

## УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВОДІВ ТА ПОСУДИН, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПІД ТИСКОМ

А. М. КАРПАШ<sup>1</sup>, Н. Л. ТАЦАКОВИЧ<sup>2</sup>, М. О. КАРПАШ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ТзОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд». 76002, м. Івано-Франківськ, вул. Микитинецька, 5а.

E-mail: zond.ndt@gmail.com

<sup>2</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

E-mail: mkarpash@nung.edu.ua

Досліджувалась можливість використання результатів вимірювання засобами неруйнівного контролю структурно-чутливих характеристик (коефіцієнт теплопровідності, питома електропровідність, ударна в'язкість, твердість) для визначення місця і рівня напружень у матеріалі металокопункцій довготривалої експлуатації. Проведено серію експериментальних досліджень на спеціально виготовлених дослідних зразках у вигляді масштабованих посудин, що працюють під тиском. Враховуючи суттєву нелінійність й різну точність і достовірність вимірюваних інформативних параметрів було прийнято рішення застосувати алгоритми штучних нейронних мереж для опрацювання масиви експериментальних даних. За результатами проведених досліджень доведено можливість визначення напружень у стінках посудин за трьома інформативними параметрами: твердість, питомий електричний опір, коефіцієнт корозійної сили й одержано аналітичну залежність матричного рівняння для визначення рівня напружень у матеріалах металокопункцій. *Бібліогр.* 15, табл. 5, рис. 3.

*Ключові слова:* напруження, інформативні параметри, багатопараметрова діагностика, алгоритми штучних нейронних мереж

Забезпечення експлуатаційної надійності устаткування та металокопункцій з тривалим терміном експлуатації є важливим та актуальним завданням, зокрема для об'єктів нафтогазового комплексу держави – основні фонди у ньому понад 70 % відпрацювали свій ресурс чи близькі до його вичерпання [1]. Одним із найефективніших методів попередження відмов згаданих об'єктів є його періодичний контроль методами та засобами технічної діагностики та неруйнівного контролю [2]. Проте, зважаючи на той факт, що значна частина обладнання в нафтогазовому комплексі експлуатується в екстремальних умовах (значні знакозмінні навантаження, температурні коливання, вплив корозійних чинників тощо) ймовірність виникнення та швидкість росту дефектів типу тріщини в багатьох випадках не відповідає загальноприйнятим підходам [3].

Тому перед дослідниками постає завдання пошуку нових підходів як до виявлення вже наявних дефектів, так і до визначення місць їх потенційного зародження, а саме величини та рівня напружень, що виникають в металокопункціях довготривалої експлуатації. Типово місця виникнення напружень у технологічному устаткуванні визначають аналітичними методами або завдяки виробничому досвіду персоналу, який його обслуговує [4]. Основними методами вимірювання напружень у матеріалі є тензометричний [5], метод магнітної пам'яті [6], магнітний через вимірювання

коерцитивної сили [7]. Також було встановлено, що тільки деякі з небагатьох інформативних параметрів, які можна вимірювати засобами неруйнівного контролю, є чутливими до зміни структури матеріалу, а також рівня напружень у матеріалі металокопункції – йдеться про коефіцієнт теплопровідності, питомий електричний опір, ударну в'язкість і твердість [8]. Тому було поставлено завдання дослідити можливість використання згаданих вище параметрів для оцінки рівня напружень у матеріалі металокопункцій. З цією метою було проведено серію експериментальних досліджень на спеціально створених дослідних зразках у вигляді масштабованих посудин, що працюють під тиском [9]. При цьому зауважимо, що тут і далі йтиметься про нормальні напруження, що виникають в стінці обичайки посудини під тиском, або трубопроводу. На модельні посудини ступенево подавалося навантаження до досягнення границі витривалості і виконувалось вимірювання низки параметрів: твердості, коерцитивної сили, питомого електричного опору та спеціального магнітного параметра. У результаті проведення двох серій експериментів одержано чотири масиви вимірюваних даних [10].

Головним завданням експериментів було змоделювати та виготовити дослідні зразки у вигляді посудин, що працюють під тиском, провести випробування цих зразків за попередньо складеним алгоритмом збільшення навантаження та отримати

мати необхідний комплекс структурно-чутливих інформативних параметрів, за яким можна характеризувати та визначати напружений стан металевих конструкцій.

Після виготовлення експериментальні зразки були перевірені розрахунком на міцність, регламентованим у роботах [11, 12], та за допомогою програми Solidworks 2014 SPO [13]. Результати розрахунку за трьома методиками приблизно співпали і знаходилися у межах 253...273 МПа [9]. Отримані результати дали змогу розробити схеми проведення вимірювання інформативних параметрів та покрокового алгоритму зміни прикладеного навантаження. До даного комплексу інформативних параметрів входять виміряні значення твердості матеріалу ( $H_b$ ), коерцитивної сили ( $H_c$ ), магнітного параметру ( $I_2$ ), питомого електричного опору ( $\rho$ ) та контроль геометричних параметрів експериментальних зразків.

