

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

*Паньків Христина Василівна*

УДК 681.518.5:621.643.8

**МЕТОД ТА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЗМІНИ НАПРУЖЕНО-  
ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МАТЕРІАЛУ СТІНОК  
ВЕРТИКАЛЬНИХ СТАЛЕВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ**

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин

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

Івано-Франківськ – 2013

Дисертацією є рукопис

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

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор  
**Заміховський Леонід Михайлович,**  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу МОН України, завідувач кафедри комп'ютерних технологій в системах управління і автоматики.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Кучерук Володимир Юрійович,**  
Вінницький національний технічний університет МОН України, завідувач кафедри метрології та промислової автоматики;

доктор технічних наук, професор  
**Ройзман Вілен Петрович,**  
Хмельницький національний університет МОН України, професор кафедри загальної механіки та комп'ютерних застосувань.

Захист відбудеться 27 вересня 2013 р. о 10<sup>00</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.03 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

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

Автореферат розісланий \_\_\_\_ серпня 2013 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук, професор



Дранчук М.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Нафтобази на території України та інших країн укомплектовані в основному вертикальними сталевими циліндричними резервуарами (РВС) різних розмірів, причому більшість з них знаходяться в експлуатації 30-40 років і мають істотний фізичний знос, що зумовлює необхідність постійного контролю технічного стану РВС для визначення можливості їх подальшої безпечної експлуатації. РВС є об'єктами підвищеної небезпеки, оскільки вони працюють у складному напруженому стані. На них діє комплекс впливових факторів: тиск речовини, що зберігається, температура, вітер, снігове навантаження, осідання фундаменту і багато інших. Одним з основних параметрів для контролю технічного стану РВС є інформація про їх напружено-деформований стан (НДС), зокрема розподіл напружень в стінці резервуара.

Проблемами визначення НДС РВС в процесі їх експлуатації займалися в свій час та займаються зараз вітчизняні вчені, такі як Єгоров Є.А., Заміховський Л.М., Олійник А.П., Ориняк І.В., Тороп В.М., Троїцький В.О., 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.

Існуючі експериментальні методи визначення НДС вимагають прямого контакту з поверхнею резервуара, володіють низькою оперативністю та є складними в застосуванні для таких великогабаритних об'єктів, якими є РВС, і використовуються для уточнення напружень лише на певній ділянці резервуара. Для використання існуючих математичних методів необхідна інформація про всі сили та навантаження, які діють на резервуар, що в більшості випадків є можливим лише з великим наближенням, тому вірогідність контролю цими методами є низькою. Тому розроблення методів і засобів контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС без врахування сил та навантажень, які діють на резервуар, що дасть змогу підвищити вірогідність контролю НДС, є актуальною науково-технічною проблемою, яка має важливе народногосподарське значення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основний зміст роботи складають результати наукових розробок та експериментальних досліджень, які проводилися протягом 2004-2013 років на кафедрі комп'ютерних технологій в системах управління та автоматики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Тематика роботи є частиною планових науково-дослідних програм по розвитку нафтопромислового комплексу України і базується на результатах держбюджетної науково-дослідної роботи «Методологічні засади побудови систем управління, діагностування та енергозберігаючих систем частотного управління електроприводом для об'єктів нафтогазового комплексу», номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ №0112U006551, де автор була безпосереднім виконавцем розділу розроблення методики контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС.

**Метою роботи** є підвищення вірогідності та оперативності контролю технічного стану РВС шляхом розроблення методу та системи контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС за просторовим переміщенням точок її поверхні, що дасть змогу не враховувати сили та навантаження, які діють на резервуар.

Для досягнення цієї мети потрібно вирішити такі задачі:

- проаналізувати завдання та сучасні досягнення в галузі методів контролю технічного стану РВС та контролю НДС їх стінок;
- розробити теоретичні засади методу контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС на основі закону Гука для пружнодеформованого ізотропного тіла;
- вдосконалити метод відтворення переміщень поверхні стінки резервуара за даними про координати окремих точок її поверхні;
- розробити метод та систему безконтактного вимірювання координат точок поверхні стінки РВС, а також апаратні та програмні засоби для їх реалізації;
- провести експериментальні дослідження та промислову апробацію розробленого методу контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС та створених апаратно-програмних засобів;
- розробити систему контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС за координатами точок їх поверхні, вимірюваними в два моменти часу, оцінити її метрологічні характеристики, вірогідність та оперативність контролю.

*Об'єкт досліджень* – процес контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС, зумовлений комплексною дією різноманітних впливових факторів.

*Предмет досліджень* – методи і технічні засоби для контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС.

*Методи дослідження.* Для вирішення поставлених у роботі задач використовувалися методи механіки суцільного середовища, чисельні методи математичного аналізу для розроблення моделі контролю зміни НДС, теорії планування експериментів для проведення експериментальних досліджень, методи обробки зображень та фотограмметрії для отримання даних про переміщення точок поверхні. При розробленні технічного забезпечення використовувалися методи системо- і схемотехніки, а при розробленні програмного забезпечення – методи об'єктно-орієнтованого програмування.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше розроблено теоретичні засади методу контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС за просторовими переміщеннями точок їх поверхні, що дає змогу не враховувати сили і навантаження, які діють на резервуар, і, таким чином підвищити вірогідність контролю.

2. Вдосконалено метод відтворення переміщень поверхні стінки РВС, який відрізняється від існуючих методів відтворення поверхонь з використанням згладжуючих сплайнів, вагові коефіцієнти яких визначаються ітераційною процедурою до досягнення визначеного рівня точності, тим, що за вагові коефіцієнти згладжуючого сплайну приймаються значення, які мінімізують нев'язки рівнянь рівноваги, що забезпечить виконання умов рівноваги.

3. Вдосконалено метод визначення зміни НДС в зварних з'єднаннях, який відрізняється від існуючих методів з використанням ефективного кінетичного коефіцієнта, тим, що враховує в місцях зварних з'єднань інші значення модуля Юнга та коефіцієнта Пуассона для визначення розподілу зміни НДС матеріалу стінки РВС по всій поверхні стінки.

4. Вперше розроблено метод врахування впливу переміщень хлопунів на точність обчислень зміни НДС матеріалу стінки РВС шляхом інвертування ділянки стінки з хлопунком в перший момент часу з вм'ятини у випуклість або навпаки до обчислення переміщень стінки, що дає змогу підвищити вірогідність контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС, в яких присутній дефект форми типу хлопун, за

допомогою розробленого методу.

5. Вперше розроблено метод дистанційного вимірювання координат точок стінки РВС, що базується на обробці фотографій проєкцій розгортки скануючого лазерного променя для підсвічення твірних стінки РВС, використання якого дає можливість безконтактно вимірювати координати стінки РВС і, таким чином, підвищити оперативність вимірювання координат.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в:

–розробленні програмного забезпечення системи контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС за переміщеннями точок її поверхні, яке дає змогу обчислювати тензори напружень в довільній точці стінки резервуара з більшою вірогідністю;

–розробленні апаратного та програмного забезпечення системи безконтактного вимірювання координат точок поверхні стінки РВС з використанням лазерного сканера, що забезпечує підвищення оперативності польових робіт;

–розробленні методики визначення циліндричних координат точок поверхні стінки РВС на основі обробки фотографій проєкцій розгортки скануючого лазерного променя на стінку РВС, що дає можливість оперативно вимірювати координати стінки РВС.

Розроблені метод та система контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС пройшли промислову апробацію на ЛВДС-5С (Рівненська обл., смт. Смига) ДП «ПрикарпатЗахідтранс» (акт від 05.04.2013 р.) і рекомендовані до впровадження.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень впроваджено в навчальному процесі – в робочих програмах дисциплін "Моделювання об'єктів нафтогазового комплексу" та "Об'єкти і процеси управління та діагностування нафтогазового комплексу", які читаються для студентів за напрямом підготовки 6.050201 – "Системна інженерія" (акт від 21.03.2013 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно [1, 2, 14]. У співавторстві проведено оцінювання сучасних методів визначення НДС РВС [15], проведено імітаційне моделювання для апробації розробленої моделі [3, 16, 9], проведено оцінювання впливу точності вимірювання переміщень точок поверхні стінки резервуара на результати математичного моделювання його НДС [4, 5, 11], запропоновано методи визначення параметрів згладжування для відтворення поверхні [12, 18, 10], запропоновано використовувати інші параметри сталі в місцях зварних з'єднань для врахування їх впливу на НДС резервуарів [17], проведено аналіз розробленої моделі для резервуарів з дефектами форми стінки [6], розроблено систему вимірювання циліндричних координат точок поверхні стінки резервуара [7, 19, 13], наведено часткові результати експериментальних досліджень [8].

