується алгоритм штучних нейронних мереж.

5 ВИМОГИ ДО ОРГАНІЗАЦІЙ ТА ПЕРСОНАЛУ

5.1 Право виконання робіт з неруйнівного контролю та визначення напружень у стінках посудин, що працюють під тиском, мають організації (лабораторії), які акредитовані на технічну компетентність згідно з ДСТУ ISO/IEC 17025 та ДСТУ ISO/IEC 17020 і мають дозвіл Держгірпромнагляду України на право проведення вказаних робіт.

5.2 Проводити неруйнівний контроль та визначення напружень у стінках посудин, що працюють під тиском, мають право, як правило, фахівці другого рівня, атестовані за ДНАОП 0.01-1.27, а також з урахуванням вимог європейського стандарту ДСТУ EN 473, як за методами, що застосовуються, так і за технічною діагностикою. Кваліфікація фахівця та право на проведення певного виду контролю повинні підтверджуватись діючими посвідченнями встановленого взірця.

5.3 До виконання робіт з неруйнівного контролю допускаються фахівці першого рівня кваліфікації під керівництвом фахівця більш високого рівня кваліфікації.

5.4 Фахівці повинні досконало володіти апаратурою та обладнанням, які використовуються для контролю, а також знати технічні вимоги до об'єкта контролю.

5.5 Фахівці повинні мати кваліфікаційну групу з електробезпеки не нижче другої.

6 ВИМОГИ ОХОРОНИ ПРАЦІ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ

6.1 Фахівці, які здійснюють визначення напружень у стінках посудин, що працюють під тиском, повинні регулярно проходити інструктажі з охорони праці, пожежної та електробезпеки і здавати іспити згідно з ДНАОП 0.00-1.21 та ДНАОП 0.00-1.07.

6.2 Апаратура, що використовується для визначення інформативних параметрів, повинна відповідати вимогам чинних стандартів та нормативних документів з охорони праці. Перед використанням апаратури необхідно вивчити вказівки з її безпечної експлуатації.

6.3 Перед підключенням апаратури до зовнішньої мережі живлення слід перевірити надійність заземлення та цілісність силових кабелів. Підключення (відключення) і заземлення апаратури на місці проведення контролю повинно здійснюватись з дозволу чергового електрика і в його присутності. Кабелі живлення та заземлення слід розміщувати таким чином, щоб виключити можливість їх пошкодження.

6.4 Фахівці, що здійснюють визначення напружень у стінках посудин, які працюють під тиском, повинні виконувати всі розпорядження особи, відповідальної за охорону праці на місці проведення робіт.

6.5 Фахівці повинні кожний раз проходити інструктаж з охорони праці на робочому місці на підприємстві, де буде проводитись неруйнівний контроль.

6.6 Робочий одяг операторів повинен відповідати вимогам норм і правил безпеки.

7 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ ТА ОПЕРАТИВНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ ЩОДО ОБ'ЄКТУ КОНТРОЛЮ

7.1 Цей стандарт визначає перелік технічної та оперативної інформації про об'єкт контролю, яка повинна бути зібрана перед проведенням досліджень на посудинах, що працюють під тиском, у промисловості. До неї відноситься:

- паспорт посудини;
- інформація про термін експлуатації об'єкта;
- відомості про аварії та відмови обладнання;
- результати усіх інших попередніх діагностичних обслідувань об'єктів, якщо вони проводилися;
- сертифікати на вироби (труби, елементи металокопструкцій тощо) та матеріали, з яких вони виготовлені.

7.2 Інформація є необхідна для визначення ділянок на металокопструкціях, на яких повинен здійснюватись контроль механічних характеристик. В першу чергу контролюванню підлягають ділянки, на яких очікується надмірна або значна концентрація напружень в ході експлуатації металокопструкції.

