

681.518

Н44

**ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ**

IB

Незамай Борис Сергійович

УДК 681.518.3:622.691.4 – 192
+ (043)
Н44

**МЕТОД ТА ПРИСТРІЙ КОНТРОЛЮ
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МАГІСТРАЛЬНИХ
ТРУБОПРОВІДІВ ЗА ЇХ ФОРМОЮ ПЕРЕРІЗІВ**

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення
складу речовин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

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, завідувач кафедри комп'ютерних технологій в системах управління та автоматики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Тимків Дмитро Федорович, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри інформатики.

кандидат технічних наук, доцент
Горошко Андрій Володимирович, Хмельницький національний університет, доцент кафедри прикладної механіки



За
спеціал
націона
Франкі

З
націона
Франкі

А

В

вченої ради

на засіданні
Івано-Франківському
19, м.Івано-

Івано-Франківського
9, м.Івано-

Дранчук м.М.

№ 1344 - 011 1343
0 1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Україні належить одна з найбільших у Європі нафто- і газотранспортних систем, по яких сьогодні транспортується нафта і газ споживачам України та 15 країнам Центральної та Західної Європи. Українські магістральні газопроводи з'єднані з 13 підземними сховищами газу і складають газотранспортну систему загальною протяжністю близько 37 тис. км. Разом з тим, близько 45% трубопроводів знаходяться в експлуатації понад 30 років. Експлуатація лінійної частини магістральних трубопроводів впродовж такого значного проміжку часу, особливо в умовах Українських Карпат, внаслідок впливу зсувів, гідрогеологічних факторів призводить до виникнення просторових відхилень трубопроводів від проектних положень. Особливо складна ситуація з відкритими ділянками внаслідок впливу додаткових факторів – просадками опор, вітрових навантажень, нерівномірної освітленості.

Сучасні методи дефектоскопії зорієнтовані, в основному, на пошук дефектів, а не на контроль напружено-деформованого стану (НДС) конструкції. Відомі розрахункові методи контролю НДС базуються на спрощених моделях тіла трубопроводу (балка, оболонка) і не враховують реальної конфігурації форми перерізу трубопроводу. При цьому за вихідні дані при розрахунках використовують інформацію про зовнішні впливи на трубопровід, в той час як в практичних випадках дати кількісну оцінку цих впливів є проблемною задачею.

Таким чином, створення розрахункових методів контролю НДС відкритих ділянок лінійної частини магістральних трубопроводів (ЛЧМТ) з врахуванням реального просторового положення останніх на основі інформації про переміщення обмеженої кількості точок їх перерізів є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тематика роботи є частиною планових науково-дослідних програм по розвитку нафтопромислового комплексу України і базується на результатах держбюджетних науково-дослідних робіт “Розробка теоретичних та методологічних принципів діагностики обладнання нафтового комплексу України”, частина науково-дослідної теми 45/1, номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ №01980005799, “Діагностування стану технічних об'єктів на основі обмеженої інформації про переміщення точок їх поверхні”, частина наукової теми Дб-ф номер державної реєстрації у УкрНДІНТІ №01980005799.

Мета досліджень: підвищення надійності і ефективності експлуатації відкритих участків ЛЧМТ шляхом контролю їх НДС з використанням розроблених методів.



Задачі досліджень:

- проаналізувати стан проблеми контролю НДС відкритих ділянок ЛЧМТ;
- розробити теоретичні засади методу контролю НДС відкритих ділянок ЛЧМТ;
- розробити метод контролю форми перерізу трубопроводу;
- розробити метод контролю НДС трубопроводу за переміщеннями точок верхньої твірної труби з урахуванням зміни конфігурації форми перерізів трубопроводу;
- розробити апаратні та програмні засоби для реалізації методу контролю НДС відкритих ділянок ЛЧМТ.

Об'єкт досліджень – відкриті частки лінійної частини магістральних газопроводів.