Автор приймала безпосередню участь у проведенні промислових досліджень і обробці експериментальних даних.

**Апробація результатів досліджень.** Результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на IV науково-технічній конференції і виставці "Сучасні прилади, матеріали і технології неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання" (м. Івано-Франківськ, 2005 р.); XXIII міжнародній міжвузівській школі-семінарі "Методи і засоби технічної діагностики" (м. Йошкар-Ола (Росія), 2006 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції "Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті та економіці"

(м. Луганськ, 2006 р.); 7-й міжнародній промисловій конференції “Ефективність реалізації наукового, ресурсного і промислового потенціалу в сучасних умовах” (с. Славське, 2007 р.); міжнародній науково-практичній інтернет-конференції “Сучасні напрямки теоретичних і прикладних досліджень’2007” (м. Одеса, 2007 р.); 5-й міжнародній науково-практичній конференції “Комп’ютерні системи в автоматизації виробничих процесів” МНПК КСАВП-2007 (м. Хмельницький, 2007 р.); міжнародній науково-технічній конференції “Новітні ресурсозберігаючі технології у нафтогазовому комплексі” (м. Івано-Франківськ, 2007 р.); 4-й міжнародній молодіжній науково-технічній конференції “Сучасні проблеми радіотехніки і телекомунікацій” РТ-2008 (м. Севастополь, 2008 р.); міжнародній науково-технічній конференції “Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації”(м. Полтава, 2007 р.); міжнародній міжвузівській школі-семінарі “Методи і засоби діагностики в техніці та соціумі” МіЗДТС (м. Івано-Франківськ, 2007, 2011 рр.); наукових семінарах кафедри комп’ютерних технологій в системах управління та автоматики (2004 – 2013 рр.).

**Публікації.** За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 19 робіт, в тому числі 3 одноосібні, з яких 13 статей у фахових наукових виданнях і 4 тези доповідей на науково-технічних конференціях.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, викладених на 146 сторінках тексту, 76 рисунків, 12 таблиць, списку використаних джерел, який містить 109 найменувань, та додатків на 24 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність проблеми дослідження, розглянуті можливі напрямки застосування результатів розроблення, наведено зв’язок з іншими науковими темами, сформульовані мета та задачі досліджень, подано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача, подано інформацію про апробацію основних положень роботи.

У **першому розділі** на основі аналізу конструктивних особливостей РВС обґрунтовано необхідність періодичного контролю їх технічного стану. Проведений аналіз методів діагностування РВС показав, що методи дефектоскопії не дають достатньої інформації для контролю їх технічного стану та для визначення можливості їх подальшої безпечної експлуатації.

Аналіз існуючих експериментальних методів та приладів контролю НДС резервуара показав, що вони володіють рядом суттєвих недоліків: необхідністю підготовки контрольованої поверхні, складністю визначення положення давачів по відношенню до дії максимальних навантажень, залежністю результатів контролю від способів і умов вимірювання і є складними в застосуванні для таких великогабаритних об’єктів, якими є РВС, що зумовлює низьку оперативність контролю. Розглянуті математичні методи дають змогу одержувати адекватну картину НДС стінки резервуара лише при умові врахування всіх впливів та навантажень, які діють на резервуар, що є складною задачею і зумовлює низьку вірогідність контролю.

Запропоновано розглядати процес зміни НДС матеріалу стінки РВС в межах теорії пружності. На основі результатів аналізу проблеми визначені мета і задачі дослідження.

У другому розділі розроблені основні теоретичні положення, на яких ґрунтується запропонований метод контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС за просторовим переміщенням точок її поверхні, зокрема, розроблено математичну модель контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС, запропоновано метод відтворення поверхні стінки РВС за координатами її окремих точок, проведено перевірку математичної моделі на адекватність, запропоновано методи врахування впливу зварних з'єднань та хлопунів на контроль зміни НДС матеріалу стінки РВС.

При побудові математичної моделі процесу деформування матеріалу стінки РВС робиться припущення про те, що її можна розглядати як пружньодеформоване ізотропне тіло. Стінка резервуара моделюється у вигляді циліндра з заданими діаметром, висотою та товщиною кожного пояса і будується радіус-вектор кожної точки її поверхні в циліндричній системі координат:

$$\vec{r}_0 = \begin{cases} x = s, & 0 \leq s \leq L, \\ y = r \cos \varphi, & 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \\ z = r \sin \varphi; & R_{\min} \leq r \leq R_{\max}; \end{cases} \quad (1)$$

де  $s$ ,  $r$ ,  $\varphi$  – циліндричні координати;  $L$  – висота резервуара;  $R_{\min}$ ,  $R_{\max}$  – мінімальна та максимальна відстань від центра до внутрішньої та зовнішньої стінки резервуара відповідно.

Компоненти вектора переміщення точок поверхні стінки резервуара, які залежать від навантажень, що діють на стінку РВС, розглядаються в трьох напрямках:  $w_1(r, \varphi, s)$  – радіальні переміщення,  $w_2(r, \varphi, s)$  – кільцеві переміщення і  $w_3(r, \varphi, s)$  – меридіональні переміщення.  $w_1(r, \varphi, s)$  та  $w_3(r, \varphi, s)$  – рівні фізичним компонентам вектора переміщень, і вимірюються в одиницях довжини, а  $w_2(r, \varphi, s)$  – рівний фізичному компоненту вектора переміщень, помноженому на радіус і вимірюється в одиницях площі. За компонентами метричних тензорів для циліндричної системи координат з використанням формул Коші для малих переміщень знаходяться компоненти тензорів деформацій.

Компоненти тензора зміни напружень з використанням закону Гука для пружньодеформованого ізотропного тіла визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma^{11}(r, \varphi, s) &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial w_1(r, \varphi, s)}{\partial r} + \frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial w_2(r, \varphi, s)}{\partial \varphi} + \lambda \frac{\partial w_3(r, \varphi, s)}{\partial s} + \frac{\lambda}{r} w_1(r, \varphi, s), \\ \Delta\sigma^{12}(r, \varphi, s) &= \Delta\sigma^{21}(r, \varphi, s) = \frac{\mu}{r^2} \left( \frac{\partial w_1(r, \varphi, s)}{\partial \varphi} + \frac{\partial w_2(r, \varphi, s)}{\partial r} \right) - \frac{2\mu}{r^3} w_2(r, \varphi, s), \\ \Delta\sigma^{13}(r, \varphi, s) &= \Delta\sigma^{31}(r, \varphi, s) = \mu \left( \frac{\partial w_1(r, \varphi, s)}{\partial s} + \frac{\partial w_3(r, \varphi, s)}{\partial r} \right), \\ \Delta\sigma^{22}(r, \varphi, s) &= \frac{(\lambda + 2\mu)}{r^4} \frac{\partial w_2(r, \varphi, s)}{\partial \varphi} + \frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial w_1(r, \varphi, s)}{\partial r} + \frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial w_3(r, \varphi, s)}{\partial s} + \\ &\quad + \frac{(\lambda + 2\mu)}{r^3} w_1(r, \varphi, s), \\ \Delta\sigma^{23}(r, \varphi, s) &= \Delta\sigma^{32}(r, \varphi, s) = \frac{\mu}{r^2} \left( \frac{\partial w_2(r, \varphi, s)}{\partial s} + \frac{\partial w_3(r, \varphi, s)}{\partial \varphi} \right), \\ \Delta\sigma^{33}(r, \varphi, s) &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial w_3(r, \varphi, s)}{\partial s} + \frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial w_2(r, \varphi, s)}{\partial \varphi} + \lambda \frac{\partial w_1(r, \varphi, s)}{\partial r} + \frac{\lambda}{r} w_1(r, \varphi, s). \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\lambda$  та  $\mu$  – параметри Ламе.

Фізичні компоненти тензора напружень визначаються з врахуванням того, що вектори базису  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_3$  мають одиничну довжину, а довжина вектора  $\varepsilon_2$  становить  $r$  з врахуванням напружень в початковий момент часу.

За компонентами тензора напружень обчислюється інтенсивність напружень:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{(\sigma_{\phi}^{11} - \sigma_{\phi}^{22})^2 + (\sigma_{\phi}^{22} - \sigma_{\phi}^{33})^2 + (\sigma_{\phi}^{33} - \sigma_{\phi}^{11})^2 + 6((\sigma_{\phi}^{12})^2 + (\sigma_{\phi}^{23})^2 + (\sigma_{\phi}^{31})^2)}{2}}, \quad (3)$$

де  $\sigma_{\phi}^{ij}$  – фізичні компоненти тензора напружень з врахуванням напружень в початковий момент часу.

