

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 004.896; 620.162.4

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-5-12

ВИКОРИСТАННЯ ЗГОРТКОВОЇ ГЛИБОКОЇ НЕЙРОМЕРЕЖІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВЕРТИКАЛЬНИХ СТАЛЕВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ ЗА ПЕРЕМІЩЕННЯМИ ЇХ ПОВЕРХНІ

Х.В. Паньків, Ю.В. Паньків*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, khrystyna.pankiv@nung.edu.ua*

Основне місце у визначенні механічних характеристик матеріалу РВС займають методи та засоби контролю НДС, до яких належать метод коерцитивної сили; метод магнітної анізотропії; метод на основі ефекту Баркгаузена, метод магнітної пам'яті металу (МПМ), тензометричний метод. Перевагами магнітних методів є можливість проведення контролю без виведення РВС з експлуатації, безпечність. До недоліків, властивих майже всім магнітним методам контролю, відносять необхідність підготовки контрольованої поверхні, складність визначення положення давачів по відношенню до дії максимальних навантажень, залежність результатів контролю від способів і умов вимірювання, вплив повітряного прошарку між давачем і контрольованою поверхнею на точність вимірювання. Показано, що для визначення можливості подальшої безпечної експлуатації вертикальних сталевих циліндричних резервуарів необхідно знати їх напружено-деформований стан. Виділено недоліки існуючих експериментальних та математичних методів його оцінки. Запропоновано використовувати згорткову глибоку нейромережу для визначення напруженого стану вертикального сталевих циліндричного резервуару. В якості вхідних даних пропонується використовувати дані про переміщення його стінки отримані, наприклад, в результаті геометричного калібрування в два моменти часу. Вхідні дані подаються у вигляді масиву розмірністю 8×12 , далі використовується згортка і макс-пулінг. Останній шар є повнозв'язним. В якості функції вартості пропонується використовувати перехресну ентропію. Для збільшення кількості навчальних даних пропонується використовувати значення переміщень та напружень, отриманих шляхом моделювання різних впливів на циліндричний резервуар з різними дефектами форми з використанням пакету SolidWorks. Визначено шляхи вдосконалення запропонованого методу. Для подальших досліджень та вдосконалення запропонованого методу можна пробувати використовувати в нейромережі інші гіперпараметри, зокрема змінювати кількість карт ознак, розміри локального рецептивного поля, розмір кроку зсуву рецептивного поля та інші. Також можна пробувати використовувати вихідний шар з іншою кількістю нейронів та softmax в якості функції вартості.

Ключові слова: глибока нейромережа; згортка; пулінг; перехресна ентропія.

Показано, что для определения возможности дальнейшей безопасной эксплуатации вертикальных стальных цилиндрических резервуаров необходимо знать их напряженно-деформированное состояние. Выделены недостатки существующих экспериментальных и математических методов его оценки. Предложено использовать сверточную глубокую нейросеть для определения напряженного состояния вертикального стального цилиндрического резервуара. В качестве входных данных предлагается использовать данные о перемещении его стенки полученные, например, в результате геометрической калибровки в два момента времени. Входные данные представляются в виде массива размерностью 8×12 , далее используется свертка и макс-пулинг. Последний слой является полносвязным. В качестве функции стоимости предлагается использовать перекрестную энтропию. Для увеличения количества учебных данных предлагается использовать значения перемещений и напряжений, полученных путем моделирования различных воздействий на цилиндрический резервуар с различными дефектами формы с использованием пакета SolidWorks. Определены пути совершенствования предложенного метода. Для дальнейших исследований и

совершенствования предложенного метода можно пробовать использовать в нейросети другие гиперпараметры, в частности изменять количество карт признаков, размеры локального рецептивного поля, размер шага смещения рецептивного поля и другие. Также можно пробовать использовать выходной слой с другим количеством нейронов *softmax* в качестве опции стоимости.

Ключевые слова: глубокая нейросеть; свертка; пулинг; перекрестная энтропия.