Предмет досліджень – методи контролю напружено-деформованого стану відкритих часток лінійної частини магістральних газопроводів з урахуванням реальної форми їх перерізів.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач використовувались методи теоретичної механіки, чисельні методи математичного аналізу, основні положення технічної діагностики, теорії планування експериментів, методи математичної статистики. При розробці технічного забезпечення використовувались методи системо- та схемотехніки.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Розроблено математичну модель деформування трубопроводу, яка, на відміну від існуючих, враховує можливі деформації його перерізів, і дозволяє більш точно описати явища, що відбуваються з ЛЧМТ в процесі тривалої експлуатації.
2. Вперше розроблено розрахунковий метод контролю НДС ЛЧМТ, який, в порівнянні з існуючими, враховує конфігурацію форми перерізу труби МТ, що дозволяє підвищити вірогідність контролю НДС.
3. Вперше створено метод відтворення просторової конфігурації відкритих ділянок трубопроводу на основі даних про форму його перерізів з використанням методу локальних варіацій, який враховує методичну і систематичну похибки натурних вимірювань, та дозволяє підвищити точність контролю НДС.
4. Синтезовано структуру мікропроцесорного пристрою для контролю конфігурації форми перерізу труби, використання якого дозволяє автоматизувати процес контролю ЛЧМТ розробленим методом.

Практичне значення отриманих результатів :

- розроблено алгоритмічне забезпечення математичної моделі деформування трубопроводу, що дозволяє моделювати НДС конкретних відкритих ділянок ЛЧМТ;
- розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення методу контролю НДС конструкції трубопроводів на основі даних про координати обмеженої кількості точок їх поверхні, використання якого дозволяє підвищити оперативність методу контролю НДС;
- створено пристрій контролю конфігурації форми перерізу відкритих ділянок ЛЧМТ, який в комплексі з розробленим алгоритмічним та програмним забезпеченням дозволяє автоматизувати процес контролю НДС та знизити його трудоемкість.

Розроблені методи та системи пройшли апробацію на ділянках трубопроводу ДУГ-II, розміщених в Івано-Франківській та Закарпатській областях і прийняті для подальшого впровадження в Долинському лінійному управлінні магістральних газопроводів.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень використовуються у навчальному процесі – в робочих програмах дисциплін “Основи теорії надійності і технічної діагностики систем”, “Методи і засоби діагностування об’єктів нафтогазового комплексу”, “Проектування систем діагностування”, які читаються для студентів спеціальності 7.091401 – “Системи управління і автоматики”

Особистий внесок здобувача

Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Здійснено моделювання процесу деформування перерізів магістральних трубопроводів з дефектами форми під дією робочого тиску [7], проаналізовано можливості застосування механізму інтерполяції за допомогою многочленів Ерміта в задачах відтворення форми деформованого трубопроводу [5], запропоновано методику визначення НДС магістральних трубопроводів з урахуванням можливого відхилення форми труби від нормативного [4], здійснено імітаційне моделювання процесу контролю форми перерізу трубопроводу [9]. У роботах, опублікованих у співавторстві: здійснено аналіз зовнішніх впливів, що діють на відкриті ділянки ЛЧМТ [3], запропоновано модель деформування трубопроводу з урахуванням апаратних досліджень його поверхні [6], одержано многочлени Ерміта, які можна застосовувати для моделювання поверхні трубопроводів в задачах контролю НДС ЛЧМТ [1], встановлено вимоги до системи контролю конфігурації форми перерізу відкритих ділянок ЛЧМТ [2], здійснено розробку програмного забезпечення системи визначення відхилення від округлості [8].

Апробація результатів досліджень

Результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на XIX, XX, XXI, XXII Міжнародних міжвузівських школах-семінарах “Методи і засоби технічної діагностики” (Івано-Франківськ, 2003, 2005 р.р. – Україна і Йошкар-Ола 2004, 2006 р.р. – Республіка Марій-Ел – Росія); IV-ій науково-технічній виставці “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання” (м. Івано-Франківськ, 2005); наукових семінарах кафедри комп’ютерних технологій в системах управління і автоматики (2002 – 2007р.р.).