Інтенсивність напружень використовується для перевірки матеріалу на міцність згідно ДБН В.2.6-163 2010.

Дані про переміщення точок поверхні стінки РВС задаються дискретно, що вимагає застосування інтерполяційних та апроксимаційних процедур. Для відтворення переміщень поверхні стінки резервуара можна застосувати апроксимацію координат точок поверхні стінки в два моменти часу з використанням згладжуючих сплайнів, що дає змогу зменшити вплив похибки вимірювання.

Значення сплайнів, що обчислюються по різних координатах повинні співпадати в кожній точці. Тому, для апроксимації координат в залежності від полярного кута використовується згладжуючий періодичний сплайн, а від висоти та радіуса – кубічний сплайн, за вузлові точки якого приймаються згладжені в залежності від кута координати.

Згладжування полягає у введенні в функціонал, що мінімізується, ще одного доданку, який характеризує відхилення від заданих точок:

$$\int_{\chi_1}^{\chi_2} f''(\chi)^2 dx + \sum_k p_k (f(\chi_k) - \zeta_k)^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

де  $p_k$  – вагові коефіцієнти, які характеризують ступінь відхилення сплайну від заданих точок;  $f(\chi)$  – кубічний сплайн;  $\zeta_k$  – значення функції у вузлових точках;  $\chi_1$  і  $\chi_2$  – межі зміни аргументу функції.

Чим більший ваговий коефіцієнт певної точки, тим ближче до неї проходить згладжуючий сплайн і тим самим наближається до кубічного інтерполяційного сплайну. Для визначення вагових коефіцієнтів  $p_k$ , які характеризують ступінь відхилення сплайну від заданих точок, використовується напівобернений метод обчислення зміни напружень в залежності від переміщень окремо по кожному з напрямків.

Він полягає в тому, що за фізичними компонентами тензора зміни напружень з урахуванням квазістаціонарності процесу деформування перевіряється виконання умов рівноваги. Для системи рівнянь рівноваги шляхом підстановки фізичних компонент тензора напружень одержуються функції  $F_i(r, \varphi, s)$ ,  $i = 1, 2, 3$ , які є нев'язками кожного з рівнянь системи. Далі знаходяться величини:

$$\Delta_i = \int_V F_i(s, \varphi, r) dV \approx \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{\pi(R_{\max}^2 - R_{\min}^2)}{MN} L F_i(s_j, \varphi_L, R_3), \quad (5)$$

де  $V$  – об'єм стінки резервуара;  $M, N$  – кількість точок розбиття по повздовжній та полярній координаті.

Після цього розв'язується задача безумовної мінімізації функції багатьох змінних  $\Delta$  за методом Нелдера-Міда:



$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (\Delta_i)^2}; . \quad (6)$$

За обчисленими ваговими коефіцієнтами  $p_k$  будується згладжуючий періодичний сплайн і за координатами точок поверхні стінки РВС в два моменти часу відтворюються її переміщення

Для перевірки розробленої математичної моделі на адекватність при використанні даних про переміщення точок поверхні стінки РВС вимірюваних з похибкою проведено розрахунок НДС для відомої задачі Ламе. Задача Ламе полягає в визначенні напружень та деформацій круглого циліндра заданої товщини з пружного ізотропного матеріалу при умові, що він знаходиться під дією внутрішнього та зовнішнього тисків при постійній температурі, яка відповідає відсутності “температурних” напружень при відсутності деформацій. Кінці циліндра закріплені так, що переміщення вздовж її осі відсутні, а переміщення в поперечному напрямку нічим не обмежені. За початковий стан приймається стан, коли внутрішній та зовнішній тиски рівні нулю, тобто деформації і напруження в стінках труби відсутні. Таким чином можна промодельовувати «дихання» резервуара або зміну НДС при наповненні та опорожненні, коли переміщення поверхні стінки резервуара відбувається лише по радіусу.

Стінку РВС в початковий момент часу промодельовано ідеальним циліндром з радіусом 5 м, висотою 5 м та товщиною 4 мм. В початковий момент часу резервуар знаходить в ненапруженому стані. В контрольний момент часу на резервуар діє тільки внутрішній тиск 0,1 МПа. В промодельованому резервуарі нормальні кільцеві напруження на внутрішній поверхні стінки дорівнюють 125,05 МПа.

Для дослідження результатів використання згладжуючих сплайнів використовується імітаційне моделювання з використанням задачі Ламе. З метою моделювання похибки експериментальних вимірювань в кожній точці стінки резервуара визначаються переміщення:

$$\tilde{w}_1(r) = w_1(r) - e(1 - t) + et, \quad (7)$$

де  $e$  – рівень точності вимірювання переміщень;  $t$  – випадкові числа, що генеруються на відрізку  $[0;1]$ .

Використання даних про переміщення, одержаних з похибкою, може призвести до фізично неадекватних результатів. Напруження, обчислені за даними про переміщення стінки резервуара, апроксимованих з використанням згладжуючих сплайнів, в промодельованому РВС становлять 119 МПа і добре узгоджуються з точними даними аналітичного розрахунку відповідних напружень для задачі Ламе. Відносна похибка становить 4,8 %.

Для врахування впливу зварних з'єднань на НДС пропонується в місцях зварних швів задавати інші фізичні параметри матеріалу (модуль Юнга і коефіцієнт Пуасона). Матеріал стінки резервуара розглядається як макроскопічно неоднорідний і використовується детерміністичний підхід: вважається відомою залежність від циліндричних координат модуля Юнга  $E(r, \varphi, s)$  і коефіцієнта Пуасона  $\sigma(r, \varphi, s)$ . Тоді параметри Ламе в законі Гука для пружньодеформованого тіла також залежать від циліндричних координат. Використовувати ефективний кінетичний коефіцієнт не є доцільним, оскільки визначаються напруження в кожній точці стінки резервуара, а не їх усереднене значення. Параметри матеріалу зварних з'єднань рекомендується визначати з врахуванням коефіцієнту 0,8 для ручної зварки, та 0,9

для автоматичної зварки згідно РД 153-112-017-97.

В стінках РВС часто наявні дефекти форми типу хлопун. Хлопунами називають зони стінки чи днища РВС, в яких при зміні навантажень відбувається зміна форми з випуклості на вм'ятину або навпаки. *Наявність хлопунів при вимірюванні в перший момент часу впливає на визначення зміни НДС стінки РВС за переміщеннями точок поверхні, оскільки при зміні їх форми з вм'ятини на випуклість можна зафіксувати значні переміщення, які, однак, не викликають зміни напружень.*

Для врахування впливу переміщень хлопунів запропоновано проводити попередню обробку переміщень, виміряних в перший момент часу. Обробка полягає в виявленні зони хлопуну за зміною знаку другої похідної радіальних координат поверхні стінки по висоті в перший та другий моменти часу і перетворенні хлопуну так, щоб друга похідна стала такого самого знаку, як в другий момент часу.

З метою перевірки запропонованого підходу проведено розрахунок для ідеальної циліндричної поверхні стінки. Положення стінки з хлопуну в два моменти часу наведено на рис. 1.

Нехай в перший момент часу, у порожньому резервуарі хлопун має форму вм'ятини, тому профіль його стінки має наступний вигляд (а). Якщо резервуар наповнити, відповідно, профіль його стінки набуде положення (в). Однак, такі великі переміщення не будуть адекватно відображати зміну НДС, реальне переміщення твірної стінки під впливом тиску рідини буде від положення (б) до (в), оскільки при переміщенні твірної з положення (а) в положення (б) напруження не змінюватимуться.