Під час кожного поступового підняття тиску (1 цикл підняття тиску рівний 1 МПа) були проведені вимірювання засобами та приладами, які представляли окремі методи неруйнівного контролю, з метою отримання інформативних параметрів, які є чутливими до змін у структурі металу і за допомогою яких можна охарактеризувати рівень напружень у відповідальних елементах металоконструкції.

Результати графічного та кореляційного аналізу отриманих результатів двох експериментальних посудин вказали на нелінійність зв'язку рівня напружень із досліджуваними параметрами, а також можливість нелінійних кореляцій між самими інформативними параметрами.

Враховуючи суттєву нелінійність зв'язків виміряних інформативних параметрів із значеннями прикладених навантажень (напружень), що значно різняться між собою за повторюваністю, точністю й достовірністю і можуть бути взаємнокор-

рельованими, було вирішено використати успішно апробовану методологію багатопараметрової діагностики з використанням алгоритмів штучних нейронних мереж [14].

Метою використання алгоритмів штучних нейронних мереж є одночасне врахування кількох експериментально одержаних параметрів, що дає можливість оцінити напружений стан посудин, які працюють під тиском, комплексним способом, а також встановити між інформативними параметрами та напруженнями аналітичний зв'язок. Додатковим завданням досліджень слугувало встановлення оптимального набору інформативних параметрів для найбільш точного визначення напружень за мінімальною кількістю 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 [0-1].

Другий етап роботи з нейронною мережею полягає у формуванні і тренуванні навчальних пар. У нашому випадку були сформовані навчальні пари з трьох ( $H_b_1, H_c_1, \rho_1$ ) та чотирьох ( $H_b_1, H_c_1, \rho_1, I_2_1$ ) інформативних параметрів із відповідними розрахунковими значеннями напружень ( $\sigma_p$ ) (табл. 1). Виміряні значення, які формують навчальні пари для тренування, бралися із першої зони (1-го перерізу) експериментальної посудини № 1.

Наведені вище максимально спостережні значення по кожному вимірюваному параметру були зведені до діапазону від 0 до 1.

Таблиця 1. Результати вимірювань, які формують навчальні пари для тренування з 3-х і 4-х параметрів

Номер циклу	$H_b_1$	$H_c_1$	$\rho_1$	$I_2_1$	$\sigma_p$	Номер циклу	$H_b_1$	$H_c_1$	$\rho_1$	$I_2_1$	$\sigma_p$
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						

Наступним кроком було створення нейромережі 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  $tansig$ , а у вихідному нейроні відображений  $logsig$  [15] (рис. 1, а, б).

Після стандартного процесу навчання на навчальних парах, сформованих із даних першої зони (1-го перерізу) експериментального зразка № 1, наступним етапом є тестування натренованих нейромереж. Дані для тестування, а саме тестові пари для трьох ( $HB_3, HC_3, \rho_3$ ) і чотирьох ( $HB_3, HC_3, \rho_3, I2_3$ ) параметрів бралися з третьої зони (3-го перерізу) експериментальної посудини № 1 (табл. 2). Вони не використовувалися під час процесу тренування і є невідомими для нейромережі.

Після тестування одержано табличні та графічні результати тестового напруження ( $\sigma_p$ ) для 3-х та 4-х інформативних параметрів (табл. 3, рис. 2).

Зображені на рис. 2, а, б результати свідчать про високу точність і повторюваність результатів розрахунку напружень у стінці змодельованих посудин під тиском по всьому діапазону значень. Це підтверджується кількісними оцінками – під час

визначення тестового значення напруження  $\sigma_p$  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 апроксимації напруження в стінці посудини як функції інформативних 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 посудини, що працює під тиском № 2. Для початку перевірки нейромережі були сформовані тестові пари з 3-х ( $HB_1-3, HC_1-3, \rho_1-3$ ) та 4-ох ( $HB_1-3, HC_1-3, \rho_1-3, I2_1-3$ ) параметрів (табл. 4). Дані взято з 3-х зон (3-х перерізів) посудини, рівномірно розташованих вздовж осі експериментального зразка.