Публікації За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 9 робіт, з яких 5 у виданнях, включених до фахових видань ВАК України, а 4 статті одноосібних.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, викладених на 136 сторінках тексту, 42 рисунків, 7 таблиць, списку використаних джерел, що містить 107 найменувань, та 3 додатків на 28 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульована мета та задачі дослідження, описана структура роботи. Приведено характеристику наукової новизни та практичного значення одержаних результатів, описано їх апробацію, публікації та впровадження.

У *першому розділі* здійснено аналіз типових дефектів форми перерізу трубопроводів, проаналізовано впливи, які можуть спричинити їх виникнення.

Проведено аналіз сучасного стану діагностування ЛЧМГ, який показав, що існуючі системи для контролю НДС трубопроводу володіють рядом недоліків, основними з яких є: обмежена роздільна здатність, чутливість до різкої зміни швидкості руху дефектоскопів та до порушень у геометрії газопроводів. Однак обмежені функціональні можливості розглянутих технічних засобів не дозволяють одержати всю необхідну інформацію про параметри стану трубопроводу, що впливає на результат контролю його НДС. Для одержання більшого об’єму діагностичних даних вимагається використання кількох приладів різного призначення.

Стосовно існуючих розрахункових методів визначення НДС ЛЧМГ, то вони дозволяють одержувати адекватну картину стану трубопроводу лише в обмеженій кількості випадків – коли вдається точно оцінити всі впливи, що діють на трубопровід.

Найбільш перспективним є метод контролю НДС ЛЧМТ, який базується на визначенні параметрів зміни просторового положення трубопроводу від проектного, теоретичні основи якого закладені в роботах Заміховського Л.М., Олійника А.П.. При цьому розроблено математичну модель деформування ділянки трубопроводу, встановлено умови, які накладаються на їх геометрію та деформації. Показано, що задача визначення НДС ділянок трубопроводу за відомими переміщеннями певної множини точок є некоректно поставленою, розроблено методи її регуляризації. При цьому задача була розв'язана з урахуванням гіпотези плоских перерізів і гіпотези про незмінність форми перерізу труби.

Одним із найпоширеніших способів вимірювання переміщень, який при відносній простоті реалізації забезпечує достатню точність проведених вимірювань, є метод геодезичних досліджень. Існують також методи і засоби технічної діагностики, які дозволяють одержати інформацію про переміщення певної множини точок по перерізах трубопроводу, в тому числі і на підземних ділянках – так-звані внутрішньотрубні профіліметри. Проте їх використання для ділянок, які можуть опинитись під дією несприятливих факторів (100м – 1км) неможливе через відсутність приймально-пускового устаткування, а на великих ділянках (між газоперекачуючими станціями), в складі яких з'явилися потенційно небезпечні ділянки, їх використання може виявитись економічно необґрунтованим.

На підставі проведеного аналізу сформульовано мету і задачі дисертаційної роботи. Основну увагу сконцентровано на питанні встановлення форми перерізу та визначення впливу реальної форми перерізу на НДС ЛЧМГ.

Другий розділ присвячено розробці теоретичних основ методу контролю НДС відкритих ділянок ЛЧМТ.

Для моделювання просторового положення тіла труби вибрана система координат в якій вісь x співпадає з віссю труби, яка розглядається (рис.1). Як функції, що характеризують геометрію системи вибрано $\rho(s, \varphi, r)$ і $\omega(s)$, що пов'язані з радіус-вектором точки труби наступним співвідношенням:

$$\vec{r} = \vec{r}_i - \frac{d}{2} \cdot \vec{n}_i + (\vec{n}_i \cdot \sin \omega(s) + \vec{b}_i \cdot \cos \omega(s)) \cdot \rho(s, \varphi, r), \quad (1)$$

тут \vec{r}_i – радіус-вектор верхньої твірної труби, зафіксованої у нульовий момент часу;

\vec{n}_i і \vec{b}_i – нормаль і бінормаль для відповідної твірної труби;

$\rho(s, \varphi, r)$ – функція, що характеризує зміщення точки труби в радіальному напрямку;

$\omega(s)$ – функція, яка передбачає можливість кручення труби як одного цілого в межах кожного довільного перерізу труби.