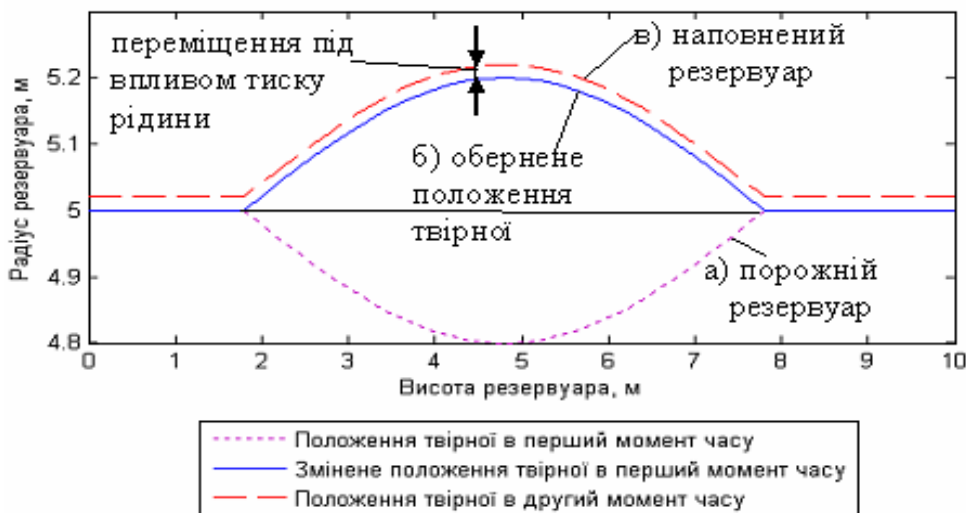


Рис. 1. Положення твірної стінки резервуара з хлопуну на випуклість (б) (або навпаки), але ще не набув положення, яке відповідає другому моменту часу (в). Зміна положення стінки з проміжного стану (б) у кінцевий стан (в) зумовлена впливом тиску рідини, що зберігається. Для компенсації значних переміщень при так званому ненавантаженому інвертуванні хлопуну (а-б) визначаються межі зони хлопуну, тобто точки, де друга похідна від радіальних координат точок стінки по висоті рівна нулю або змінює знак. Через кінці зони хлопуну будується пряма, симетрично до якої обертаються координати точок поверхні стінки РВС.

Залежність кільцевих напружень від висоти резервуара для змодельованого хлопуну використовуючи скоректовані значення переміщень показано на рис. 2.

З метою врахування впливу хлопуну координати точок стінки РВС в ділянці хлопуну в перший момент часу перетворюються так, щоб друга похідна стала такого самого знаку, як в другий момент часу. Тобто хлопун уже змінив своє положення з вм'ятини (а) на

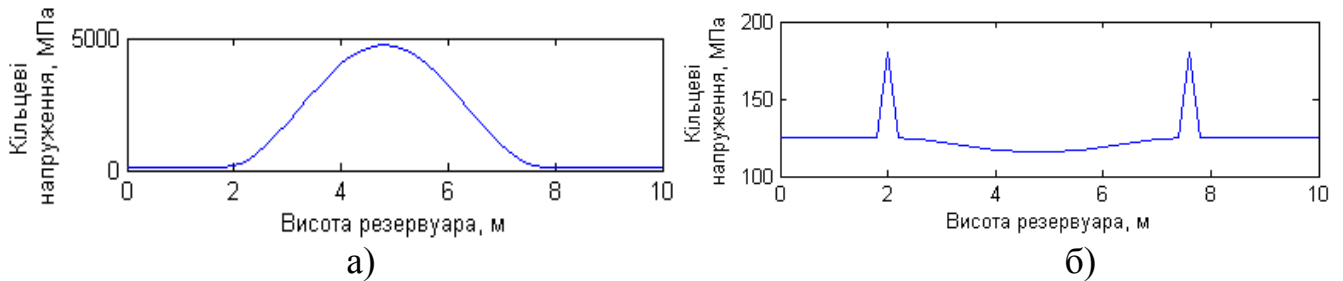


Рис. 2 Розподіл інтенсивності напружень по поверхні стінки:  
а) без врахування впливу хлопунa; б) з врахуванням впливу хлопунa.

Як видно з рис. 2 (а) напруження без врахування впливу хлопунa значно перевищують межу текучості сталі і не відповідають реальній картині процесу деформування. Натомість розподіл напружень на рис. 2 (б), де враховується переміщення під впливом тиску рідини, дає адекватні значення напружень: в зоні вм'ятини, що утворилася значення напружень дещо менші, що зумовлено меншим радіусом кривизни, на краях хлопунa напруження сягають більших значень, що відповідає реальній картині процесу деформування.

У випадку, якщо хлопун утворився між вимірюваннями в перший та другий моменти часу, на цій ділянці необхідно проводити додаткові дослідження іншими методами визначення НДС.

У третьому розділі проведено експериментальні дослідження розробленої математичної моделі на восьми РВС НГВУ “Надвірнанафтогаз”, “Долинанафтогаз” та на РВС-2000, №104, ЛВДС-5С (Рівненська обл. Дубенський р-н, смт. Смига) ДП «ПрикарпатЗахідтранс» при гідровипробовуванні для чого розроблено методику проведення експериментальних досліджень, програмне забезпечення для обробки експериментальних даних, наведено результати експериментальних досліджень, а також проведені дослідження зміни НДС матеріалу стінки резервуара при гідровипробовуванні та перевірку адекватності розробленого програмного забезпечення з використанням програмного пакету SolidWorks.

Методика проведення експериментальних досліджень передбачала вимірювання відхилення твірних стінки резервуара від вертикалі згідно ДСТУ 4147-2003 при калібруванні РВС геометричним методом.

Для проведення обчислень розроблена математична модель оцінювання зміни НДС стінки резервуара за переміщеннями точок поверхні реалізована в середовищі Matlab, для чого розроблено програмне забезпечення з графічним інтерфейсом. Дані про положення стінки резервуара в два моменти часу оброблені за допомогою розробленого програмного забезпечення і обчислено зміну НДС. За одержаними результатами зміни НДС зроблено висновки про необхідність додаткового контролю певних ділянок стінки РВС.

Зокрема за даними про положення стінки РВС 700 №2 на ННЕ “Берегомет” НГВУ “Надвірнанафтогаз”, отриманими в результаті калібрування РВС геометричним методом 12.08.2006 р. і 07.07.2008 р., видно, що положення стінки РВС значно змінилося, резервуар нахилився в сторону твірних № 22-23.

Як показала перевірка, така зміна положення стінки резервуара зумовлена частковим підмиванням основи резервуара. Інтенсивність зміни напружень показано на рис. 3, на якому видно, що в зоні твірних № 21-22 верхнього поясу інтенсивність зміни напружень становить 300 МПа, що перевищує межу текучості сталі з врахуванням коефіцієнтів умов роботи та надійності за матеріалом. Рекомендовано

вжити негайних заходів для усунення передаварійної ситуації.

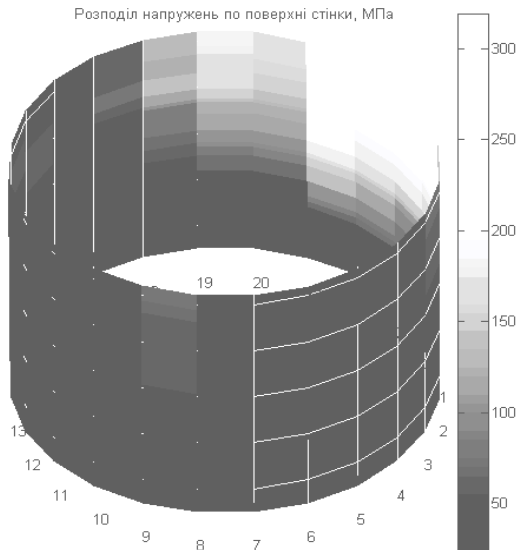


Рис. 3. Розподіл інтенсивності зміни напружень по поверхні стінки РВС

Результати експериментальних досліджень зведено в табл. 1, в якій, окрім основних характеристик резервуарів, вказано максимальну інтенсивність зміни напружень та номер поясу і твірної де вона досягається. Вони підтверджують адекватність розробленої математичної моделі контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС за переміщеннями точок її поверхні.

При проведенні експериментальних досліджень для визначення адекватності розробленої математичної моделі при гідровипробовуванні виявлено, що під час гідровипробовування інтенсивність зміни напружень в зонах хлопунів, особливо в околі 10 твірної, перевищує межу текучості з врахуванням коефіцієнтів умов роботи та надійності за матеріалом, а після гідровипробовування на

стінці РВС в районі твірних № 21-23 утворилася велика вм'ятина, де інтенсивність зміни напружень сягає межі текучості, а з врахуванням коефіцієнтів умов роботи та надійності за матеріалом умова перевірки на міцність не виконується, що вимагає проведення додаткових досліджень на цій ділянці.