8 ВИМОГИ ДО АПАРАТУРИ

8.1 Апаратура та засоби вимірювальної техніки, які використовуються перед і під час проведення контролю посудин, що працюють під тиском, повинна знаходитись під метрологічним контролем. Її придатність до використання повинна підтверджуватись свідоцтвами про метрологічну атестацію або перевірку.

8.2 Перелік апаратури, рекомендованої для проведення контролю наведений в додатку А.

8.3 Перед початком роботи працездатність та точність вимірювання засобів повинна бути перевірена на зразках для настроювання або іншими методами у відповідності до експлуатаційної документації на неї.

8.4 В процесі проведення контролю збіжність результатів вимірювань підлягає періодичній перевірці на зразках для настроювання – через певне число вимірів або через певний час роботи апаратури (як правило, кожних чотири години), а також:

- після заміни функціональних блоків;
- після зміни типорозміру об'єкта контролю;
- у випадках, коли покази апаратури викликають сумніви;
- після виникнення ситуацій, які можуть впливати на точність показів.

9 ОБСЯГ ТА ВИДИ РОБІТ З ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ У СТІНКАХ ПОСУДИН, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПІД ТИСКОМ

9.1 Роботи з визначення напружень у стінках посудин, що працюють під тиском, включають попередні вимірювання комплексу інформативних параметрів:

- твердість;
- коерцитивна сила;
- електричний опір;
- магнітний параметр.

9.2 Для визначення значень інформативних параметрів необхідно застосовувати наступні методи контролю:

- твердометрія;
- коерцитиметричний;
- електричний;
- магнітний.

9.3 В залежності від умов або терміну експлуатації, на вимогу Власника контрольованого об'єкту чи наглядових органів, за неоднозначних результатів обстеження можуть передбачати додаткові види контролю.

Продовження додатку Ж

9.4 Для визначення напружень у стінках посудин, що працюють під тиском, необхідно провести розрахунки в спеціально розробленому програмному забезпеченні на портативному комп'ютері.

9.5 Результати вимірювання та розрахунку напружень у стінках посудин, що працюють під тиском, оформити у вигляді протоколів.

10 ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ПІДГОТОВКА ДО ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ З ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ У СТІНКАХ ПОСУДИН, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПІД ТИСКОМ

10.1 Для проведення робіт з визначення напружень у стінках посудин, що працюють під тиском, їх власник (представник організації, яка експлуатує металоконструкції) повинен:

- видати наказ про організацію обстеження посудини з призначенням відповідальної особи;
- підготувати сталеві конструкції до проведення контролю;
- надати представникам організації, яка проводить контроль, необхідну технічну документацію;
- за чергової оцінки технічного стану – надати результати попереднього технічного діагностування.

10.2 Організація, яка проводить контроль, повинна виконувати всі роботи в узгоджені з власником обладнання терміни та способи.

10.3 Перед початком контролю керівник робіт повинен пересвідчитись в наявності всіх необхідних для його проведення матеріалів, приладів, зразків та інструментів і підготувати апаратуру у відповідності з її експлуатаційною документацією.

10.4 Ділянки елементів сталевих конструкцій, які підлягають контролю, необхідно очистити від бруду, фарби, рихлих продуктів корозії, залишків мастила, а потім промити розчинником (уайт-спіритом, гасом, тощо).

10.5 За умови відповідності геометричних параметрів об'єктів нормативним значенням та відсутності дефектів типу порушення суцільності проводять вимірювання значень інформативних параметрів.

10.6 У випадку відсутності попередньої інформації про об'єкт контролю чи неможливості визначення інформативних параметрів неруйнівними методами, рекомендованим є використання руйнівних методів з наступною вирізкою зразків з відповідного елемента металоконструкції (якщо це можливо) і проведення їх випробування відповідно до ГОСТ 1497.