Після виконаної перевірки нейромережі з невідомими даними на відповідно сформованих

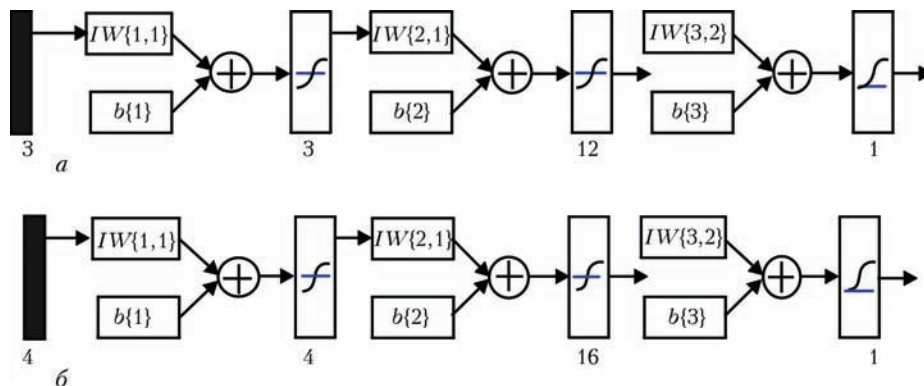


Рис. 1. Архітектура нейромережі для визначення напружень: а – за трьома параметрами; б – за чотирма параметрами

Таблиця 2. Результати вимірювань, які формують тестові пари для тестування з 3-х та 4-х параметрів

Номер циклу	$HB_3$	$HC_3$	$\rho_3$	$I2_3$	$\sigma_p$	Номер циклу	$HB_3$	$HC_3$	$\rho_3$	$I2_3$	$\sigma_p$
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						

Таблица 3. Результаты тестового нагружения для 3-х та 4-х параметрів

Для 3-х параметрів								
Номер циклу	$\sigma_p$	$\sigma_t$	Номер циклу	$\sigma_p$	$\sigma_t$	Номер циклу	$\sigma_p$	$\sigma_t$
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
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-х параметрів								
Номер циклу	$\sigma_p$	$\sigma_t$	Номер циклу	$\sigma_p$	$\sigma_t$	Номер циклу	$\sigma_p$	$\sigma_t$
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			

Таблица 4. Тестові набори даних з 3-х і 4-х параметрів для перевірки нейромережі

Номер	HB_1-3	HC_1-3	P_1-3	I2_1-3	$\sigma_p$	Номер	HB_1-3	HC_1-3	$\rho_{1-3}$	I2_1-3	$\sigma_p$
1	161	4,6000	21,1900	2,1625	0	10	140	5,5000	22,0400	2,1500	212,8000
	165	4,4000	22,3800	2,1389	30,4000		165	5,1000	21,2600	2,1569	212,8000
2	175	4,5000	21,8200	2,1641	30,4000	11	156	5,5000	22,2300	2,1405	228,0000
	154	4,5000	21,1200	2,1735	30,4000		139	5,7000	22,0100	2,1871	228,0000
3	160	4,5000	28,2000	2,1533	60,8000	12	152	5,1000	21,1700	2,1621	228,0000
	143	4,6000	22,2100	2,1657	60,8000		147	5,6000	22,2300	2,1381	243,2000
4	173	4,4000	21,0500	2,1970	60,8000	13	123	5,8000	22,0700	2,1617	243,2000
	150	4,6000	22,0500	2,1711	91,2000		147	5,7000	21,1900	2,1597	243,2000
5	151	4,6000	21,9800	2,1970	91,2000	14	139	5,8000	22,1500	2,1594	258,4000
	171	4,4000	21,1000	2,2251	91,2000		148	5,7000	22,0800	2,1469	258,4000
6	143	4,8000	22,0800	2,1562	121,6000	15	137	5,5000	21,1500	2,1500	258,4000
	161	4,8000	22,1700	2,1910	121,6000		149	5,9000	22,3100	2,1350	273,6000
7	137	4,6000	21,1200	2,1713	121,6000	16	144	6,1000	22,1700	2,1641	273,6000
	158	4,8000	22,1400	2,2048	152,0000		155	5,8000	21,1700	2,1345	273,6000
8	154	5,1000	22,1900	2,1522	152,0000	17	140	6,1000	22,3200	2,1515	288,8000
	169	4,8000	21,1600	2,1571	152,0000		133	6,1000	22,0300	2,1492	288,8000
9	151	4,9000	22,0700	2,1727	162,2000	18	152	5,8000	21,1900	2,1619	288,8000
	139	5,2000	22,3000	2,1555	162,2000		141	6,2000	22,0900	2,1349	304,0000
10	164	4,7000	21,2000	2,1845	162,2000	19	134	6,1000	22,0100	2,1251	304,0000
	149	5,2000	22,2000	2,1709	182,4000		141	5,8000	21,9500	2,1495	304,0000
11	127	5,3000	22,0800	2,1983	182,4000	20	143	5,8000	22,2200	2,1280	228,0000
	152	4,9000	21,2100	2,1952	182,4000		137	5,7000	22,2000	2,1448	228,0000
12	151	5,1000	22,1400	2,1473	197,6000	21	163	5,2000	21,1600	2,1628	228,0000
	140	5,4000	22,2100	2,1525	197,6000		147	5,1000	22,1600	2,1517	152,0000
13	163	5,2000	21,3100	2,1979	197,6000	22	150	4,5000	22,0600	2,1734	152,0000
	134	5,4000	22,2900	2,1689	212,8000		157	4,7000	21,2200	2,1962	152,0000