Таблиця 1

### Результати експериментальних досліджень

№ п/п	Місцезнаходження резервуара	№ РВС	Тип резервуара	Призначення резервуара	Дата першого вимірювання	Дата другого вимірювання	Максимальна інтенсивність зміни напруження, МПа	Номер твірної	Номер поясу
1	ЦППН "Пасічна"	2	РВС-700	Зберігання нафти	22.06.2004	27.03.2007	180	14	5-6
2	ЦППН "Пасічна"	11	РВС-700	Технологічний	23.06.2004	07.12.2009	-	-	-
3	ЦППН "Пасічна"	9	РВС-1000	Зберігання нафти	10.05.2006	13.01.2012	160 150	1 23	4 5
4	ЦППН "Пасічна"	12	РВС-1000	Технологічний	24.06.2004	12.10.2009	-	-	-
5	ЦППН "Пасічна"	6	РВС-2000	Технологічний	25.05.2004	07.08.2007	225	4-5	7
6	ННЕ "Берегомет"	2	РВС 700	Зберігання нафти	12.08.2006	07.07.2008	300	21-22	6
7	ЦППН НГВУ "Долина нафтогаз"	3	РВС 400	Технологічний	12.12.2008	31.01.2013	220	1	5
8	ЦППН НГВУ "Долина нафтогаз"	2	РВС 5000	Зберігання нафти	29.12.2006	14.04.2008	93	2	4-5

Для перевірки адекватності моделі та розробленого програмного забезпечення проводилося імітаційне моделювання за допомогою програмного комплексу SolidWorks. Для цього побудовано оболонкову модель стінки резервуара висотою 10 м та радіусом 5 м з вм'ятиною з одного боку та випуклістю з протилежного боку. Стінка моделювалася як жорстко защемлена по нижньому краю. На стінку діяв тиск, який змінювався по висоті від  $10^5$  Па до 0 Па, імітуючи таким чином тиск речовини. В якості матеріалу стінки вибрано сталь AISI 1015

Steel, для якої модуль Юнга рівний  $2,05 \cdot 10^{11}$  Па, а коефіцієнт Пуасона – 0,29. Переміщення, отримані при цьому, опрацьовано з використанням розробленого програмного забезпечення і проведено порівняння напружень, отриманих за допомогою програмного комплексу SolidWorks (рис. 4) з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) та за результатами роботи програми (рис. 5).

Максимальних значень інтенсивності напружень сягають в зоні вм'ятини (обчислені за допомогою розробленого програмного забезпечення – 27,6424 МПа, а одержані з використанням SolidWorks – 29,7899 МПа). Відносна похибка становить 7,2%, що свідчить про адекватність розроблених моделі та програми і можливість їх використання для оцінювання зміни НДС стінок резервуарів.

У **четвертому розділі** розроблено систему контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС за просторовими переміщеннями точок її поверхні, що визначаються за допомогою розробленої системи визначення координат точок поверхні стінки резервуара, для реалізації якої розроблено кутовий позиціонер та необхідне програмне забезпечення, методику визначення координат точок поверхні стінки РВС, визначено загальну похибку вимірювання координат та проведено її промислову апробацію. Також обчислено вірогідність контролю НДС матеріалу стінок РВС.

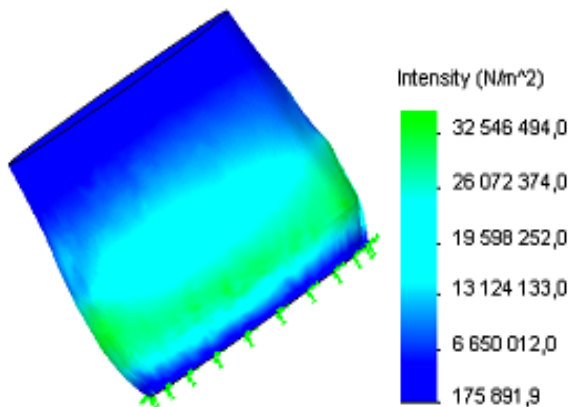


Рис. 4. Розподіл інтенсивності напружень в стінці резервуара, одержаних за допомогою програмного комплексу SolidWorks

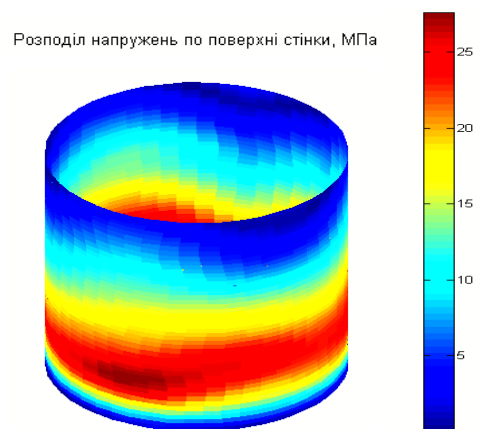


Рис. 5. Розподіл інтенсивності напружень в стінці резервуара, одержаних за допомогою розробленого програмного забезпечення

Система визначення координат точок поверхні стінки резервуара, яка проектує скануючу лінію лазера на стінку РВС і фотографує її твірну (рис. 6), складається з скануючого лазера, кутового позиціонера, лазерного далекоміра, фотоапарата та портативного комп'ютера (ПК) з необхідним програмним забезпеченням.

За допомогою кутового позиціонера з використанням лазера зеленого кольору та обертового дзеркала формується скануюча лінія, яка проектується на стінку резервуара під певним кутом, що задається позиціонером. Проекція фотографується і за допомогою розробленого програмного забезпечення за отриманою фотографією визначаються координати точок твірної стінки резервуара. Для цього вимірюється відстань від приладу до твірної. За допомогою вбудованого лазера червоного кольору на лазерній проекції твірної на заданій висоті позиціонується опорна точка, до якої і вимірюється відстань. Фотоапарат знаходиться на фіксованій відстані від кутового позиціонера, вони закріплені на кронштейні таким чином, що оптична вісь об'єктива фотоапарата паралельна напрямку нульового кута азимуту кутового



позиціонера. При проведенні вимірювань кронштейн встановлюється паралельно горизонту і перпендикулярно до нормалі до стінки РВС, таким чином напрям нульового кута азимуту кутового позиціонера спрямований по нормалі до стінки РВС.

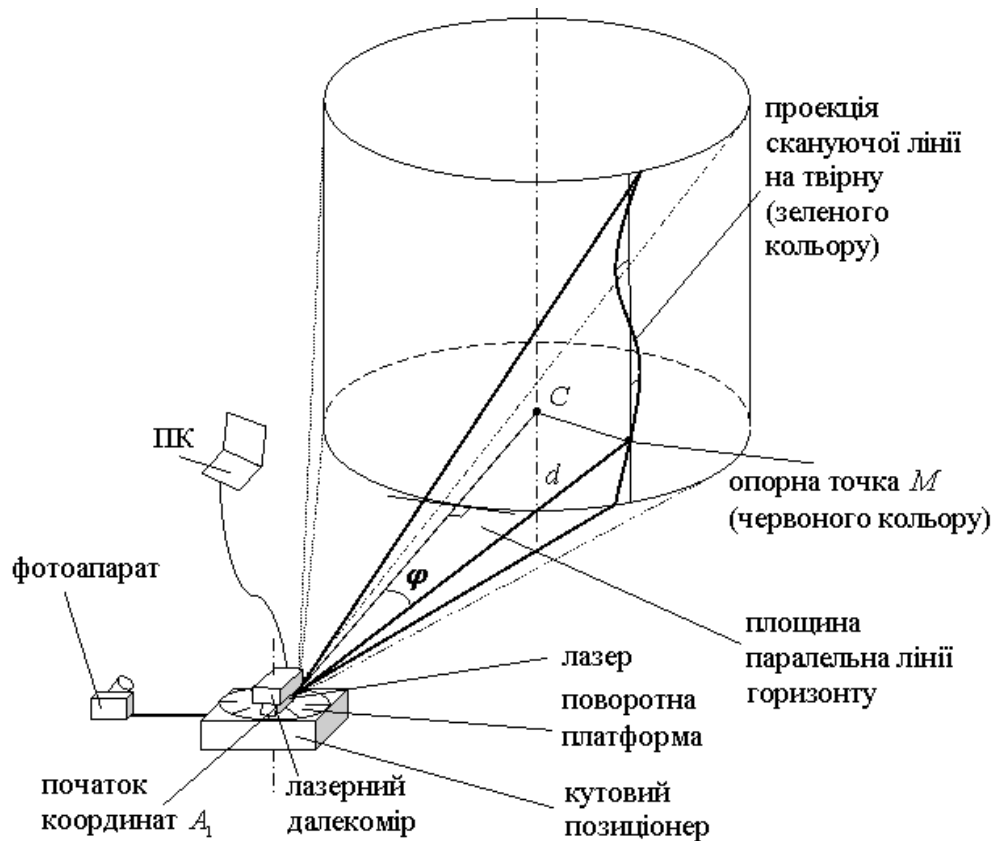


Рис. 6. Технологія визначення координат точок поверхні стінки РВС

Враховуючи вимоги до системи визначення координат точок поверхні стінки РВС розроблено функціональну схему кутового позиціонера, наведену на рис. 7.