В контрольний момент часу тіло труби, згідно (1) подається у наступному вигляді:

$$\vec{r} = \begin{cases} x = s - \frac{d}{2} \cdot n_x(s) + \rho \cdot (n_x(s) \cdot \sin \varphi + b_x(s) \cdot \cos \varphi), \\ y = y_1(s) - \frac{d}{2} \cdot n_y(s) + \rho \cdot (n_y(s) \cdot \sin \varphi + b_y(s) \cdot \cos \varphi), \\ z = z_1(s) - \frac{d}{2} \cdot n_z(s) + \rho \cdot (n_z(s) \cdot \sin \varphi + b_z(s) \cdot \cos \varphi) \end{cases} \quad (2)$$

де $y_1(s), z_1(s)$ – координати верхньої твірної труби у системі координат, яка розглядається;

$$\rho = \rho(s, \varphi, r);$$

$$\varphi = \omega(s);$$

$n_x(s), n_y(s), n_z(s)$ та $b_x(s), b_y(s), b_z(s)$ – координати нормалі і бінормалі для верхньої твірної труби у визначений момент часу.

Для квазіпрямолінійної ділянки у прийнятій системі координат початковим буде подання труби у вигляді циліндра з заданою довжиною та товщиною стінки :

$$\vec{r}_0 = \begin{cases} x = s, & 0 \leq s \leq L, \\ y = r \cos \varphi, & 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \\ z = r \sin \varphi; & R_{\text{вн}} \leq r \leq R, \end{cases} \quad (3)$$

де s, r, φ – циліндричні координати;

L – довжина вибраної ділянки трубопроводу;

$R_{\text{вн}}, R$ – внутрішній та зовнішній радіуси трубопроводу.

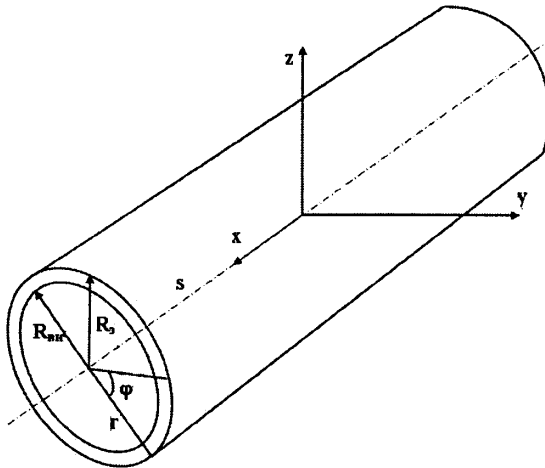


Рис. 1 – Система координат і подання труби в початковий момент часу.

Враховуючи, що в процесі деформування ділянки труби ЛЧМТ конфігурація її перерізів може набути довільної форми, в рамках прийнятої моделі критерієм фактичної форми є той факт, що в пружній системі з усіх можливих переміщень тіла, переміщення, що задовільнятимуть умови стійкої рівноваги, нададуть потенційній енергії системи найменшого значення:

$$C = U - A = \min \quad (4)$$

Маючи представлення координат r_0 і r (2) і (3), знаходяться компоненти векторів локального базису (s, φ, r) :

$$\bar{\mathfrak{z}}_i^0 = \frac{\partial r_0}{\partial x_i}; \quad \bar{\mathfrak{z}}_i = \frac{\partial r}{\partial x_i}; \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

де $x_1 = s$, $x_2 = \varphi$, $x_3 = r$.

