

ВИКОРИСТАННЯ УДОСКОНАЛЕНИХ ЗАСОБІВ ТЕНЗОМЕТРУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГАЗОПРОВІДІВ

О.М. Мандрик

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727186,
e-mail: omandryk@mail.ua

Екологічна безпека експлуатації газопроводів в умовах триваючого фізичного зношування зумовлює підвищення значення методів і засобів їх діагностики. Проблема підвищення якості діагностування газопроводів може бути вирішена за допомогою комплексного використання сучасних засобів діагностики, в тому числі тензометричних станцій. Тому був розроблений пристрій, призначений для синхронної реєстрації інформаційних сигналів від 20-ти тензорезисторів та, після закінчення циклу вимірювання, передачі результатів реєстрації в персональний комп'ютер через бездротовий Bluetooth інтерфейс. Інформаційними сигналами тензорезисторів є значення напруги, пропорційні деформаціям ділянок поверхні, на які наклеєні відповідні датчики. Також для оцінки швидкоплинних процесів динамічного навантаження розроблено і виготовлено АЦП для тензодавачів з дискретністю сигналу 0,1 с. Розроблені пристрої пройшли апробацію в лабораторних умовах. Аналіз експериментальних результатів засвідчив працездатність удосконалених засобів тензометрування та можливість їх використання для оцінки напружено-деформованого стану та підвищення екологічної безпеки експлуатації газопроводів.

Ключові слова: безпека, діагностика, напружено-деформований стан, тензорезистори.

Экологическая безопасность эксплуатации газопроводов в условиях продолжающегося физического износа приводит к повышению значения методов и средств их диагностики. Проблема повышения качества диагностирования газопроводов может быть решена с помощью комплексного использования современных средств диагностики, в том числе тензометрических станций. Поэтому было разработано устройство, предназначенное для синхронной регистрации информационных сигналов от 20-ти тензорезисторов и, после окончания цикла измерения, передачи результатов регистрации в персональный компьютер через беспроводную Bluetooth интерфейс. Информационными сигналами тензорезисторов являются значения напряжения, пропорциональные деформациям участкам поверхности, на которые наклеены соответствующие датчики. Также для оценки быстротекущих процессов динамической нагрузки разработана и изготовлена АЦП для тензодатчиков с дискретностью сигнала 0,1 с. Разработанные устройства прошли апробацию в лабораторных условиях. Анализ экспериментальных результатов показал работоспособность усовершенствованных средств тензометрирования и возможность их использования для оценки напряженно-деформированного состояния и повышения экологической безопасности эксплуатации газопроводов.

Ключевые слова: безопасность, диагностика, напряженно-деформированное состояние, тензорезисторы.

Ecological safety of gas pipelines in terms of continued physical deterioration increases importance of the methods and means of their diagnostics. The problem of improving of the pipeline diagnostics quality can be solved through a comprehensive utilization of modern diagnostic tools, including strain-gauge stations. Therefore, the device that is designed for simultaneous registration of information signals from 20 strain gauges and, after the measurement cycle completion, transmission of the registration results to the personal computer via a wireless Bluetooth interface was developed. Strain gauge information signals are the voltage magnitudes proportional to deformations of the surface areas that have the correspondent sensors attached. ADC was also developed and manufactured for strain gauge sensors with the signal discreteness of 0.1 s to evaluate rapid dynamic loading processes. The developed devices were tested in the laboratory conditions. The experimental results analysis showed performance capability of the enhanced strain-gauging tools and possibility of their utilization for evaluation of the stress-strain state and improvement of the environmental safety when operating gas pipelines.

Keywords: safety, diagnostics, stress-strain state, strain gauges.

Вступ

Екологічна безпека експлуатації обладнання на небезпечних промислових об'єктах зумовлює підвищення значення методів і засобів їх діагностики. Особливо це стосується газопроводів великого діаметру, аварії з якими можуть призвести до людських жертв, значного забруднення навколишнього середовища та великих економічних витрат. У зв'язку з цим дуже важливим завданням є визначення науково обґрунтованими методами технічного стану і можливості безпечної експлуатації відповідального обладнання, особливо за межами нормативного терміну експлуатації.