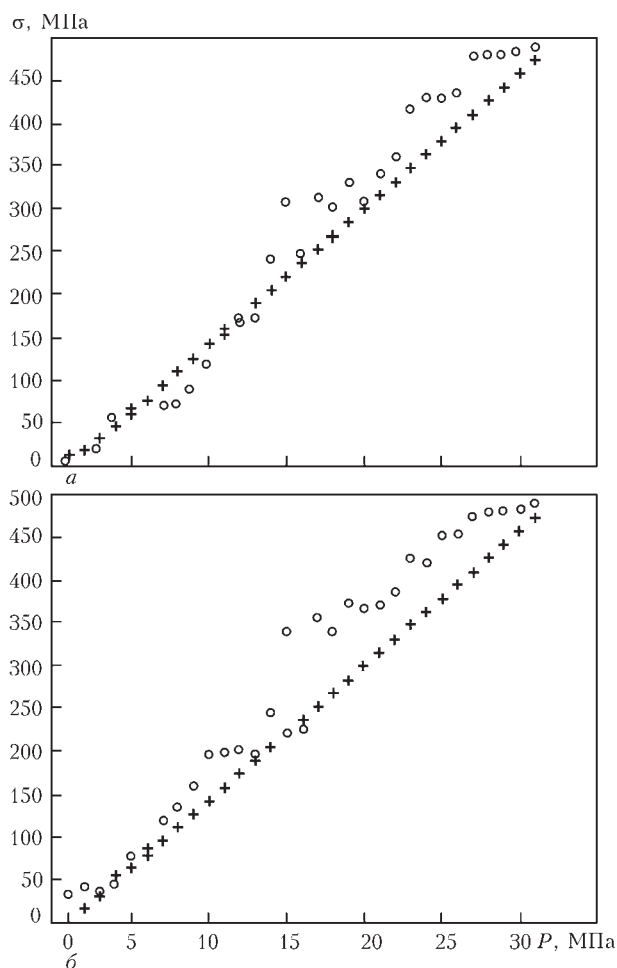


Рис. 2. Результати тестового напруження  $\sigma_T$  (o – тестові значення) порівняно до розрахункового напруження  $\sigma_P$  (+ – розраховані значення) залежно від тиску випробування  $P$ : а – для 3-х параметрів; б – для 4-х параметрів

тестових парах одержано табличні та графічні результати тестового значення напруження  $\sigma_T$  за відомого розрахункового значення  $\sigma_P$  (табл. 5, рис. 3).

Під час перевірки нейромережі з визначення напруження  $\sigma_T$  за допомогою 3-х параметрів середня абсолютна похибка становить 59,98 МПа, відносна похибка складає 12,0 %. Для 4-х 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 посудин під тиском (рис. 3, а, б) 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.

Використання штучних нейронних мереж дає можливість також одержати апроксимовану за-