11 МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ У СТІНКАХ ПОСУДИН, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПІД ТИСКОМ

11.1 Методика визначення напружень у стінках посудин, що працюють під тиском, включає в себе наступні операції:

- ознайомлення з об'єктом контролю;
- складання програми робіт;
- попередня підготовка поверхні досліджуваної посудини;
- налаштування апаратури та засобів контролю;
- вимірювання інформативних параметрів: твердості, електричного опору, коерцитивної сили, магнітного параметру;
- введення отриманих значень інформативних параметрів у розрахунковий модуль;
- отримання результатів розрахунку напружень у стінках посудини, що працює під тиском за допомогою програмного середовища Matlab;
- аналізування результатів контролю та оформлення протоколу.

11.2 Вимірювання твердості

11.2.1 Вимірювання твердості металу посудини рекомендується проводити з використанням динамічних твердомірів типу ТД-32, або контактнорезонансних типу ТКР-35, або аналогічних. Твердість визначається за шкалою Брінеля (НВ).

11.2.2 Обсяги та зони контролю визначаються в залежності від ступеню навантаженості або пошкодженості елементів, а також, якщо є підозра на неоднорідність механічних характеристик однотипних елементів металоконструкцій. Для визначення твердості металоконструкцій рекомендується проводити контроль не менше як у трьох перерізах ППТ і не менше як у 4-ох точках.

11.2.3 Методика проведення вимірів твердості серійними динамічними твердомірами наводиться в їх експлуатаційній документації.

11.2.4 Результати вимірювання твердості заносять до протоколу вимірювання, а також вводять у спеціально розроблений розрахунковий модуль з метою їх опрацювання.

11.3 Визначення електричного опору

11.3.1 Визначення електричного опору металоконструкцій рекомендується проводити з використанням установки, яка складається з атестованого мікроомметра типу БСЗ-010-2 та контактного чотиризондового вимірювального

перетворювача. Мікроомметр дозволяє вимірювати активний електричний опір на чотирьох діапазонах в одноразовому і багаторазовому режимах, проводити автокалібрування за зовнішніми еталонами.

11.3.2 Для визначення інформативного параметру рекомендується здійснити 3-разові вимірювання електричного опору не менш як у 3-ох перерізах металоконструкції посудини.

11.3.3 Порядок вимірювання електричного опору описано у відповідній експлуатаційній документації на прилад.

11.3.4 Результати визначення електричного опору заносять до протоколу вимірювання, а також вводять у спеціально розроблений розрахунковий модуль з метою їх опрацювання.

11.4 Визначення коерцитивної сили

11.4.1 Визначення коерцитивної сили металоконструкцій рекомендується проводити з використанням коерцитиметра КРМ-ЦК з П-подібним намагнічувачем.

11.4.2 Для визначення інформативного параметру рекомендується здійснити вимірювання не менш як у трьох перерізах металоконструкцій посудин та не менш як 4 вимірювання у одному перерізі.

11.4.3 Порядок вимірювання коерцитивної сили описано у відповідній експлуатаційній документації на прилад.

11.4.4 Результати визначення коерцитивної сили заносять до протоколу вимірювання, а також вводять у спеціально розроблений розрахунковий модуль з метою їх опрацювання.

11.5 Визначення магнітного параметру I₂

11.5.1 Визначення магнітного параметру металоконструкцій рекомендується проводити з використанням приладу ІВС-І2.

11.5.2 Для визначення інформативного параметру рекомендується здійснити 3-разові вимірювання не менш, як у 3-ох перерізах посудини та не менш як у 4-ох ділянках одного перерізу.

11.5.3 Порядок вимірювання магнітного параметру описано у відповідній експлуатаційній документації на прилад.

11.5.3 Результати визначення магнітного параметру заносять до протоколу вимірювання, а також вводять у спеціально розроблений розрахунковий модуль з метою їх опрацювання.