За (5) знаходяться компоненти метричних тензорів:

$$g_{ij}^0 = \bar{\mathfrak{z}}_i^0 \cdot \bar{\mathfrak{z}}_j^0, \quad g_{ij} = \bar{\mathfrak{z}}_i \cdot \bar{\mathfrak{z}}_j, \quad (6)$$

тут і далі $i, j = 1, 2, 3$.

За відомими компонентами метричних тензорів (6) знаходяться компоненти тензорів деформацій:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(g_{ij} - g_{ij}^0) \quad (7)$$

На основі (6) і (7) знаходяться коваріантні та контраваріантні компоненти тензора напружень з використанням закону Гука для пружньодеформованого тіла, який для ізотропного тіла записується у формі:

– для коваріантних компонент:

$$\sigma_{ij} = \lambda I_1(\varepsilon) g_{ij}^0 + 2\mu \varepsilon_{ij}; \quad (8)$$

– для контраваріантних компонент:

$$\sigma^{ij} = \lambda I_1(\varepsilon) g^{ij} + 2\mu \sum_{s=1}^3 \sum_{k=1}^3 g^{is} g^{jk} \varepsilon_{sk}. \quad (9)$$

В формулах (8), (9) використовується величина першого інваріанта тензора деформацій, яка визначається за формулою:

$$I_1(\varepsilon) = \sum_{i,j=1}^3 \varepsilon_{ij} g_{ij}^0, \quad (10)$$

λ та μ – параметри Ламе, які обчислюються за формулами:

$$\mu = \frac{E}{2(\sigma + 1)}, \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{E\sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}, \quad (12)$$

де E – модуль Юнга;

σ – коефіцієнт Пуассона для трубопровідної сталі.

Після обчислення компонент тензора напружень з урахуванням квазістаціонарності процесу деформування перевіряється виконання умов рівноваги (4), які без урахування масових сил записуються у вигляді:

$$\sum_{j=1}^3 \nabla_j \sigma^{ij} = 0, \quad i = 1, 2, 3 \quad (13)$$

де ∇_j – оператор коваріантного диференціювання тензора σ^{ij} :

$$\nabla_j \sigma^{jk} = \frac{\partial \sigma^{jk}}{\partial x_j} + \sum_{s=1}^3 \sigma^{sk} \Gamma_{sj}^j + \sum_{s=1}^3 \sigma^{js} \Gamma_{sj}^k, \quad (14)$$

де Γ_{si}^k – символи Кристофеля II роду, які при розв'язанні даної задачі розраховуються для циліндричної системи координат:

$$\Gamma_{22}^3 = -r; \quad \Gamma_{32}^2 = \Gamma_{23}^2 = \frac{1}{r}. \quad (15)$$

Для рівнянь (13) шляхом підстановки співвідношень (9) одержуються функції $F_i(s, \varphi, r)$ $i = 1, 2, 3$, які є нев'язками відповідних рівнянь.

Знаходяться величини:

$$\Delta_i = \int_V F_i(s, \varphi, r) dV \approx \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L F_i(s_k, \varphi_n, r_l) \Delta V_i \quad (16)$$

де $i = 1, 2, 3$;

V – об'єм досліджуваного тіла;

ΔV_i – об'єм одиниці розбиття;

K, N, L – кількість точок розбиття ділянки трубопроводу відповідно по повздожній, полярній координаті та по товщині стінки труби.

Мінімізуючи нев'язку (16) на основі введених параметрів можна здійснювати обробку експериментальних даних про переміщення і деформації, що дозволяє компенсувати можливі похибки вимірювань.

Встановлено граничні умови для функцій, що описують форму поверхні трубопроводу на основі вимірних дискретних даних та здійснено аналіз інтерполяційних алгоритмів стосовно можливості їх застосування для вирішення поставленої задачі.