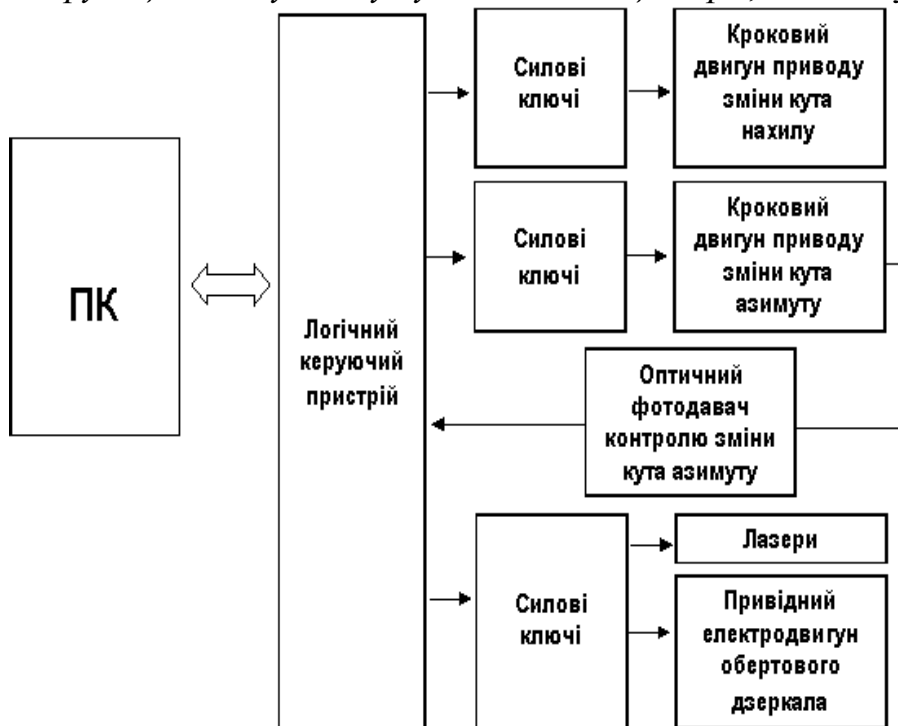


Рис. 7. Функціональна схема кутового позиціонера системи визначення координат точок поверхні стінки РВС

Вимірювання відстані до резервуара здійснюється за допомогою професійного лазерного далекоміра Bosch DLE50. Оператор має можливість віддалено керувати кутовим позиціонером за допомогою ПК. Логічний керуючий пристрій, після отримання та декодування команди оператора, через силові ключі подає напругу на реле включення лазера та приводу обертового дзеркала пристрою формування скануючої лінії чи на обмотки відповідних крокових електродвигунів, які обертають платформу в заданому напрямі або позиціонують опорний лазерний промінь. На рух платформи реагує оптичний фотодавач, що передає сигнал зворотного зв'язку назад до ПК, який в свою чергу, відображає фактичне положення платформи на моніторі. Зовнішній вигляд кутового позиціонера наведений на рис. 8.

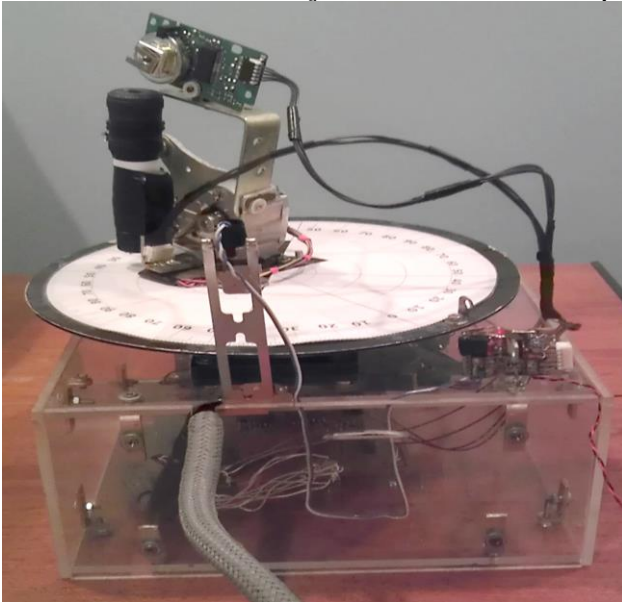


Рис. 8. Зовнішній вигляд кутового позиціонера

*Методика визначення циліндричних координат точок поверхні стінки резервуара* полягає в визначенні координати опорної точки, яка утворюється шляхом проекції червоної точки лазерного променя на стінку резервуара на заданій висоті. Для цього вимірюються відстань від опори приладу до цієї точки та кут між нормаллю до стінки резервуара та твірною. Перше положення кутового позиціонера приймається за початок координат. Вісь ординат направляється по нормалі до резервуара. Після того як проведено всі вимірювання видимої з даного положення опори поверхні стінки резервуара, опора і кутовий позиціонер переносяться в наступне положення і вимірювання

повторюються знову.

Координати всіх точок переводяться в систему координат першого положення опори і визначаються координати осі резервуара. Після цього перераховуються координати всіх точок відносно осі резервуара і переводяться в циліндричну форму, для чого враховується висота, на яку піднята опорна точка, і початок координат переноситься вниз на цю відстань.

За координатами опорної точки по фотографії визначаються координати всіх точок твірної. Для цього за проекцією твірної на фотографії визначаються координати в пікселях кожної точки твірної відносно опорної точки та переводяться в циліндричну систему координат з початком в центрі резервуара. Масштаб фотографії визначається за розміром матриці та роздільною здатністю фотоапарата, які входять в його технічні характеристики. Оскільки площа матриці фотоапарата спрямована паралельно твірним стінки РВС, то твірні на фотографії перпендикулярні до горизонту і їх розмір залежить від відстані до них, яка визначається як ордината опорної точки сфотографованої твірної. Якщо висота РВС не дає змоги зняти його одним кадром з певної відстані, то одним з варіантів вирішення цієї проблеми є зйомка РВС у перспективі з подальшою корекцією. Для цього змінюється кут нахилу фотоапарата.

Для виключення попередньої обробки зображення фотоапаратом зйомка проводиться в RAW-форматі. Обробка фотографій, отриманих за допомогою

розробленого методу здійснюється за допомогою *розробленого програмного забезпечення* з графічним інтерфейсом в середовищі Matlab з використанням декореляційного розтягнення, розбивки фотографії за трьома основними кольорами (червоний, зелений та синій), та бінаризація по кожному кольорі зокрема. Результатом обробки зображення є бінарний масив, де одиницями позначена проекція лазерного променя на твірну резервуара.

Розраховано *зведену сумарну похибку приладу*, яка становить 0,59% при вимірюванні РВС радіусом 5 м з трьох опор і 0,098% (4,9 мм при радіусі 5 м) при проведенні вимірювань з семи опор. Наведено залежність похибки вимірювання координат опорної точки від радіуса резервуара і кількості опор, з яких проводяться вимірювання.

*Промислова апробація* розробленої системи безконтактного вимірювання координат точок поверхні стінки резервуара проведена на РВС 200 №3 ГЗ №6 ЦППН НГВУ “Долианафтогаз”. В результаті обробки отриманих фотографій за допомогою розробленого програмного забезпечення отримано координати восьмої твірної стінки РВС, виміряної з одного положення опори. Отримані значення порівнювалися з результатами вимірювань відхилень восьмої твірної стінки РВС від вертикалі за даними протоколу геометричного калібрування. Математичне сподівання різниці між вимірюваннями за допомогою каретки та запропонованим методом дорівнює -0,25 мм, середньоквадратичне відхилення рівне 2,86 мм. Оскільки проводилося вимірювання однієї твірної, то в цій похибці не враховано похибки вимірювання координат опорної точки, а лише похибки визначення координат точки по фотографії. Слід зауважити, що похибка обчислення координат стінки залежить від способу обробки фотографії: чим чіткіше виділено проекцію твірної, тим точніший результат. Для отримання чіткої фотографії розгортки лазерного променя на твірну резервуара рекомендовано застосовувати лазер з більшою потужністю випромінювання (500 мВт).

*Система контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС* являє собою розроблене в середовищі Matlab програмне забезпечення, яке на основі вхідних даних про переміщення точок стінки РВС визначає зміну компонент тензора напружень матеріалу стінки РВС, які використовуються для перевірки відповідності стінки резервуара критеріям граничного стану за міцністю та стійкістю. За вхідні дані для системи контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС можна використовувати:

- дані про відхилення твірних стінки резервуара від вертикалі, отримані в результаті калібрування РВС геометричним методом згідно ДСТУ 4147-2003, які можна прийняти за положення стінки РВС в перший момент часу;
- дані, отримані за допомогою описаної вище системи визначення координат точок поверхні стінки РВС, використання якої дає змогу значно підвищити оперативність польових робіт.