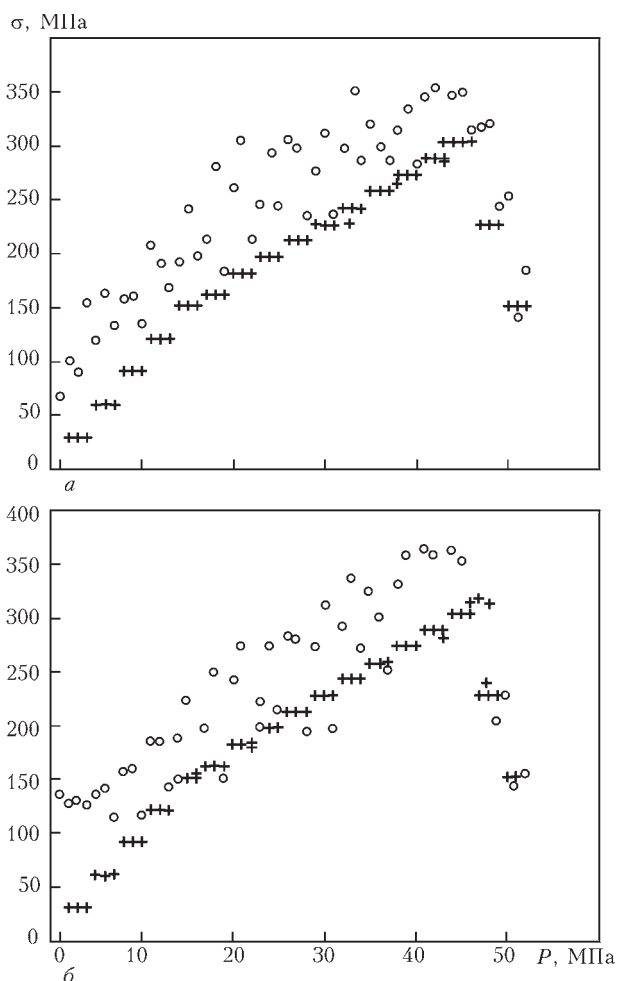


Рис. 3. Результати перевірки нейромережі з визначення напруження  $\sigma_T$  (o – значення, одержані за результатами роботи нейромереж) порівняно до розрахункового напруження  $\sigma_P$  (+ – дійсні значення за результатами розрахунку) залежно від тиску випробування  $P$ : а – для 3-х параметрів; б – для 4-х параметрів

лежність в аналітичному вигляді – матричне рівняння з функціями перетворення та ваговими коефіцієнтами, що змінюються в процесі навчання нейронної мережі. Отже, формула для визначення середнього розміру за трьома параметрами ( $HB$ ,  $HC$ ,  $\rho$ ) має вигляд:

$$\sigma = \frac{500}{1 + e^{-2 \sum_{n=1}^{12} -(LW\{2,3\} + e^A)}} + b\{3\},$$

$$\text{де } A = -2 \left( \sum_{n=1}^{12} -(LW\{2,1\} \times \right. \quad (1)$$

$$\left. \times \left( \frac{2}{1 + e^{-2 \sum_{n=1}^{12} (IW\{1,1\} \cdot \left[ \left( \frac{HB}{200} \right) \cdot \left( \frac{HC}{8} \right) \cdot \left( \frac{RO}{27} \right) \right] + b\{1\}}} \right) - 1 \right) \right) + b\{2\}$$

де  $\sigma$  – напруження;  $HB$  – твердість за шкалою Брінеля;  $HC$  – коерцитивна сила;  $RO$  – питомий електричний опір;  $IW\{1,1\} = [1,7431 - 3, 0389 - 3, 0193; 0,042401 - 6,5667 - 1,2504; 3,8403 - 1,8042 - 2,4633]$ ;  $b\{1\} = [3,1597; 1,6562; 0,83545]$ ;

Таблиця 5. Результати перевірки нейромережі з визначення тестового значення  $\sigma_t$

Для 3-х параметрів								
№	$\sigma_p$	$\sigma_t$	№	$\sigma_p$	$\sigma_t$	№	$\sigma_p$	$\sigma_t$
1	0	69,3000	8	182,4000	262,1210	14	273,6000	335,1848
2	30,4000	102,3000		182,4000	306,6386		273,6000	282,5109
	30,4000	91,5000	9	182,4000	214,4560	15	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	212,8000		306,4363	304,0000		346,8254	
4	60,8000	134,3419	11	212,8000	298,4546	17	304,0000	350,8004
	91,2000	158,9454		212,8000	236,8942		228,0000	314,6647
5	91,2000	159,5901	12	228,0000	278,5863	18	228,0000	317,0751
	91,2000	135,9391		228,0000	312,5776		228,0000	319,9417
6	121,6000	208,5419	13	228,0000	236,9155	19	152,0000	253,0097
	121,6000	191,9125		243,2000	298,2399		152,0000	140,9849
7	121,6000	169,2806	14	243,2000	351,0026	20	152,0000	185,8112
	152,0000	192,7478		243,2000	286,5624			
8	152,0000	242,3489	15	258,4000	322,2179	21		
	152,0000	198,8227		258,4000	300,3764			
9	162,2000	215,1495	16	258,4000	286,3474	22		
	162,2000	281,6993		273,6000	315,8764			
10	162,2000	184,8947	17			23		
Для 4-х параметрів								
№	$\sigma_p$	$\sigma_t$	№	$\sigma_p$	$\sigma_t$	№	$\sigma_p$	$\sigma_t$
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
3	30,4000	126,4653		197,6000	221,6337		288,8000	359,5746
	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	
4	60,8000	112,7810	11	212,8000	284,2955	17	304,0000	353,5924
	91,2000	156,8378		212,8000	279,6074		304,0000	314,0882
5	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
6	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
7	121,6000	142,9037	14	243,2000	291,9623	20	152,0000	144,3275
	152,0000	187,8217		243,2000	336,4444		152,0000	153,9594
8	152,0000	222,2296	15	243,2000	272,2808	21		
	152,0000	155,3081		258,4000	325,4496			
9	162,2000	197,3875	16	258,4000	300,1749	22		
	162,2000	250,1193		258,4000	251,5114			
10	162,2000	149,6889	17	273,6000	330,9292	23		