Як функції опису просторової конфігурації форми перерізу трубопроводу обрано інтерполяцію із згладжуванням з періодичними граничними умовами. Для контролю перерізу ділянки трубопроводу з дефектами типу “вм'ятина” запропоновано використовувати многочлен Ерміта 5-го порядку наступного вигляду:

$$\begin{aligned}
 H_4(x) = & \frac{(x-x_1)^2(x-x_2)^2}{(x_0-x_1)^2(x_0-x_2)^2} K + \\
 & + \frac{(x-x_0)(x-x_2)^2}{(x_1-x_0)^2(x_1-x_2)^3} \cdot ((2x_0+x_2-3x_1)(x-x_1) + (x_1-x_0)(x_1-x_2)) f_1 + \\
 & + \frac{(x-x_0)(x-x_1)^2}{(x_2-x_0)^2(x_2-x_1)^3} \cdot ((2x_0+x_1-3x_2)(x-x_2) + (x_2-x_0)(x_2-x_1)) f_2 + \\
 & + \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)^2}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)^2} f_1' + \frac{(x-x_0)(x-x_2)(x-x_1)^2}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)^2} f_2'
 \end{aligned} \tag{17}$$

де x_i , f_i , K описують геометрію дефекту (рис.2).

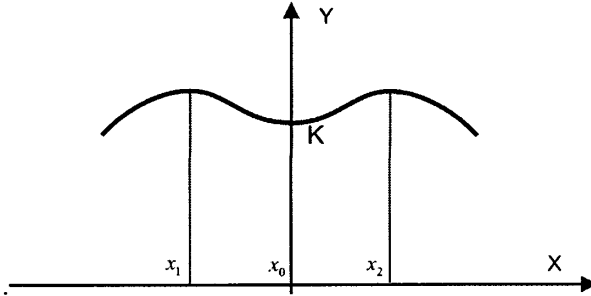


Рис. 2 – Схема перерізу трубопроводу з дефектом типу
вм'ятина

У *третьому розділі* здійснено розробку методу контролю НДС відкритих ділянок ЛЧМТ, апаратного та алгоритмічного забезпечення методу.

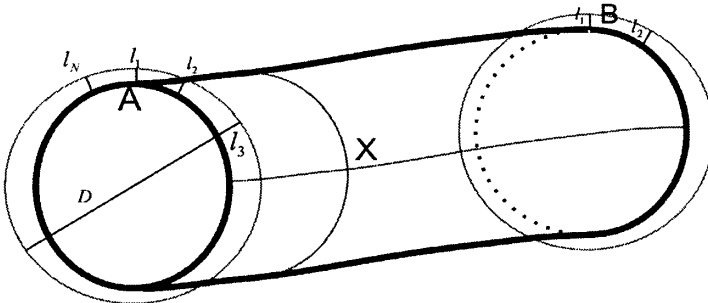


Рис.3 – Схема вимірювань ділянки трубопроводу

Сформульовано основні положення методу контролю НДС, який полягає в наступному:

1. Геодезичними методами здійснюється вимірювання координат точок А та В, що належать верхній твірній тіла трубопроводу та одночасно належать перерізам А та В (рис.3);

2. Здійснюється вимірювання відстані від первинного перетворювача системи (див. наступний розділ), форма якого наперед відома (коло з діаметром D), закріпленої на трубопроводі, з певним кроком φ по периметру перерізу до несучої стінки трубопроводу (а не до ізоляційного покриття). Відстані вимірюються в кожному контролюємому перерізі. Так, для перерізів А та В це, відповідно, $(l_1^A, l_2^A, \dots, l_N^A)$ і $(l_1^B, l_2^B, \dots, l_N^B)$;

3. За наявними відстаннями знаходиться представлення форми перерізу трубопроводу у вигляді

$$\left((r - l_1^A), (r - l_2^A), \dots, (r - l_N^A) \right) \\ \left((r - l_1^B), (r - l_2^B), \dots, (r - l_N^B) \right)$$

де $r = \frac{D}{2}$ – радіус первинного перетворювача.

4. За допомогою інтерполяційної процедури – згладжуючого сплайну з циклічними граничними умовами – на основі отриманих по п.3 даних отримують представлення форми перерізів А та В: $\rho^A(\varphi)$ та $\rho^B(\varphi)$.