Для оцінювання абсолютного значення НДС матеріалу стінки резервуара необхідна інформація про його НДС при першому вимірюванні в залежності від доступних даних про РВС. Якщо прийняти НДС резервуара при його вводі в експлуатацію за нульовий, можна визначити зміну НДС в процесі експлуатації. Також можна прийняти за початкове положення резервуар з ідеально циліндричною формою стінки з нульовим НДС. Окрім того, як значення напружень в перший момент часу можна використати результати їх розрахунку, які проводяться при частковому та повному діагностуванні РВС згідно ДБН В.2.6-163 2010.



Згідно ДБН В.2.6-163 2010 різниця між межею текучості сталі та гранично допустимими значеннями напружень визначається за коефіцієнтами умов роботи та надійності за матеріалом і становить 29%. Якщо вимірювання координат стінки РВС проводиться з похибкою 1 мм, а радіус резервуара становить 5 м (периметр близько 31 м), то похибка обчислення напружень становить 7 МПа. Для забезпечення похибки обчислення зміни напружень 29% при мінімальній гарантованій границі текучості сталі 245 МПа (для сталі Ст3пс5) точність вимірювання координат точок поверхні стінки повинна складати 7,8 мм. При більшому радіусі резервуара похибка обчислення напружень буде меншою, або з збереженням рівня похибки визначення напружень можна проводити вимірювання координат точок поверхні стінки з меншою точністю, оскільки при збільшенні радіуса стінки РВС точність вимірювання координат точок поверхні зменшується. Також зменшення впливу похибки вимірювання координат точок поверхні стінки РВС на точність обчислення зміни НДС її матеріалу забезпечується використанням згладжуючих сплайнів.

Методична похибка розробленої системи контролю зміни НДС матеріалу стінок РВС складається з похибок від неврахування температурного впливу та анізотропії на зміну НДС і її максимальне значення для сталі Ст3 становить 31 МПа.

*Обчислено вірогідність контролю НДС матеріалу стінок РВС з використанням розробленого методу, яка залежить не лише від показників інструментальної вірогідності і надійнісних характеристик об'єкту та технічних засобів, а й від повноти контролю і становить 91%, що підтверджує високу ефективність спроектованої системи контролю НДС. Також обчислено середню тривалість процедури контролю НДС матеріалу стінки РВС радіусом 5 м при вимірюванні з 7 опор, яка становить близько 2 год, що свідчить про значне підвищення оперативності контролю НДС в порівнянні з існуючими експериментальними методами.*

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу підвищення вірогідності та оперативності контролю технічного стану РВС шляхом розроблення системи та методу контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС за переміщенням точок її поверхні. Вирішення цієї задачі має важливе значення, оскільки дає змогу оцінити НДС матеріалу стінки РВС без врахування всіх сил та навантажень, що діють на резервуар з врахуванням значень напружень в перший момент часу.

1. На основі проведеного аналізу відомих методів і засобів визначення НДС встановлено, що існуючі експериментальні методи та засоби є складними в застосуванні для великогабаритних об'єктів, якими є РВС, та володіють низькою оперативністю, а математичні методи вимагають врахування всіх сил та навантажень, які діють на резервуар, що зумовлює їх низьку вірогідність.

2. Розроблено теоретичні засади методу контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС за просторовими переміщеннями точок її поверхні на основі закону Гука для пружньодеформованого ізотропного тіла, що дає змогу не враховувати сили і навантаження, які діють на резервуар, і, таким чином, підвищити вірогідність контролю. Для визначення зміни НДС в зварних з'єднаннях запропоновано враховувати інші значення модуля Юнга та коефіцієнта Пуассона, в місцях зварних з'єднань, зокрема, рекомендується використовувати коефіцієнти 0,8 для ручної зварки, та 0,9 для автоматичної зварки.

3. Вдосконалено метод відтворення переміщень поверхні стінки РВС, який відрізняється від існуючих методів відтворення поверхонь з використанням згладжуючих сплайнів, де вагові коефіцієнти визначаються ітераційною процедурою до досягнення визначеного рівня точності, тим, що за вагові коефіцієнти згладжуючого сплайну запропоновано використовувати значення, які мінімізують нев'язки рівнянь рівноваги, що забезпечить виконання умов рівноваги. Розроблено метод врахування впливу хлопунів на точність контролю зміни НДС матеріалу стінок резервуарів шляхом виявлення зони хлопуну та перетворення його в протилежний стан до обчислення переміщень стінки, що дасть змогу підвищити вірогідність контролю НДС в резервуарах з дефектами форми типу хлопун.

4. Розроблено метод та систему для безконтактного вимірювання координат точок стінки РВС з використанням розробленого кутового позиціонера для створення проекції скануючої лазерної лінії на твірну РВС під визначеним кутом з подальшою обробкою її фотографії за допомогою розробленого програмного забезпечення, що дає змогу підвищити оперативність польових робіт. Проведено метрологічний аналіз розробленої системи вимірювання координат точок поверхні стінки. Наведено залежність похибки вимірювання координат опорної точки від радіуса резервуара і кількості опор, з яких проводяться вимірювання, що дало змогу розрахувати сумарну зведену похибку розробленої системи вимірювання координат точок поверхні стінки, яка становить 0,59% при вимірюванні РВС радіусом 5 м з трьох опор і 0,098% при проведенні вимірювань з семи опор.

5. Результати проведених експериментальних досліджень та імітаційного моделювання з використанням програмного пакету SolidWorks підтверджують адекватність запропонованої математичної моделі. Відносна похибка при моделюванні з використанням програмного пакету SolidWorks становить 7,2%, що свідчить про достатню точність розрахунків при використанні запропонованої математичної моделі. Проведено апробацію розробленого методу та системи визначення координат стінки резервуара за переміщеннями точок її поверхні в польових умовах. Середньоквадратичне відхилення різниці між координатами, визначеними за допомогою розробленої системи та з використанням каретки, становить 2,86 мм.

6. Розроблено систему контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС за переміщеннями точок їх поверхні без врахування сил та навантажень, які діють на резервуар, що дає змогу підвищити вірогідність та оперативність контролю. Похибка контролю зміни напружень при вимірюванні координат з похибкою 1 мм при радіусі резервуара 5 м становить 7 МПа. Вірогідність контролю НДС матеріалу стінки РВС становить 91%. Середня тривалість процедури контролю НДС матеріалу стінки РВС радіусом 5 м при вимірюванні з 7 опор становить 2 год.

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

1. Мартинюк Х. В. Статистична обробка даних в задачах технічної діагностики з використанням методу імітаційного моделювання [Текст] / Х. В. Мартинюк // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ. – 2005. – № 15. – С. 130–133.

2. Паньків Х. В. Контроль зміни напружено-деформованого стану стінок вертикальних сталевих циліндричних резервуарів [Текст] / Х. В. Паньків // Восточно-европейский журнал передових технологий. – 2013. – № 2/7 (262). – С. 50–

52.

3. Заміховський Л. М. Математичне моделювання напружено-деформованого стану вертикальних сталених резервуарів / Л. М. Заміховський, Х. В. Мартинюк // «Наукові вісті» інституту менеджменту і економіки «Галицька академія». – 2006. – №2(10). – С. 96–100.

4. Заміховський Л. М. Оцінка впливу точності вимірювання переміщень точок поверхні резервуару на результати математичного моделювання його напружено-деформованого стану [Текст] / Л. М. Заміховський, Х. В. Мартинюк // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2007. – № 4 (110), Част. 2. – С. 52–56.

5. Заміховський Л. М. Визначення напружено-деформованого стану резервуару за переміщеннями точок його поверхні з використанням поліномів Бернштейна [Текст] / Л. М. Заміховський, Х. В. Паньків // Восточно-европейский журнал передових технологій. – 2007. – № 4/4 (28). – С. 28–30.

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

7. Заміховський Л. М. Спосіб вимірювання циліндричних координат точок поверхні вертикального сталеного резервуара для оцінки його напружено-деформованого стану [Текст] / Л. М. Заміховський, Х. В. Паньків // Наукові вісті Інституту менеджменту і економіки «Галицька академія». – 2007. – № 1 (11). – С. 42–46.

8. Заміховський Л. М. Оцінка напружено-деформованого стану вертикальних сталених циліндричних резервуарів за даними геометричного калібрування [Текст] / Л. М. Заміховський, Х. В. Паньків // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ. – 2007. – № 19. – С. 22–24.

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

10. Олійник А. П. Оцінка точності апроксимації осей трубопроводів в залежності від параметрів процедури згладжування експериментальних даних [Текст] / А. П. Олійник, Х. В. Мартинюк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – № 4(17). – С. 48–51.