The main place in determining the mechanical characteristics of the RVS material is occupied by methods and means of VAT control, which include the method of coercive force; magnetic anisotropy method; Barkhausen method, magnetic metal memory (MPM) method, strain gauge method. The advantages of magnetic methods are the ability to control without decommissioning the RVS, safety. The disadvantages inherent in almost all magnetic control methods include the need to prepare the controlled surface, the difficulty of determining the position of the sensors in relation to the maximum loads, the dependence of control results on methods and conditions of measurement, the influence of the air layer between the sensor and the controlled surface. It's shown that to determine the further safe operation possibility of vertical steel cylindrical tank it is necessary to know their stress-strain state. The shortcomings of the existing experimental and mathematical methods of its estimation were highlighted. It's proposed to use a convolutional deep neural network to determine the stress state of a vertical steel cylindrical tank. As input data, it's proposed to use data on the movement of its wall obtained, for example, as a result of geometric calibration at two points in time. The input data was presented in the form of an array of dimensions 8x12, then used convolution and max-pulling. The last layer is fully connected. It's proposed to use cross-entropy as a cost function. To increase the amount of training data, it is proposed to use the values of displacements on stresses obtained by modeling different effects on a cylindrical tank with different shape defects using the SolidWorks package. Possible ways to improve the proposed method are proposed.

For further research and improvement of the proposed method, you can try to use other hyper parameters in the neural network, in particular to change the number of feature maps, the size of the local receptive field, the size of the shift step of the receptive field and others. You can also try using the source layer with a different number of neurons and softmax as a function of cost.

Key words: deep neural network; convolution; puling; cross entropy.

Вступ

Вертикальні сталеві циліндричні резервуари (РВС) – це об'єкти підвищеної небезпеки. Вони працюють під впливом багатьох зовнішніх та внутрішніх факторів, які зумовлюють їх складний напружено-деформований стан (НДС). Значна частина вертикальних сталевих резервуарів (РВС) на території України знаходяться в експлуатації протягом тривалого часу та потребують проведення регулярного діагностування їх стану з метою виявлення можливості продовження їх безпечної роботи.

За даними [1] встановлено, що реальна кількість аварій резервуарів в 3-5 разів перевищує кількість зареєстрованих. Руйнування резервуара спричинює масштабні руйнування, часто призводить до людських жертв, а матеріальні збитки іноді перевищують вартість самої споруди у 500 разів [2]. Іноді руйнуються не лише окремі елементи резервуара, а і вся конструкція, що призводить до витоку продуктів зберігання спричинює екологічну катастрофу [3].

Дані технічного обстеження та дефектоскопії резервуара і його елементів необхідні для визначення можливості і режимів його подальшої експлуатації. Терміни, періодичність і об'єм обстеження

технічного стану металевих резервуарів залежно від тривалості експлуатації і виду продукту, що зберігається, визначені в ДСТУ-Н Б А.3.1-10:2008 “Настанова з проведення технічного діагностування вертикальних сталевих резервуарів” [4].

Незважаючи на високий рівень розвитку методів дефектоскопії РВС аварії продовжують траплятися. Відомі випадки, коли аварії траплялися навіть на ділянках, які були щойно обстежені, а конструкції зі значними дефектами продовжували працювати [5]. Дані дефектоскопії та дефектометрії недостатньо для визначення ступеня небезпечності дефекту. Потрібна додаткова інформація про НДС РВС.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розрахунок конструкцій резервуарів виконують за граничним станом згідно ДБН В.1.2-14[6].

Основне місце у визначенні механічних характеристик матеріалу РВС займають методи та засоби контролю НДС, до яких належать метод коерцитивної сили; метод магнітної анізотропії; метод на основі ефекту Баркгаузена, метод магнітної пам'яті металу (МПМ), тензометричний метод. Перевагами магнітних методів є можливість проведення контролю без виведення РВС з експлуатації, безпечність. До недоліків, властивих

майже всім магнітним методам контролю, відносять необхідність підготовки контрольованої поверхні, складність визначення положення давачів по відношенню до дії максимальних навантажень, залежність результатів контролю від способів і умов вимірювання, вплив повітряного прошарку між давачем і контрольованою поверхнею на точність вимірювання [7, 8].

Також для вимірювання напружень використовують тензометрію. До переваг тензорезистивного методу відносять відсутність істотного впливу зовнішніх умов на результати вимірювання. Основними недоліками методу є необхідність безпосереднього контакту приладів з контрольованою поверхнею, вимірювання лише відносних деформацій, можливість вимірювання напружень тільки в окремих локальних площадках, що ускладнює їх застосування для таких крупногабаритних об'єктів, якими є РВС.