Сучасне визначення технічної діагностики як галузі науково-технічних знань, суттю якої є теорія, методи і засоби пошуку та визначення дефектів технічних об'єктів, охоплює методи і засоби неруйнівного контролю. Неруйнівний контроль є засобом експертизи безпеки експлуатації, тому достовірність оцінки технічного стану обладнання багато в чому визначається засобами неруйнівного контролю.

Виділення невирішених частин

В існуючій практиці оцінки залишкового ресурсу газопроводів помітна тенденція до переходу від дефектоскопії до методів технічної

діагностики, які поєднують механіку руйнування, металознавство і неруйнівний контроль. Відомі методи оцінки напруженого стану, міцності і довговічності МТ тривалої експлуатації з дефектами не враховують окремих особливостей умов експлуатації. У зв'язку з цим виникає необхідність удосконалення існуючих та створення нових методів і засобів діагностування напруженого стану й оцінки залишкової міцності і довговічності МТ, які дали б змогу брати до уваги такі важливі умови експлуатації нафтогазопроводів, як: двовісне і двочастотне силове навантаження, період зародження тріщини біля концентраторів напружень, вплив корозивно агресивних і водневомісних середовищ, вологого сірководню, випадковості навантажень, змінних за довжиною і товщиною труби залишкових напружень у зонах зварних з'єднань, які сприяють зменшенню їх міцності і довговічності.

Не зважаючи на досить широкий спектр засобів неруйнівного контролю і систем діагностики, що випускається сучасною промисловістю, великої кількості розроблених методів прогнозування ресурсу, проблема об'єктивної та надійної оцінки технічного стану і прогнозування ресурсу небезпечних об'єктів виробництва на сьогоднішній час не вирішена. Для виконання розрахунків необхідною умовою є точне знання усіх режимів експлуатації або поточної діаграми навантаження. Здійснення стандартних механічних випробувань на діючому обладнанні є неможливим, тому розрахунок напружено-деформованого стану для оцінки довговічності чи залишкового ресурсу здійснюється за допомогою даних про властивості матеріалу в стані поставки, що не забезпечує необхідну точність. Суттєвим недоліком сучасних методологій з оцінки залишкового ресурсу обладнання є відсутність об'єктивних діагностичних параметрів і приладів контролю, які б дали змогу вчасно визначати зони з граничним станом металу. Для визначення ділянок обладнання, які найбільше підлягають впливу пошкоджень, необхідним є знання фактичного напружено-деформованого стану. Для вирішення цієї проблеми може бути використано тензометричний метод дослідження. Він дає змогу визначати НДС ділянок обладнання за визначеними зв'язками навантаження-деформація, а потім, використовуючи розрахункові засоби механіки руйнування, здійснити прогнозування ресурсу обладнання.

Формування цілі

Першим і дуже відповідальним етапом є визначення усіх конструктивних параметрів газопроводу, напруженого стану і прогнозування залишкової міцності та довговічності труб і зварних з'єднань з тріщиноподібними дефектами на базі розвитку існуючих і створення нових методів оцінки їх роботоздатності.

Проблема підвищення якості діагностування великогабаритного обладнання може бути вирішена за допомогою комплексного використання сучасних засобів діагностики, в тому числі тензометричних станцій.

Метою даної роботи є удосконалення засобів тензометрування для підвищення безпеки експлуатації відповідального великогабаритного обладнання.