$LW\{2,1\} = [-2,6414 \ 2,439 \ -2,6484; \ -0,11555 \ -1,3002 \ -2,3494; \ -0,26707 \ -3,4977 \ -0,9879; \ -4,3283 \ -0,56173 \ -1,7194; \ 3,6251 \ 3,3037 \ 0,0079697; \ 3,0503 \ 0,4122 \ -0,75152; \ 1,4864 \ -2,2745 \ 2,2322; \ -0,58323 \ -0,99362 \ 2,9626; \ -1,0301 \ 2,231 \ -2,0604; \ -3,8824 \ -4,8745 \ 2,9746; \ -2,8029 \ -2,9665 \ 0,26002; \ 1,9492 \ -0,56367 \ 2,4798] \ LW\{2,3\} = [3,4791 \ -0,72835 \ 1,6159 \ -1,513 \ -0,58511 \ 0,10175 \ 0,30046 \ -0,020476 \ 0,82736 \ 3,7615 \ 2,2226 \ -1,1307] \ b\{2\} = [2,6779; \ 3,0984; \ 2,2409; \ 2,522; \ -0,52367; \ -2,0915; \ 0,90781; \ -0,90616; \ -1,4632; \ 0,64351; \ -1,9935; \ 3,2007] \ b\{3\} = [-0,35259]$

Формула (1) насправді відображає порядок виконання розрахунків виходів вихідного та прихованих шарів нейромережі відповідно до використовуваної архітектури (рис. 3) при поданні на

вхід вектора з трьома інформативними параметрами – перемноження цього вектора на вагові коефіцієнти, розрахунку їх за функцією перетворення з передачею на наступний нейрон і так далі [15].

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 ( $HB, HC, \rho$ ) згідно з формулою (1) є меншою за похибку визначення напруження за чотирма параметрами ( $HB, HC, \rho, I_2$ ) і складає 6,04 %, що не перевищує 12 % на нових зразках посудин під тиском. Такий рівень похибок є ціл-

ком 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 (див. рис. 3).

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 в 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 (1) дає можливість визначати напруження, що діють у металоконструкції, за допомогою комплексу тривимірних інформативних параметрів відповідно до описаної у статті методики.

Слід зазначити, що отримані результати за умови виконання перевірочних досліджень можуть бути поширені на трубопроводи для визначення напружень в їх стінках, оскільки типовий режим їх навантаження відповідає режиму роботи об'єктів посудин під тиском, що були об'єктами досліджень в цій роботі. Також наступним етапом досліджень є експериментальна перевірка запропонованого методу на посудинах під тиском, що перебувають в експлуатації ДП «Укравтогаз».

### Висновки

За результатами експериментальних та аналітичних досліджень доведено й експериментально підтверджено новий напрямок визначення напружень у стінці посудини під тиском за трьома інформативними параметрами, одержаними шляхом вимірювання засобами неруйнівного контролю – твердості, питомого електричного опору та коерцитивної сили. Також одержано аналітичну залежність, яка має чітко виражений нелінійний характер між величиною напруження та величинами інформативних параметрів, для їх апроксимації використано алгоритми штучних нейронних мереж. Точність визначення напружень досить висока, оскільки абсолютна похибка становить 30,20 МПа, відносна похибка складає 6,04 %.

### Список літератури

1. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Державної науково-технічної програми «Ресурс» від 8 жовтня 2004 р. № 1331. Документ 1331-2004-п, чинний.
2. Кошовий В. В. (2001) Про оцінку переддефектного стану матеріалу методами ультразвукової обчислювальної томографії. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **37**, 118–132.
3. Назарчук З. Т., Тетерко А. Я., Рибачук В. Г., Кулинич Я. П. (2006) Комплекс технічних засобів для електромагнітно-

го неруйнівного контролю конструкцій тривалої експлуатації. *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин*. Зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2004–2006 рр. Київ, ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України.