Окрім експериментальних, існують також математичні методи контролю НДС РВС. Згідно з ДБН В.2.6-163 2010 [9] проводиться повірочний розрахунок стінки РВС на міцність та на стійкість. Цей метод не дає можливості визначити фактичний НДС резервуара, тому що тут враховується лише тиск речовини, що зберігається та товщина стінки, а не фактичні навантаження, які діють на резервуар і дефекти його форми. Також результатами обчислень є усереднені значення кожного поясу, а не значення в кожній точці поверхні стінки.

До математичних методів дослідження НДС резервуарів можна віднести аналітичні та чисельні методи. В основі аналітичних методів розрахунку НДС резервуарів лежить теорія осесиметричних тонкостінних оболонок [10]. До чисельних методів розрахунку НДС резервуара відносяться прикладні методи розв'язання задач будівельної механіки, а також метод скінченних елементів (МСЕ) [11]. Точний розв'язок вказаних задач передбачає врахування всіх факторів, що діють на резервуар, у вигляді граничних умов. Згідно з ДСТУ Б В.2.6-183:2011 [12] на резервуар діють навантаження, наведені на рис. 1.

Як видно з рисунку 1, впливові чинники складно кількісно оцінити, що обмежує можливості використання описаних вище методів.

При спробі застосування комерційних пакетів, що реалізують МСЕ (SolidWorks), для визначення НДС РВС виникає проблема задання геометричних розмірів резервуара обумовлена малістю товщини стінки порівняно з іншими розмірами.

Для вирішення цієї проблеми резервуар розглядають як тонкостінну оболонку з дефектами форми, а вплив дефектів матеріалу стінки враховують через коефіцієнт концентрації напружень – для негострих дефектів, та коефіцієнт

інтенсивності напружень – для тріщин, які розраховуються в залежності від типу, розміру та розміщення дефекту.

Існують методи розв'язання обернених задач для визначення НДС в об'ємі тіла за даними про переміщення на частині поверхні [13, 14].

Ці методи є експериментально-розрахунковими, в них, окрім даних про переміщення поверхні використовуються часткові дані про напруження.

Також в роботі [15, 16], було запропоновано обчислювати НДС за переміщеннями точок поверхні РВС, що опосередковано враховує сили та навантаження, які діють на резервуар. Проте наявність зварних з'єднань та додаткового обладнання вимагає їх окремого врахування і ускладнює застосування даного методу.

Висвітлення невіршених раніше частин загальної проблеми

Як показано вище зв'язку з великою трудоемністю і значними розмірами РВС експериментальні методи визначення НДС можна застосовувати лише для уточнення напружень на окремих ділянках резервуарів.

Розглянуті математичні методи дають змогу одержувати адекватну картину НДС РВС лише при умові врахування всіх впливів та навантажень, які діють на резервуар, що в більшості випадків є можливим лише з великим наближенням, тому вірогідність контролю цими методами є низькою.

Існує необхідність в розробленні методу визначення НДС РВС з високою вірогідністю та малою трудоемністю, що дасть змогу визначити можливий термін їх безпечної експлуатації.

Формування цілей статті

При оцінці НДС резервуара особливу увагу слід звернути на стінку, яка являє собою циліндричну оболонку з дефектами форми, в зв'язку з тим, що всі навантаження, які діють на резервуар прямо чи опосередковано діють саме на його стінку.

Зі збільшенням обчислювальних потужностей сучасних комп'ютерів та винайденням нових алгоритмів все більшої популярності в задачах технічної діагностики набирають нейромережі. В статті пропонується використовувати нейромережу для визначення НДС РВС за даними про переміщення точок їх поверхні. Результатом роботи нейромережі буде максимальне значення напружень в стінці РВС.

Висвітлення основного матеріалу

Навантаження та впливи, які діють на стінку РВС призводять до зміни просторового положення її поверхні, отже вимірявши положення стінки в два моменти часу і обчисливши її переміщення можна оцінити зміну її НДС. Оскільки доведено, що