Виклад основного матеріалу

Умови експлуатації труб газотранспортних систем останній час відчутно змінилися. Це пов'язано зі збільшенням кількості споживачів і нерівномірним відбором газу. Різке збільшення або зменшення відбору газу споживачами призводить до неусталеності його руху в трубопроводі, причому тривалість неусталених процесів внаслідок зміни густини газу може вимірюватись годинами чи навіть добами. До аналогічних наслідків призводить зменшення або збільшення підкачування газу, раптове включення або відключення компресорних станцій, відкриття чи закриття кранів та ін. Разом з тим, довготривала експлуатація трубопроводів, транспортування та зберігання труб спричиняють різні види їх пошкоджень. Тому для реалізації мети був розроблений пристрій, який призначений для синхронної реєстрації інформаційних сигналів від двадцяти тензорезисторів та, після закінчення циклу вимірювання, передачі результатів реєстрації в персональний комп'ютер через бездротовий Bluetooth інтерфейс. Інформаційними сигналами тензорезисторів є значення напруги, пропорційні деформаціям ділянок поверхні, на які наклеєні вказані давачі.

Кожен з двадцяти тензосенсорів з номінальним електричним опором 200 Ом підключений за схемою повного тензорезистивного моста. З метою мінімізації впливу технологічного розкиду номінального значення опору кожного з тензорезисторів на результати вимірювання деформації та значення початкового зміщення (offset output) на виході мостової схеми для кожного з двадцяти тензорезисторів реалізовано окрему мостову схему з індивідуально підібраними за результатами тестування тензорезисторами. Високоточне значення опорної напруги живлення тензомоста на рівні 1,8 В формується інтегральною схемою прецизійного джерела опорної напруги та подається в одне з плечей тензомоста. Значення напруги розбалансу в другому плечі тензомоста, що пропорційне деформації, вимірюється за допомогою спеціалізованої чотириканальної інтегральної схеми дельта-сигма аналого-цифрового перетворювача ADS1234IPW. Період між повторними операціями зчитування інформації з серії двадцяти тензосенсорів та його АЦП перетворення складає 1 с, роздільна здатність кожного каналу аналого-цифрового перетворювача – 224. Розроблене системне програмне забезпечення мікропроцесорного керування та схема реалізація включення АЦП перетворювача забезпечує вимірювання напруги на виході тензомоста з точністю 10 мкВ у діапазоні $\pm 0,9$ В, тобто забезпечується реалізація реального двополярного 18-бітного АЦП перетворення інформаційного сигналу сенсора деформації, а основна при-