Продовження додатку Ж

11.6 Для опрацювання інформації, яка отримана за результатами вимірювання значень інформативних параметрів, служить портативний комп'ютер, який виконує розрахунок значення напруження за одержаними даними відповідно до алгоритму розрахунку, що знаходиться в пам'яті комп'ютера.

11.7 Після введення у портативний комп'ютер вимірних значень твердості, електричного опору, коерцитивної сили та магнітного параметру відбувається розрахунок напружень за розробленим алгоритмом штучних нейронних мереж.

12 ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

12.1 Результати контролю та розрахунку напружень за розробленим алгоритмом оформляються протоколом (додаток Б).

12.2 Протокол контролю обов'язково повинен містити:

- ідентифікаційні дані про об'єкт контролю (тип, заводський або інший номер, тощо);
- дані про організацію та спеціалістів, які здійснили контроль (рівень кваліфікації, номер посвідчення, прізвище);
- дані про види, методи та обсяги проведення контролю, а також про прилади і апаратуру, які застосовують під час контролю, з зазначенням дати їх перевірки або метрологічної атестації;
- перелік нормативних документів, згідно з якими проводиться контроль;
- значення вимірних інформативних параметрів;
- результати розрахунку напружень у стінках посудини, що працює під тиском.

12.3 У випадку наявності дефектів в протоколі повинна бути детальна інформація про виявлені дефекти з зазначенням їх місцезнаходження. Протокол може бути доповнений схемами, ескізами, та іншими необхідними матеріалами.

12.4 Протоколи контролю повинні бути внесені в облікові документи, які ведуться на підприємстві, де здійснюють контроль, та на підприємстві, яке здійснювало контроль.

12.5 Одержані результати є вихідними даними для визначення напружень у стінках посудин, що працюють під тиском, та підставою для прийняття рішення відповідними службами про необхідність проведення ремонту або виведення їх з подальшої експлуатації.

**ДОДАТОК А
(довідковий)****Апаратура, рекомендована для використання під час вимірювання
інформативних параметрів**

- А.1** Твердоміри динамічні типу ТДМ-2.
- А.2** Твердоміри контактнo-резонансні типу ТКР-35.
- А.3** Мікроомметр БСЗ-010-2.
- А.4** Коерцитиметр КРМ-ЦК з П-подібним намагнічувачем.
- А.5** ІВС-І2 .

Примітка. Зазначені методики можуть бути реалізовані за допомогою інших приладів та установок з характеристиками, не гіршими, ніж у наведеного в переліку обладнання.

Продовження додатку Ж

ДОДАТОК Б (довідковий)

Форма протоколу оформлення результатів контролю

ЗАТВЕРДЖЕНО

Головний інженер
підприємства

 _____ /ПІБ/
 підпис

 «_____»
 _____ 20_____ р.

ПРОТОКОЛ визначення напружень у стінках посудини, що працює під тиском

Назва обладнання: _____

Підприємство-власник: _____

Технічні засоби: _____

Нормодокумент на контроль: _____

Результати контролю:

Контрольований параметр	Вимірне значення	Вимірне значення	Вимірне значення
Твердість, НВ			
Коерцитивна сила, А/см			
Електричний опір, мкОм			
Магнітний параметр I ₂ , ум.од.			

Результати розрахованих значень напружень:

	P, МПа	σ _e , МПа
1		
2		
3		

Продовження додатку Ж

σ_c – значення напруження розраховане за комплексом вимірних інформативних параметрів

ВИСНОВКИ:

«_____» _____ 20____ р.

Підписи фахівців, які провели контроль.

Бібліографія

1. Карпаш А.М. Аналіз відомих методів контролю фізико-механічних характеристик металу. *Нафтогазова енергетика*. 2012. №1(17). С. 70-82.
2. 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.
3. 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.
4. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс: 2-е издание / Пер. с англ. С.Хайкин. М.: ИД «Вильямс», 2006. 1104 с.
5. 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.