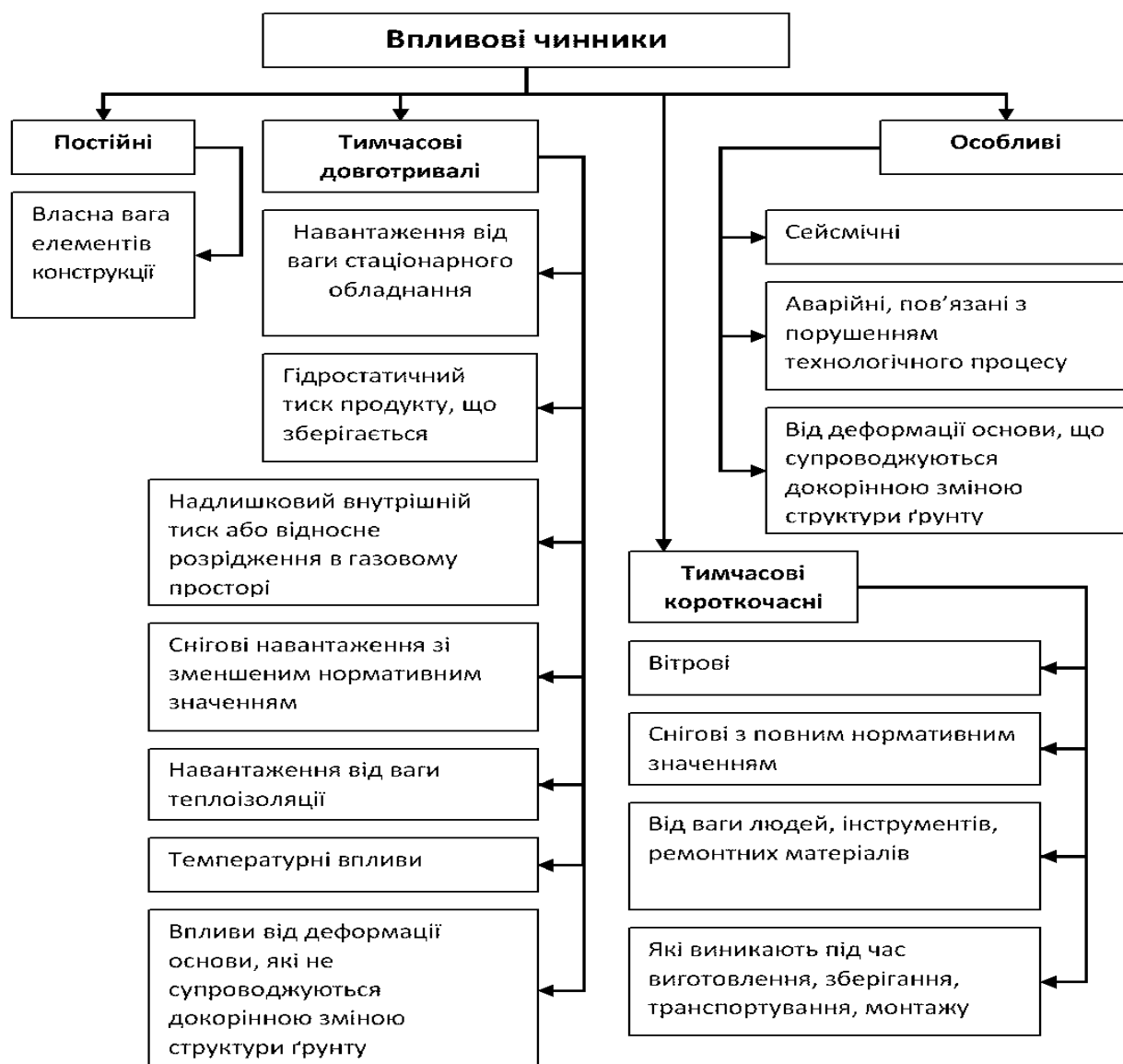


Рисунок 1 – Впливові чинники, що призводять до зміни технічного стану РВС

нейромережі можуть обчислити будь-яку функцію [17], то, при використанні переміщень стінки в якості вхідних параметрів в нейромережі, на її виході можна оцінити зміну НДС в стінці РВС.

Пропонується використовувати згорткову глибоку нейромережу, представлену у [17] (рис.2).

Наведена структура часто використовується для ідентифікації зображень. Вона враховує просторову структуру вхідних даних, що важливо для оцінки НДС, який є розподіленим в просторі стінки РВС.

Оскільки дані про переміщення точок поверхні стінки РВС також представлені у вигляді двовимірного масиву, як і зображення, то цю структуру доцільно застосовувати для їх обробки.