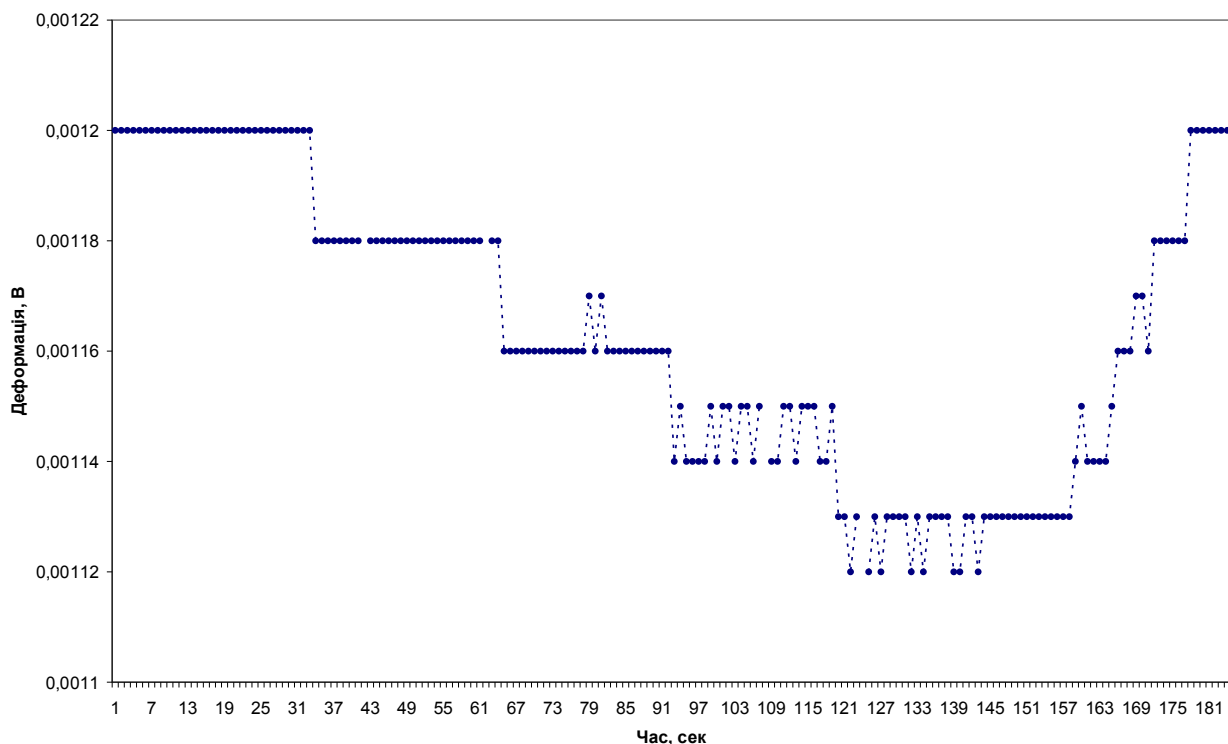


Рисунок 1 – Результати випробувального тестування пристрою АЦП

ведена похибка складає 0,001% від верхньої границі вимірювання. Вказане підтверджують результати тестування одного з двадцяти каналів (рис. 1). Тестування виконувались шляхом реєстрації протягом 30 с сигналу з тензомоста за покрокової зміни (0,5 кг) навантаження на консольно закріплену металеву балку, на поверхню якої попередньо було наклеєно один з тензорезисторів мостової схеми.

Викиди на окремих рівнях сигналу на виході тензомоста (рис. 1), зареєстровані розробленою вимірювальною системою, зумовлені перехідними процесами та вібрацією балки після прикладення навантаження і затухають за умови збільшення періоду реєстрації. Результати тестування інформаційно-вимірювальної системи свідчать про чутливість приладу на рівні 10мкВ/0,25 кг навантаження. Тоді максимальне значення навантаження за умови відсутності руйнування тензорезистора і роботи його в лінійному діапазоні складатиме 22,5 тис. кг.

Одна з переваг розробленого пристрою полягає в тому, що напруга живлення в плече живлення кожного з тензорезисторних мостів подається лише впродовж часу вимірювання на ньому, тобто приблизно 40 мс, через період 1 с. Це зводить до мінімуму складову величину невизначеності вимірювань, що зумовлена зміною сигналу на виході тензомоста через нагрівання тензорезисторів мостів струмом у моменти часу, коли вони не здійснюють вимірювання. Додатковою перевагою запропонованої конструкції вимірювального пристрою є виключення проміжного підсилення напруги сигналу на виході тензомоста у вимірювальному ланцюгу між мостом та АЦП, що суттєво знижує похибку вимірювання таких пристроїв.

Значення сигналу напруги розбалансу тензомоста, зумовлене деформацією тензосенсора, після АЦП перетворення зчитується по SPI інтерфейсу мікропроцесором PIC18F46K20, який за цим же інтерфейсом заносить його на зберігання у спеціалізовану мікросхему електропрограмованої пам'яті M25P64. Крім керування процесом вимірювання мікропроцесор також виконує функції опитування кнопки керування роботою пристрою (пуск сеансу Bluetooth зв'язку), керування роботою модуля Bluetooth, керування роботою модуля АЦП перетворення та керування подачею живлення лише на той тензоміст, за допомогою якого у даний момент виконується вимірювання.

З метою мінімізації похибок вимірювання, зумовлених нестабільністю напруги живлення пристрою і реалізації його автономного режиму роботи, живлення пристрою реалізовано від блоку нікель-метал-гідридних акумуляторів. Для подовження режиму роботи пристрою без перезарядження акумуляторів за допомогою вказаного мікропроцесора реалізований програмно режим "засинання" модулів пристрою вимірювання, які не задіяні у кожен визначений момент в процесі вимірювання чи передачі інформації.