УДК 620.178.311

Ключові слова: посудина, що працює під тиском, методика, неруйнівний контроль, інформативні параметри, напруження.

ДОДАТОК И

Анкета опитувальник про визначення причин непридатності посудин, що працюють під тиском

АНКЕТА-ОПИТУВАЛЬНИК

ДП «Карпатський експертно-технічний центр»

для визначення причин непридатності посудин, що працюють під тиском, які були визначені, як непридатні, за результатами висновків експерних обстежень

1. Загальна кількість посудин, що працюють під тиском, у яких закінчився граничний термін експлуатації і яким було проведено експертне обстеження:

- 2015 р. – 417 одиниць;
- 2016 р. – 345 одиниць;

2. Кількість посудин, що працюють під тиском, які були визнані, на основі висновку експертизи, як непридатні:

- 2015 р. – 21 одиниць;
- 2016 р. – 14 одиниць;

3. Причини зниження технологічних параметрів та формулювання висновку «посудина непридатна до подальшої експлуатації»:

Причини, % (2015-2016 рр.)		
Виявлення критичних дефектів (тріщина, корозійні ушкодження, зменшення товщини металу)	Зменшення механічних властивостей матеріалу і невідповідність умовам міцності згідно з розрахунком	Порушення умов експлуатації
<u>41,0</u>	<u>51,0</u>	<u>8,0</u>

Звєтуник директор
(посада)



О.С. Зінчук
(прізвище, ініціали)

Продовження додатку И

АНКЕТА-ОПИТУВАЛЬНИК

ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд»

для визначення причин непридатності посудин, що працюють під тиском, які були визначені, як непридатні, за результатами висновків експертних обстежень

1. Загальна кількість посудин, що працюють під тиском, у яких закінчився граничний термін експлуатації і яким було проведено експертне обстеження:

- 2015 р. – 576 одиниць;
- 2016 р. – 928 одиниць;

2. Кількість посудин, що працюють під тиском, які були визнані, на основі висновку експертизи, як непридатні:

- 2015 р. – 29 одиниць;
- 2016 р. – 57 одиниць;

3. Причини зниження технологічних параметрів та формулювання висновку «посудина непридатна до подальшої експлуатації»:

Причини, % (2015-2016 рр.)		
Виявлення критичних дефектів (тріщина, корозійні ушкодження, зменшення товщини металу)	Зменшення механічних властивостей матеріалу і невідповідність умовам міцності згідно з розрахунком	Порушення умов експлуатації
<u>34,0</u>	<u>54,0</u>	<u>12,0</u>

Головний інженер
(Посада)



Власійчук І. М.
(Прізвище, ініціали)

Кінець додатку II

АНКЕТА-ОПИТУВАЛЬНИК

ГПУ «ЛЬВІВГАЗВИДОБУВАННЯ», ПАТ «УКРГАЗВИДОБУВАННЯ»

для визначення причин непридатності посудин, що працюють під тиском

1. Загальна кількість посудин, що працюють під тиском, які експлуатуються в умовах ГПУ «ЛЬВІВГАЗВИДОБУВАННЯ» – 612 шт.
2. Параметри експлуатації: тиск – 0 - 12,0 МПа; температура – -30 - +120°С; робоче середовище – природний газ, вода, масло; газоконденсат, метанол;
3. Кількість посудин, що працюють під тиском, у яких закінчився граничний термін експлуатації:

Роки	
до 2010	До 2015
198	92

4. Кількість посудин, що працюють під тиском, у яких понижені паспортні характеристики:

Роки	
до 2010	До 2015
26	19

5. Кількість посудин, що працюють під тиском, які були тимчасово або повністю виведені з експлуатації у зв'язку із:

Рік	Реконструкція	Поява дефектів	Зниження механічних властивостей, (не відповідність умовам міцності згідно розрахунку)
до 2010	29	9	9
До 2015	19	6	7

Старший інженер з технагляду:



Матвій Т.Я.