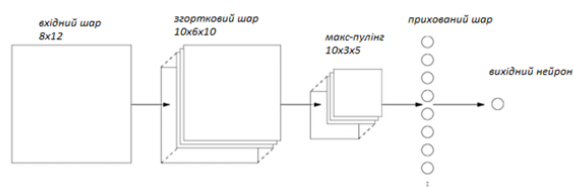


Рисунок 2 – Топологія згорткової глибокої мережі з вхідним шаром розмірністю 8x12 та одним вихідним нейроном

Методика проведення експериментальних досліджень передбачає вимірювання відхилення твірних стінки резервуара від вертикалі згідно ДСТУ 4147-2003 [18]. Ці відхилення вимірюються для калібрування РВС геометричним методом. Різниця між відхиленнями в два моменти часу в кожній точці поверхні стінки РВС записується у двовимірний масив розмірністю 8x12 і використовується в якості вхідних значень для згорткової нейромережі.

Кожен нейрон першого прихованого шару пов'язаний з невеликою ділянкою вхідних нейронів розмірністю 3x3, яка називається локальним рецептивним полем. Кожен зв'язок навчається своїй вазі.

Локальне рецептивне поле переміщається по всьому вхідному масиву з кроком 1. Для кожного локального рецептивного поля існує свій прихований нейрон в першому прихованому шарі. Таким чином, якщо вхідний масив має розмірність 8x12, а розміри локального рецептивного поля становлять 3x3, то в прихованому шарі буде 6x10 нейрони. Для всіх прихованих нейронів використовуються однакові ваги, це кардинально зменшує кількість параметрів, які навчаються. Тобто для кожного прихованого нейрона j , k вихід буде рівним [17]:

$$\sigma(\sum_{i=0}^2 \sum_{m=0}^2 \omega_{i,m} a_{j+i,k+m}). \quad (1)$$

де σ – сигмоїдна функція активації;

$\omega_{i,m}$ – масив загальних ваг 3x3;

$a_{x,y}$ – вхідні активації в позиції x, y .

Оскільки ваги всіх нейронів в прихованому шарі однакові, то вони виявляють ту саму ознаку в різних частинах поверхні. Зіставлення вхідного шару і прихованого шару називається картою ознак. Пропонується використовувати 10 карт ознак.

Після згорткового шару використовується пулінговий шар, зокрема застосовується макс-пулінг. Він приймає вихід кожної карти ознак згорткового шару і готує стислу карту ознак (вибирає максимальне значення з ділянки 2x2). Оскільки вихід нейронів згорткового шару дає 6x10 значень, після пулінгу залишиться 3x5 нейронів. Макс-пулінг застосовується до кожної карти ознак.

Останній шар зав'язків в мережі є повнозв'язним. Він пов'язує кожен нейрон шару макс-пулінгу з вихідним нейроном з сигмоїдною функцією активації, який показує максимальну зміну напружень в стінці РВС. В якості функції вартості використовується перехресна ентропія [17]:

$$C = -\ln \sum_x [y \ln a + (1 - y) \ln(1 - a)], \quad (2)$$

де n – загальна кількість одиниць навчальних даних;
 x – навчальні дані, по яких проводиться сумування;
 y – відповідний бажаний вихід.

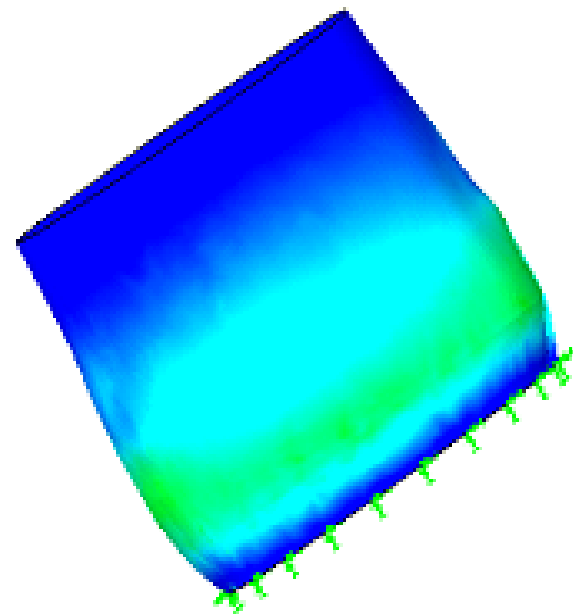


Рисунок 3 – Розподіл інтенсивності напружень в стінці резервуара, одержаних за допомогою програмного комплексу SolidWorks

В цієї функції є перевага над квадратичною функцією вартості, оскільки, вона дозволяє уникнути проблеми уповільнення навчання.