11. Олійник А. П. Оцінка впливу точності вимірювання переміщень точок поверхні на результати математичного моделювання напружено-деформованого стану трубопроводів [Текст] / А. Олійник, Х. Мартинюк, І. Гураль. // Фізика і хімія твердого тіла. – 2006. – Т. 7, № 2. – С. 374–377.

12. Мартинюк Х. В. Математичне моделювання напружено-деформованого стану ділянок трубопроводу з оптимізацією процедури згладжування початкових даних [Текст] / Х. В. Мартинюк, А. П. Олійник // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ. – 2005. – № 13. – С. 21–25.

13. Заміховський Л. М. Метод і система контролю зміни напружено-деформованого стану стінки вертикальних сталених циліндричних резервуарів [Текст] / Л. М. Заміховський, Х. В. Паньків, Ю. В. Паньків, І. Р. Дорофей // Нафтогазова енергетика. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ. – 2013. – № 1 (19). –

C. 99–108.

14. Pankiv Kh. V. The vertical steel cylindrical tank's deflected mode estimation based on it's surface points displacement [Текст] / Kh. V. Pankiv // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2008»: 4-та міжнар. молодіжна наук.-техн. конф., 21-25 квітня 2008 р. : тези доповідей. – Севастополь, 2008. – С. 195.

15. Замиховский Л. М. Анализ современных методов оценки напряженно-деформированного состояния стальных вертикальных цилиндрических резервуаров [Текст] / Л. М. Замиховский, Х. В. Мартинюк // Методы и средства технической диагностики: XXIII международная межвузовская школа-семинар, 28 июня-5 июля 2006 г. : сборник научных статей, вып. XXIII. – Йошкар-Ола, 2006. – С. 165–174.

16. Мартинюк Х. В. Метод оцінки напружено-деформованого стану вертикальних сталених 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 бліц-виставка 12-16 лютого 2007 р. : матеріали конференції. – с. Славське, 2007. – С. 321-322.

17. Замиховський Л. М. Математичне моделювання напружено-деформованого стану резервуарів з врахуванням зварних з'єднань [Текст] / Л. М. Замиховський, Х. В. Паньків // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований». – Одеса, 2007. – Т. 1. – С. 36–40.

18. Олійник А. П. Методика визначення просторового положення осі трубопроводу за відомими розподілами поздовжніх напружень та початковим наближенням координат у вузлових точках [Текст] / А. П. Олійник, Х. В. Мартинюк // «Наукові вісті» інституту менеджменту і економіки «Галицька академія». – 2003. – №2(4). – С. 124–129.

19. Замиховський Л. М. Побудова 3D моделей об'єктів шляхом ковзного сканування їх поверхні [Текст] / Л. М. Замиховський, Ю. В. Паньків, Х. В. Паньків // «Наукові вісті» Приватного вищого навчального закладу «Галицька академія». – 2011. – № 2 (19). – С. 57–62.

## АНОТАЦІЯ

**Паньків Х. В. Метод та система контролю зміни напружено-деформованого стану матеріалу стінок вертикальних сталених циліндричних резервуарів. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ. – 2013.

В роботі запропоновано метод оцінювання зміни НДС матеріалу стінки РВС за даними про переміщення точок її поверхні без визначення сил та навантажень, що діють на резервуар, з використанням згладжуючих сплайнів для відтворення стінки РВС за координатами окремих точок, що дає змогу зменшити вплив похибки вимірювання, з врахуванням просторового переміщення стінки, дефектів форми стінки та впливу зварних з'єднань. Наведено результати експериментальних досліджень та імітаційного моделювання з використанням програмного пакету SolidWorks, які підтверджують адекватність запропонованої математичної моделі та

розробленого програмного забезпечення. Розроблено систему для безконтактного дистанційного сканування стінки резервуара з використанням лазера, яка, в комплексі з розробленим програмним забезпеченням, дає змогу методом непрямих вимірювань визначити координати стінки РВС. Розроблено методичне, технічне та програмне забезпечення для реалізації запропонованого методу.

**Ключові слова:** напружено-деформований стан, вертикальний сталевий циліндричний резервуар, переміщення, координати, згладжуючий сплайн, лазерний профілемір, дистанційне сканування.

## АННОТАЦИЯ

**Паньків К. В. Метод и система контроля изменения напряженно-деформированного состояния материала стенок вертикальных стальных цилиндрических резервуаров. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск. – 2013.

В работе предложен метод оценивания изменения НДС материала стенки РВС по данным о пространственном перемещении точек ее поверхности, каждое из которых зависит от трех координат, без определения сил и нагрузок, действующих на резервуар, который позволяет вычислить все шесть компонент тензора напряжений и интенсивность напряжений.

Для учета сварных соединений в разработанной математической модели процесса деформирования стенки РВС предложено рассматривать материал стенки как макроскопически неоднородный и считать известной зависимость модуля Юнга и коэффициента Пуассона, а, следовательно, и параметров Ламе в законе Гука для упругодеформированного тела, от цилиндрических координат.

Предложен метод уменьшения влияния хлопнунов на точность определения изменения НДС материала стенки резервуара, который состоит в определении участка хлопнуна по изменению знака второй производной координат стенки и последующем переводе их таким образом, чтобы вторая производная в два моменты времени имела одинаковый знак.

Разработано программное обеспечение для реализации математической модели оценивания изменения НДС материала стенки РВС за перемещениями точек ее поверхности, которое позволяет вычислить все шесть компонент тензора и интенсивность напряжений и построить их графики.

Показано, что в качестве данных о перемещении стенки резервуара можно использовать данные отклонения образующих стенки от вертикали, полученные в результате калибровки РВС геометрическим методом. По результатам проведенных экспериментальных исследований на НГДУ "Надворнаянефтегаз" и "Долинанафтегаз" проведено оценивание изменения НДС стенки резервуаров и показано, в каких зонах стенки резервуаров нужно провести дополнительные исследования.

Проведены экспериментальные исследования по данным отклонений стенки РВС при гидроиспытании на РВС-2000, № 104, ЛПДС-5С (Ровенская обл. Дубенский р-н, пгт. Смыга) ГП «ПрикарпатЗападтранс», которые подтвердили адекватность разработанных математического и программного обеспечений

физической картине процесса.

Проведена проверка разработанной модели и программного обеспечения с использованием программного комплекса SolidWorks и показано, что они являются адекватными и могут использоваться для оценивания изменения НДС материала стенок резервуаров.

Создана система бесконтактного дистанционного сканирования стенки резервуара с использованием лазера, которая, в комплексе с разработанным программным обеспечением, позволяет методом косвенных измерений определить координаты стенки. Разработано программное обеспечение для дистанционного управления угловым позиционером с использованием LPT порта и для обработки фотографий профиля производящих и расчета координат точек поверхности стенки РВС.

Проведено расчет суммарной погрешности разработанной системы и вероятности контроля НДС материала стенок РВС. Проведена апробация разработанных метода и системы определения координат стенки РВС за перемещениями точек ее поверхности в полевых условиях.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, вертикальный стальной цилиндрический резервуар, перемещения, координаты, сглаживающий сплайн, лазерный профиломер, дистанционное сканирование.

## ABSTRACT

**Pankiv Kh. V. The method and system to control the stress-strain state changes in wall material of the vertical cylindrical steel tanks– Manuscript.**

The thesis for technical sciences candidate's degree in speciality 05.11.13 – devices and methods of control and determination of composition substances. – Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas, Ivano-Frankivsk.– 2013.

The thesis presents a method for estimation of stress-strain state changes in wall material of a vertical cylindrical steel tank using its surface's points displacements without determining the forces and loads acting on the tank, using smoothing splines to restore tank's wall using coordinates of individual points on the surface, which allows to reduce the influence of measurement errors, considering wall 3-dimensional displacement, walls form defects and impact welds. The results of experimental studies and simulation using the software package SolidWorks, that confirms the adequacy of the proposed mathematical model and the developed software, are given. A system for contactless remote scanning of tank's wall using a laser, which, together with developed software, allows to determine the coordinates of the wall using indirect measurement method, are developed. Methodical implementation, hardware and software to realize the proposed method are developed.

**Keywords:** stress-strain state, vertical cylindrical steel tank, movement, coordinates, smoothing spline, laser profilometer, remote scanning.

Підписано до друку 25.07.2013 р. Формат 60х84 1/16

Ум. друк. арк. 1.0. Обл.-вид. арк. 1.1

Наклад 100 прим. Зам. № 73

Віддруковано на поліграфічній дільниці

ПВНЗ “Галицька академія”

Свідоцтво суб’єкта видавничої справи ДК № 3641 від 14.12.2009

76006, м. Івано-Франківськ, вул. Вовчинецька, 227,

тел. (0342) 72-30-26