4. Кондратенко І. П., Божко І. В., Жильцов А. В., Васюк В. В. (2013) Методи визначення залишкових напружень. *Праці ТДАТУ*, **13(2)**, 127–135.
5. Дубов А. А., Демин Е. А. и др. (2002) Контроль напряженно-деформированного состояния газопроводов. *Газовая промышленность*, **2**, 58–61.
6. Дубов А. А. (2016) Принципиальные отличия метода магнитной памяти от других известных методов неразрушающего контроля. Итоги и перспективы различия. *Территория NDT*, **2**, 64–68.
7. Безлюдько Г. Я., Марченко А. Ю., Соломаха Р. Н. (2011) Оценка технического состояния и остаточного ресурса оборудования по измерениям магнитной характеристики – коэрцитивной силы. *Материали 6-ї науково-технічної конференції «Сучасні прилади і технології НКІТД нафтогазопромислового обладнання»*. м. Івано-Франківськ, сс. 78–84.
8. Миндюк В. Д., Доценко Є. Р., Карпаш М. О. (2011) Особливості деградації структури матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації та оцінка можливості її діагностування в нафтогазовому комплексі. *Науковий вісник ІФНТУНГ*, **2(28)**, 91–97.
9. Карпаш А. М. (2016) Особливості експериментальних модельних об'єктів та постановка експерименту для визначення напружено-деформованого стану металоконструкцій за комплексом інформативних параметрів. *Нафтогазова енергетика*, **1(25)**, 91–101.
10. Карпаш А. М. (2016) Експериментальні дослідження та практика визначення залишкового ресурсу металоконструкцій довготривалої експлуатації з врахуванням напруженого стану. *Материали 8-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2016, м. Київ, 22–24 листопада 2016 р.* Київ, УТ НКІТД, сс. 193–196.
11. ГОСТ 1497–84. (1984) Методы испытаний на растяжение. Москва, Изд. стандартов.
12. ГОСТ 142491984–89. (1989) Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Москва, Изд. стандартов.
13. Писаранеко Н. С. (1975) *Справочник по сопротивлению материалов*. Киев, Наукова думка.
14. Карпаш М. О. (2013) *Розвиток методів, засобів та технологій багатопараметрового контролю технічного стану магістральних трубопроводів*: автореферат дис. докт. техн. наук. Івано-Франківськ, Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу.
15. Хайкин С. (2006) *Нейронные сети: полный курс, 2-е издание*. Пер. с англ. С. Хайкин. Москва, ИД «Вильямс».

### References

1. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy «Pro zatverdzhennia Derzhavnoi naukovo-tekhnichnoi prohramy «Resurs» vid 8 zhovtnia 2004 r. № 1331. Dokument 1331-2004-p, chynnyi. [in Ukrainian].
2. Koshoviy V. V. (2001) Pro otsinku pereddefektnoho stanu materialu metodamy ultrazvukovoi obchysluvalnoi tomohrafiy. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*, **37**, 118–132. [in Ukrainian]
3. Nazarchuk Z. T., Teterko A. Ya., Rybachuk V. H., Kulynych Ya. P. (2006) Kompleks tekhnichnykh zasobiv dlia elektromagnitnoho neruivnivo kontroliu konstruktstii tryvaloi ekspluatatsii. *Problemy resursu i bezpeky ekspluatatsii konstruktstii, sporud ta mashyn*. Zbir. nauk. statei za rezultatamy, otrzymanymy v 2004–2006 rr. Kyiv, IEZ im. E. O. Patona NAN Ukrainy. [in Ukrainian]
4. Kondratenko I. P., Bozhko I. V., Zhylytsov A. V., Vasiuk V. V. (2013) Metody vyznachennia zalyshkovykh napruzhen. *Pratsi TDAU*, **13(2)**, 127–135. [in Ukrainian]
5. Dubov A. A., Demin Ye. A. i dr. (2002) Kontrol napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gazoprovodov. *Газовая промышленность*, **2**, 58–61. [in Russian].