Запропонована мережа навчається за допомогою стохастичного градієнтного спуску і зворотного поширення. Для запропонованої мережі необхідний великий набір даних про переміщення точок поверхні стінки РВС. Ці дані, як було сказано вище, можна отримати в результаті геометричного калібрування РВС. Також для збільшення кількості вхідних даних з метою покращення навчання мережі пропонується використовувати дані, отримані в результаті моделювання різних впливів, що діють на РВС з різними дефектами форми стінки в середовищі SolidWorks [19]. Таким чином можна отримати значення зміни напружень в залежності від переміщень, які під дією різних навантажень, що

показано на рисунку 3. Як показано в [20], таке моделювання добре відтворює реальний напружений стан резервуара.

Таким чином можна значно збільшити об'єм навчальних даних для запропонованої згорткової мережі, що дозволить покращити точність визначення НДС стінки РВС.

Висновки

Таким чином за положенням стінки РВС в два моменти часу з використанням сучасної згорткової глибокої нейромережі можна оцінити зміну НДС з метою визначення можливості продовження безпечної експлуатації резервуару. При чому запропонований метод не є трудоемким та не потребує безпосереднього контакту з поверхнею РВС. Також немає необхідності визначати всі впливи та навантаження, впливу яких зазнає резервуар.

Якщо розмірність вхідного масиву менша від запропонованої доцільно використовувати методи інтерполяції та апроксимації, зокрема сплайни.

Для подальших досліджень та вдосконалення запропонованого методу можна пробувати використовувати в нейромережі інші гіперпараметри, зокрема змінювати кількість карт ознак, розміри локального рецептивного поля, розмір кроку зсуву рецептивного полята інші. Також можна пробувати використовувати вихідний шар з іншою кількістю нейронів та софтахв якості функції вартості.

Замість шару макс-пулінгу можна спробувати застосовувати L2-пулінг, де замість того, щоб взяти максимальну активацію регіону нейронів, береться квадратний корінь з суми квадратів активацій регіону. Ефективність використання певного методу пулінгу може залежати від інших вибраних гіперпараметрів.

Список використаних джерел

1. Кандаков Г. П. Проблемы отечественного резервуаростроения и возможные пути их решения [Текст] / Г. П. Кандаков // Промышленное и гражданское строительство. – 1998. – № 5. – С.24-26.

2. Ибрагимов И.Г. Мониторинг состояния оболочковых конструкций методом магнитного сканирования [Электронный ресурс] / И. Г. Ибрагимов, Р.Г. Вильданов // Нефтегазовое дело. – 2004. – Режим доступа до журн. : <http://www.ogbus.ru>.

3. Разрушения в процессе эксплуатации вертикальных цилиндрических резервуаров со стационарной крышей [Электронный ресурс] / С. М. Купрейшвили // С. : Химсталькон. –

Режим :
доступу :
<http://www.himstalcon.ru/node/2582>.

4. Настанова з проведення технічного діагностування вертикальних сталевих резервуарів [Текст] : ДСТУ–Н Б А.3.1–10:2008. – [Чинний від 2009–07–01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 63 с. – (Національний стандарт України).

5. Загороднев В. И. Осторожно, сварка [Текст] / В. И. Загороднев // Индустрия. – 2005. – № 3 (41). – С. 2–3.

6. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. [Текст] : ДБН В.1.2-14-2009. [Чинний від 2009-01-12]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – (Державні будівельні норми України)

7. Контроль напружено–деформованного состояния оборудования и конструкций при оценке остаточного ресурса на объектах промышленности и транспорта [Электронный ресурс] / ООО «Энергодиагностика». – Реутов. – Режим доступа :
http://www.energodiagnostika.ru/ru/application_mm/app_mmm_sss_inspection.aspx.

8. Никитина Н. Е. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин [Текст] / Н. Е. Никитина, С. В. Казачек // Вестник научно–технического развития. – 2010. – № 4 (32). – С. 18–28.

9. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. [Текст] : ДБН В.2.6-163 2010. – [Чинний від 2011-01-12]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – (Державні будівельні норми України)

10. Власов В. З. Общая теория оболочек и ее приложение в технике [Текст] : учеб. пособие / В. З. Власов. – М.: Гостехиздат, 1979. – 784 с.