Керування роботою пристрою та процесами вимірювання, накопичення та зчитування результатів вимірювання здійснюється дистанційно через Bluetooth інтерфейс між персональним комп'ютером та пристроєм вимірювання. Для цього застосовується спеціально розроблене програмне забезпечення. Синхронізація процесів вимірювання здійснюється за допомогою лічильника реального часу. Результати вимірювання пристрою, отримані через Bluetooth



Рисунок 2 – Дослідно-вимірвальний комплекс для експериментального визначення характеристик напружено-деформованого стану в зоні основного металу і кільцевих зварних з'єднань труб МТ



Рисунок 3 – Комплектуючі апаратури для проведення вимірювань

інтерфейс, програмно зберігаються у вигляді текстового файлу з двадцятьма стовпцями значень напруги (по кожному вимірвальному каналу) та відповідними значеннями моментів часу вимірювання.

Пристрій апробовано на скомплектованому на базі кафедри зварювання «Львівської по-

літехніки» в міжгалузевій науково-дослідній лабораторії діагностики напруженого стану експериментальному устаткуванні, яке дає можливість в лабораторних умовах якісно моделювати напружений стан (НС) у зоні зварних багат шарових з'єднань трубопроводів (рис. 2–4) [1–4].



Рисунок 4 – Насосна станція дослідницького стенду

Таблиця 1 – Геометричні характеристики і марки сталі котушок

№ котушки	Зовнішній діаметр, мм	Довжина котушки, мм	Товщина стінки, мм	Форма	Марка сталі
1	1020	250	22	на півсферичне днище	09Г2С
2	1020	450	14	циліндрична котушка	17Г1СУ
3	1020	800	10	циліндрична котушка	13Г1С
4	1020	450	10	циліндрична котушка	17Г1С
5	1020	400	10	циліндрична котушка	17Г1С
6	1020	400	9,5	циліндрична котушка	13Г1СУ
7	1020	850	14	циліндрична котушка	17Г1С
8	1020	250	22	на півсферичне днище	09Г2С

Таблиця 2 – Основні механічні характеристики матеріалу циліндричних котушок

№ котушки	Марка сталі	Границя міцності σ_B , МПа	Границя плинності σ_T , МПа	Відносне видовження ϵ , %	Ударна в'язкість основного металу КСВ, Дж/см ²
1; 8	09Г2С	510	355	22	29,4 (-70°C)
2; 6	17Г1СУ	520	370	21,0	40 (-40°C)
3	13Г1С	605	420	16,0	39 (-40°C)
4; 5	17Г1С	560	390	25,0	24,8 (-40°C)
7	13Г1СУ	584	434	37,0	14,0 (-60°C)

Стенди виготовлені у вигляді горизонтальних резервуарів (рис. 2–4) із обичайок труб із зовнішнім діаметром 1020 мм, зварених між собою багатшаровими кільцевими швами і приварених на торцях на півсферичних днищах. Геометричні розміри котушок наведені в табл.1, а основні механічні характеристики їх матеріалів згідно сертифікатів – в таблиці 2. Режими зварювання неповоротних стиків ко-

тушок резервуара вимірювальних стендів вказані в таблиці 3. Перевірка якості зварних з'єднань проводилась фізичними методами контролю за допомогою рентгеноскопії і ультразвукової дефектоскопії.

Резервуари дослідних стендів заповнено водою і за допомогою насосної станції (рис. 4) в ньому створюється внутрішній тиск заданого рівня. Надлишковий тиск створювали за до-

Таблиця 3 – Режими зварювання під час виконання неповоротних стиків котушок резервуара вимірювального стенду

Проходи зварного шва	Зварювальний струм Изв, А	Напруга на дузі Ud, В	Діаметр електроду Del, мм	Марка електроду УОНИ-13/55
Перший прохід (кореневий шов)	100	22	3	
Другий прохід (заповнюючий шов)	150	20	4	
Третій прохід (облицювальний шов)	150	20	4	

помогою об'ємного насосного агрегату МП-150. Тиск у резервуарі контролювали зразковим манометром МО з класом точності 0,4 (рис. 2). Зменшення тиску в резервуарі досягається за допомогою зворотного переливання води у накопичувальний бачок (рис. 4). Насосна станція дає змогу створювати внутрішній тиск у резервуарі до 15 МПа. При виготовленні резервуара використовували труби тривалого терміну експлуатації з різних марок поширених трубних сталей.