6. Dubov A. A. (2016) Printsipialnye otlichiya metoda magnitnoy pamyati ot drugikh izvestnykh metodov nerazrushayushchego kontrolya. Itogi i perspektivy razlichiya. *Territoriya NDT*, 2, 64–68. [in Russian]
7. Bezlyudko G. Ya., Marchenko A. Yu., Solomakha R. N. (2011) Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya i ostatochnogo resursa oborudovaniya po izmereniyam magnitnoy kharakteristiki – koertsitivnoy sily. *Materialy 6-oi naukovno-tekhnichnoi konferentsii «Suchasni prylyady i tekhnolohii NKiTD naftohazopromysloвого obladdannia»*. m. Ivano-Frankivsk, ss. 78–84. [in Russian]
8. Myndiuk V. D., Dotsenko Ye. R., Karpash M. O. (2011) Osoblyvosti dehradatsii struktury materialiv metalokonstrukttsii dovhotryvaloi ekspluatatsii ta otsinka mozhlyvosti yii diahnostuvannia v naftohazovomu kompleksii. *Naukovyi visnyk IFNTUNH*, 2(28), 91–97. [in Ukrainian]
9. Karpash A. M. (2016) Osoblyvosti eksperymentalnykh modelnykh ob'ektiv ta postanovka eksperymentu dlia vyznachennia napruzhenno-deformovanoho stanu metalokonstrukttsii za kompleksom informatyvnykh parametriv. *Naftohazova enerhetyka*, 1(25), 91–101. [in Ukrainian]
10. Karpash A. M. (2016) Eksperymentalni doslidzhennia ta praktyka vyznachennia zalyshkovoho resursu metalokonstrukttsii dovhotryvaloi ekspluatatsii z vrakhuvanniam napruzhenoho stanu. *Materialy 8-i Natsionalnoi naukovno-tekhnichnoi konferentsii «Neruinivnyi kontrol ta tekhnichna diahnostyka – UkrNDT-2016»*, m. Kyiv, 22–24 lystopada 2016 r. Kyiv, UT NKTD, ss. 193–196. [in Ukrainian]
11. GOST 1497–84. (1984) Metody ispytany na rastyazheniye. Moskva, Izd. standartov. [in Russian]
12. GOST 142491984–89. (1989) Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost. Moskva, Izd. standartov. [in Russian]
13. Pisaneko N. S. (1975) *Spravochnik po soprotivleniyu materialov*. Kiyev, Naukova dumka. [in Russian]
14. Karpash M. O. (2013) *Rozvytok metodiv, zasobiv ta tekhnolohii bahatoparametrovoho kontroliu tekhnichnoho stanu mahistralnykh truboprovodiv*. avtoreferat dys. dokt. tekhn. nauk. Ivano-Frankivsk, Ivano-Frankiv. nats. tekhn. un-t nafty i hazu. [in Ukrainian]
15. Khaykin S. (2006) *Neyronnye seti: polny kurs, 2-e izdaniye*. Per. s angl. S. Khaykin. Moskva, ID «Vilyams». [in Russian]

A. M. КАРПАШ<sup>1</sup>, Н. Л. ТАЦАКОВИЧ<sup>2</sup>, М. О. КАРПАШ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «Научно-производственная фирма «Зонд». 76002, г. Ивано-Франковск, ул. Микитинецкая, 5, а.  
E-mail: ndi@zond-endt.com

<sup>2</sup>Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. 76019, г. Ивано-Франковск, ул. Карпатская, 15.  
E-mail: karpash@nung.edu.ua

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СОСУДОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Исследовалась возможность использования результатов измерения способами неразрушающего контроля структурно-чувствительных характеристик (коэффициент теплопроводности,

удельная электропроводность, ударная вязкость, твердость) для определения места и уровня напряжений в материалах металлоконструкций длительной эксплуатации. Проведена серия экспериментальных исследований на специально изготовленных масштабированных сосудах, работающих под давлением. Учитывая существенную нелинейность, разную точность и достоверность измеренных информативных параметров, принято решение использовать алгоритмы искусственных нейронных сетей для обработки массива экспериментальных данных. По результатам проведенных исследований доказана возможность определения напряжений в стенках сосудов по трем информативным параметрам: твердость, удельное электрическое сопротивление, коэффициент коррозионной силы и получена аналитическая зависимость матричного уравнения для определения уровня напряжений в материалах металлоконструкций. Библиогр. 15, табл. 5, рис. 3.

Ключевые слова: напряжение, информативные параметры, многопараметровая диагностика, алгоритмы искусственных нейронных сетей

A. M. KARPASH<sup>1</sup>, N. L. TATSAKOVICH<sup>2</sup>, M. O. KARPASH<sup>1</sup>

<sup>1</sup> «Scientific-production company «Zond» LLC, 5a Myktynetska str., Ivano-Frankivsk, 76002  
E-mail: zond.ndt@gmail.com

<sup>2</sup>Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska str., Ivano-Frankivsk, 76019  
E-mail: mkarpash@nung.edu.ua

IMPROVEMENT OF METHOD FOR DETERMINATION OF STRESSED STATE OF PRESSURIZED PIPELINES AND VESSELS

The possibility was investigated on application of the results of NDT measurement of structural-sensitive characteristics (heat conduction coefficient, specific electric conductance, impact toughness, hardness) for determination of place and level of stresses in the material of metal structures of long-term operation. A series of experiments was carried out on specially manufactured test samples in form of scaled pressurized vessels. Taking into account significant nonlinearity and different accuracy and reliability of measured informative parameters it was concluded to apply the algorithms of artificial neuron nets for processing experimental data set. The results of carried investigations proved the possibility of determination of stresses in vessel walls by three informative parameters, namely hardness, specific electric resistance, coefficient of corrosion strength. An analytical dependence of matrix equation was received for determination of level of stresses in metal structures' materials. Ref. 15, Tables 5, Figures 3

Keywords: stresses, informative parameters, multi-parameter diagnostics, algorithms of artificial neuron nets.

Надійшла до редакції  
07.02.2017