11. Стренг Г. Теория метода конечных элементов [Текст] : учеб. пособие / Г. Стренг, Дж. Фикс. ; перев. с англ. В. И. Агошкова, В. А. Василенко, В. В. Шайдурова. – М.: Мир, 1977. – 349 с.

12. Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів. Загальні технічні умови (ГОСТ 31385–2008, NEQ)

[Текст] : ДСТУ Б В.2.6–183:2011. – [Чинний від 2012–10–01]. – К. : Мінрегіон України, 2012. – 77 с. – (Національний стандарт України).

13. Фомин А. В. Расчетно-экспериментальные методы механики деформируемого тела в условиях ограниченной исходной информации [Текст] : дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук / А. В. Фомин. – М. : 1989.

14. Прейс А. К. Определение напряжений в объеме детали по данным измерений на поверхности [Текст] / А. К. Прейс. – М.: Наука, 1979. – 128с.

15. Замиховський Л. М. Математичне моделювання напружено-деформованого стану резервуарів з дефектами форми стінки [Текст] / Л. М. Замиховський, Х. В. Паньків // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2007. – Т.1 (93), № 3. – С. 212–214.

16. Замиховський Л. М. Оцінка напружено-деформованого стану вертикальних сталевих циліндричних резервуарів за переміщеннями точок їх поверхні [Текст] / Л. М. Замиховський, Х. В. Паньків // Вісник КДПУ. – 2007. – Част. 1, Вип. 4. – С. 141–143.

17. Michael A. Nielsen, "Neural Networks and Deep Learning", Determination Press, 2015 [Електронний ресурс] – Режим доступу :<http://neuralnetworksanddeeplearning.com>.

18. Метрологія. Резервуари сталеві вертикальні циліндричні. Методика повірки (ГОСТ 8.570–2000. MOD) [Текст] : ДСТУ 4147–2003. – [Чинний від 2003–01–01]. – К.: Держспоживстандарт, 2003. – 74 с. – (Національний стандарт України).

19. Тику Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2004 : учеб. пособие [Текст] / Тику Ш. – СПб.: Питер, 2005. – 768 с. – ISBN 5–94723–841.

20. Мартинюк Х. В. Метод оцінки напружено-деформованого стану вертикальних сталевих циліндричних резервуарів [Текст] / Х. В. Мартинюк, Л. М. Замиховський // Эффективность реализации научного, ресурсного, промышленного потенциала в современных условиях : 7-ма щорічна міжнар. пром. конф. і білиц-виставка 12-16 лютого 2007 р.: матеріали конференції. – с. Славське, 2007. – С. 321–322.

References

1. Kandakov G. P. Problemy otechestvennogo rezervuarostroeniya i vozmozhnye puti ikh resheniya [Tekst] / G. P. Kandakov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. – 1998. – № 5. – S.24–26.

2. Ibragimov I.G. Monitoring sostoyaniya obolochkovykh konstrukcij metodom magnitnogo skanirovaniya [Elektronnij resurs] / I. G. Ibragimov, R. G. Vildanov // Neftegazovoe delo. – 2004. – Rezhim dostupu do zhurn. : <http://www.ogbus.ru>.

3. Razrusheniya v processe ehkspluatatsii vertikalnykh cilindricheskikh rezervuarov so stacionarnoj kryshej [Elektronnij resurs] / S. M. Kupreishvili // S. : Khimstalkon. – Rezhim dostupu : <http://www.himstalcon.ru/node/2582>.

4. Nastanova z provedennia tekhnichnoho diahnostuvannia vertykalnykh stalevykh rezervuariv [Tekst] : DSTU–N B A.3.1–10:2008. – [Chynnyi vid 2009–07–01]. – K.: Minrehionbud Ukrainy, 2009. – 63 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).

5. Zagorodnev V. I. Ostorozhno, svarka [Tekst] / V. I. Zagorodnev // Industriya. – 2005. – № 3 (41). – S. 2–3.

6. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh obektiv. Zahalni pryntsypy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel, sporud, budivelnykh konstruksii ta osnov. [Tekst] : DBN V.1.2-14-2009. [Chynnyi vid 2009-01-12]. – K. : Minrehionbud Ukrainy, 2009. – (Derzhavni budivelni normy Ukrainy)

7. Kontrol napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya oborudovaniya i konstrukcij pri ocenke ostatochnogo resursa na obektakh promyshlennosti i transporta [Elektronnij resurs] / ООО «Ehnergodiagnostika». – Reutov. – Rezhim dostupu : http://www.energodiagnostika.ru/ru/application_mm/app_mmm_sss_inspection.aspx.