Основні механічні характеристики згідно сертифікатів на виготовлення труб наведені в таблиці 2.

Комплект устаткування для визначення напружено-деформованого стану в металі дослідних резервуарів з використанням тензометрів зображено на рис. 2 і 3. Вимірювальний тракт складається з тензодавачів, комутуючих колодок, екранованих з'єднувальних кабелів, спроектованої та виготовленої двадцятканальної тензостанції з блоком живлення та ноутбука з відповідним програмним забезпеченням.

Умови експлуатації апаратури і тензодавачів: температура навколишнього повітря - від -10°C до $+40^{\circ}\text{C}$; відносна вологість повітря - від 30% до 80%. Для компенсації температурних змін встановлено компенсаційний тензодавач (рис. 3).

Напружений стан дослідного резервуару за допомогою тензорезисторів визначали у такій послідовності: 1) вибір типу тензорезисторів і перевірка його працездатності, 2) розмітка місця наклеювання та підготовка поверхні (очищення і знежирення), 3) наклеювання тензодавачів з використанням клею БФ-2 чи "Ціакрин" та перевірка якості приклеювання, 4) захист тензорезисторів від потрапляння вологи і тарування вимірювального тракту. Використовували фольгові тензорезистори типу 2ПКБ-20 з базами від 10 до 40 мм, виготовлені згідно з ТУЗ.06 України 7710-0001-93 із такими технічними параметрами: номінальний електричний опір $R_d = 200 \text{ Ом}$; середнє значення чутливості $k = 2,14$; середнє квадратичне відхилення чутливості $S_n = 0,003$; середнє значення часової повзучості при нормальних умовах роботи $\Pi = 0,09 \%$; робочий струм I не більше 30 мА. Перед початком кожної серії вимірювань проводили балансування резисторів за допомогою грубого та тонкого регулювання мостів тензостанції.

На різних відстанях більших 300 мм від зварних швів резервуара, а також на найбільш напружених його ділянках наклеювались тензорезистори. Відтак за допомогою насосної станції (рис. 4) в резервуарах створювався внутрішній тиск різного рівня. Для кожного з цих рівнів за допомогою тензорезисторів вимірювались колові та осьові напруження в резервуарах.

Експериментальне визначення напружень проводилося за внутрішнього тиску у резервуарі дослідної установки $p = 5 \text{ МПа}$ і $5,5 \text{ МПа}$. В усіх дослідженнях кількість повторних вимірювань складала 8. Результати експериментальних вимірювань напружень подано на рисунку 5.

За отриманими значеннями напружень можна визначити характеристики напружено-деформованого стану в зоні основного металу і кільцевих зварних з'єднань труб магістральних газопроводів. [5].

Висновки

Розроблені пристрої пройшли апробацію в лабораторних умовах. Аналіз результатів експериментальних досліджень засвідчив хорошу працездатність удосконалених засобів тензометрування та можливість їх використання для оцінки НДС відповідального великогабаритного обладнання.

Таким чином, було спроектовано, виготовлено та проведено апробацію нового двадцятканального пристрою АЦП для визначення напружено-деформованого стану великогабаритного обладнання, насамперед, трубопроводів великих діаметрів.

Література

- 1 Мандрик О.М. Розвиток наукових основ підвищення рівня екологічної безпеки при транспортуванні природного газу: дис. на здоб. ступеня доктора наук. – Івано-Франківськ, 2013. – 250 с.
- 2 Аналіз і оцінювання працездатності та тріщиностійкості зварних трубопроводів / В.Д. Макаренко, В.Ю. Чернов, С.І. Крижанівський, М.М. Прохоров // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 4. – С. 47 – 50.
- 3 Банахевич Ю.В. Визначення напружено-деформованого стану зварних з'єднань труб методом спекл-інтерферометрії / Ю.В. Банахевич // Методи та прилади контролю якості. – 2009 – № 23. – С. 29-34.