8. Nikitina N. E. Preimushchestva metoda akoustuprogosti dlya nerazrushayushchego kontrolya mekhanicheskikh napryazhenij v detalyakh mashin [Tekst] / N. E. Nikitina, S. V. Kazachek // Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya. – 2010. – № 4 (32). – S. 18–28.

9. Konstruktsii budivel i sporud. Stalevi konstruksii. Normy proektuvannia, vyhotovlennia i montazhu. [Tekst] : DBN V.2.6-163 2010. – [Chynnyi vid 2011-01-12]. – K. : Minrehionbud

Ukrainy, 2011. – (Derzhavni budivelni normy Ukrainy)

10. Vlasov V. Z. Obshchaya teoriya obolochek i ee prilozhenie v tekhnike [Tekst] : ucheb. posobie / V. Z. Vlasov. – M.: Gostekhizdat, 1979. – 784 s.

11. Streng G. Teoriya metoda konechnykh ehlementov [Tekst] : ucheb. posobie / G. Streng, Dzh. Fiks. ; perev. s angl. V. I. Agoshkova, V. A. Vasilenko, V. V. Shajdurova. – M.: Mir, 1977. – 349 s.

12. Rezervuary vertykalni tsylindrychni stalevi dlia nafty ta naftoproduktiv. Zahalni tekhnichni umovy (HOST 31385–2008, NEQ) [Tekst] : DSTU B V.2.6–183:2011. – [Chynnyi vid 2012–10–01]. – K. : Minrehion Ukrainy, 2012. – 77 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).

13. Fomin A. V. Raschetno-ehksperimentalnye metody mekhaniki deformiruemogo tela v usloviyakh ogranichennoj iskhodnoj informacii [Tekst] : dis. na soiskanie uchenoj stepeni dokt. tekhn. nauk / A. V. Fomin. – M. : 1989.

14. Prejs A. K. Opredelenie napryazhenij v ob"eme detali po dannym izmerenij na poverkhnosti [Tekst] / A. K. Prejs. – M.: Nauka, 1979. – 128s.

15. Zamikhovskiy L. M. Matematychnye modeliuvannia napruzhenno-deformovanoho stanu rezervuariv z defektamy formy stinky [Tekst] / L. M. Zamikhovskiy, Kh. V. Pankiv // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. –

Khmelnytskyi, 2007. – T.1 (93), № 3. – S. 212–214.

16. Zamikhovskiy L. M. Otsinka napruzhenno-deformovanoho stanu vertykalnykh stalnykh tsylindrychnykh rezervuariv za peremishchenniamy tochok yikh poverkhni [Tekst] / L. M. Zamikhovskiy, Kh. V. Pankiv // Visnyk KDPU. – 2007. – Chast. 1, Vyp. 4. – S. 141–143.

17. Michael A. Nielsen, "Neural Networks and Deep Learning", Determination Press, 2015 [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu : <http://neuralnetworksanddeeplearning.com>.

18. Metrolohiia. Rezervuary stalevi vertykalni tsylindrychni. Metodyka povirky (HOST 8.570–2000. MOD) [Tekst] : DSTU 4147–2003. – [Chynnyi vid 2003–01–01]. – K.: Derzhspozhyvstandart, 2003. – 74 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).

19. Tiku SH. Ehffektivnaya rabota: SolidWorks 2004 : ucheb. posobie [Tekst] / Tiku SH. – SPb.: Piter, 2005. – 768 s. – ISBN 5–94723–841.

20. Martyniuk Kh. V. Metod otsinky napruzhenno-deformovanoho stanu vertykalnykh stalnykh tsylindrychnykh rezervuariv [Tekst] / Kh. V. Martyniuk, L. M. Zamikhovskiy // Ehffektyvnost realizatsyy nauchnoho, resursnoho, promyshlennoho potentsyala v sovremennykh usloviyakh : 7-ma shchorichna mizhnar. prom. konf. i blits-vystavka 12-16 liutoho 2007 r.: materialy konferentsii. – s. Slavske, 2007. – S. 321–322.