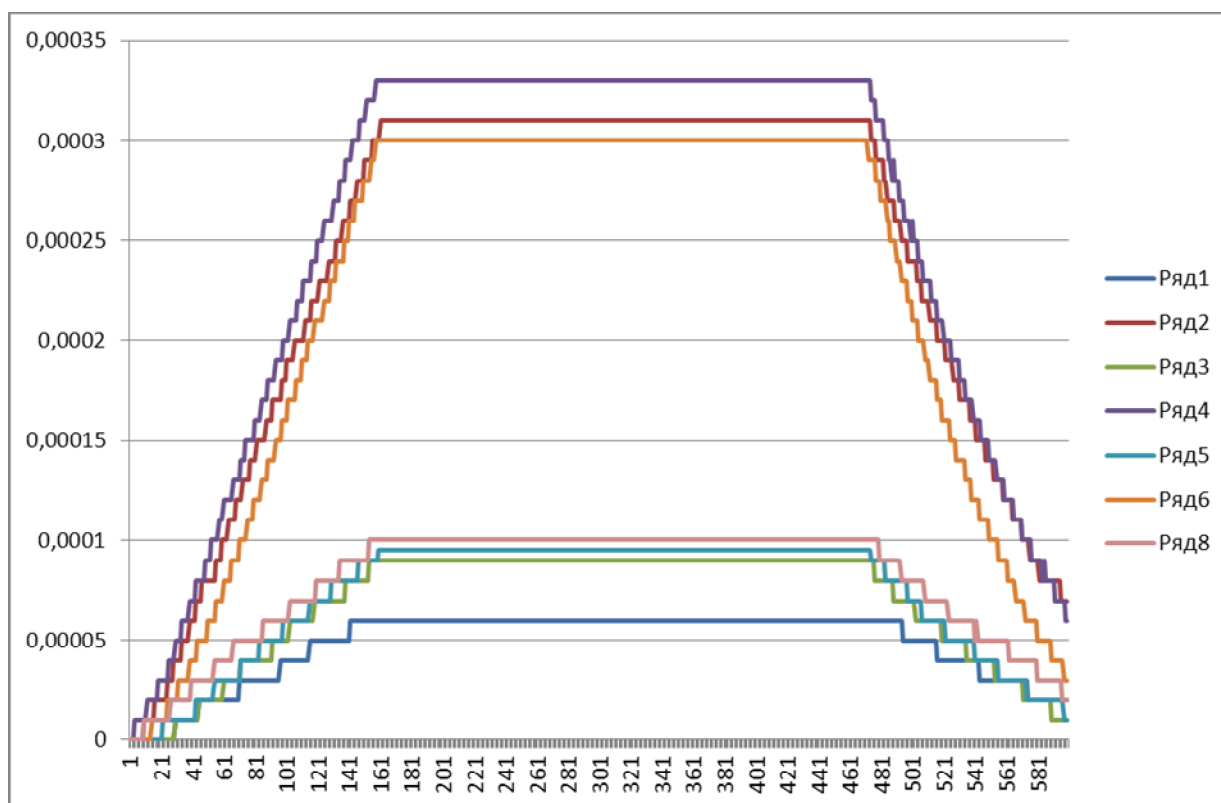


Рисунок 5 – Результати експериментальних вимірювань напружень

4 Діагностування напруженого стану магістральних газопроводів в околі стикових зварних з'єднань розрахунково-експериментальним методом / В.А. Осадчук, А.В. Драгілев, Ю.В. Банахевич, В. Пороховський // Матеріали 3-ої міжнародної конференції «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій» (м. Львів, 2004). –Львів, 2004. – С. 439–444.

5 Мазур И.И. Безопасность трубопроводных систем / И.И. Мазур, О.М. Иванцов. – М.: Издательство Центр «ЕЛИМА», 2004. – 1096 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
18.11.14
Рекомендована до друку
професором Івасівим В.М.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром техн. наук Яковлевим Є.О.
(Інститут телекомунікацій і глобального
інформаційного простору НАН України,
м. Київ)*