5. За координатами точок А(x, y, z) і В(x, y, z) та координат відповідних перерізів $\rho^A(\varphi)$, $\rho^B(\varphi)$ шляхом інтерполяційних процедур в напрямку паралельному осі трубопроводу знаходяться координати довільної точки трубопроводу в циліндричній системі координат $\rho(\varphi, s)$.

6. На основі одержаного представлення $\rho(\varphi, s)$ знаходиться координати довільної точки труби Х(x, y, z).

7. На основі одержаного просторового представлення здійснюється розрахунок НДС згідно формул (5–16).

Джерелами виникнення похибки розглянутого методу є:

- похибка вимірювань відстаней розробленими засобами та координат геодезичними методами. Дані похибки компенсуються шляхом використання механізму згладжуючих сплайнів;

- запропонований метод вимірювань не фіксує можливих зміщень перерізів трубопроводу відносно моменту часу, прийнятого за нульовий, в напрямку, паралельному осі трубопроводу – виникає систематична похибка методу;

- методична похибка можливого неточного встановлення вимірювального приладу у площину, перпендикулярну осі трубопроводу.

Для визначення реальної конфігурації форми перерізу здійснюється пошук мінімуму для виразу $F = \sum F_i$, тут

$$F_i = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \nabla_j \sigma^{ij} . \quad (18)$$

Мінімізація (18) реалізується методом локальних варіацій, причому варіація вводитьсья відносно кута Ψ (у напрямку, паралельному осі трубопроводу):

$$\begin{cases} x'_n = x' + y' \cos(90^\circ \pm \psi) \\ y'_n = y' \sin(90^\circ \pm \psi) \\ z'_n = z' \end{cases} , \quad (19)$$

де $\psi = 1^\circ - 2^\circ$ (параметр методу локальних варіацій). Мінімуму величини F відповідає реальна конфігурація трубопроводу. Таким чином, шляхом використання методу локальних варіацій компенсується методична та систематична похибки вимірювань.

З метою встановлення вимог до засобів контролю форми перерізів проведено дослідження за методами імітаційного моделювання. Моделювалась похибка контролю форми перерізу трубопроводу.

З метою моделювання похибки експериментальних вимірювань реалізовано наступний алгоритм: за формулою (20) визначаються значення функції y_i на деякій розрахунковій сітці на відрізьку $x_i \in [a, b]$, що має n контрольних точок ($i = 1 \dots n$):

$$y_i = \sqrt{R^2 - x_i^2}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (20)$$

Значення y_i , що входять в (20), збурюються за законом:

$$\tilde{y}_i = y_i + \varepsilon_y S_k, \quad (21)$$

де ε_y – точність вимірювання координати y_i ; S_k – випадкові числа, розподілені на відрізьку $[0;1]$, які і моделюють похибку вимірювання.

Для моделювання похибки вимірювання було вибрано нормальний закон розподілу, при цьому було встановлено, що результат моделювання є стійким по відношенню до послідовностей випадкових чисел, які використовуються в обчислювальній процедурі, а для відтворення форми трубопроводу достатньо проводити 32 вимірювання його периметру з точністю, яка не перевищує 20% максимально очікуваного відхилення від округлості, а саме 0,5мм.

При цьому аналітична форма перерізу трубопроводу, що отримана в результаті інтерполяції результатів їх вимірювання кубічним сплайном із згладженням може бути використана для контролю НДС трубопроводу.

Розроблено мікропроцесорний пристрій контролю НДС трубопроводу (рис.4), який складається із наступних функціонально завершених блоків: первинного перетворювача форми перерізу (арки кругломіра), мікропроцесорного вимірювального модуля та ПЕОМ.

Оснoву первинного перетворювача пристрою становить несуча конструкція, що встановлюється на трубопроводі і має напрямні, по яких рухається вимірювальний модуль.

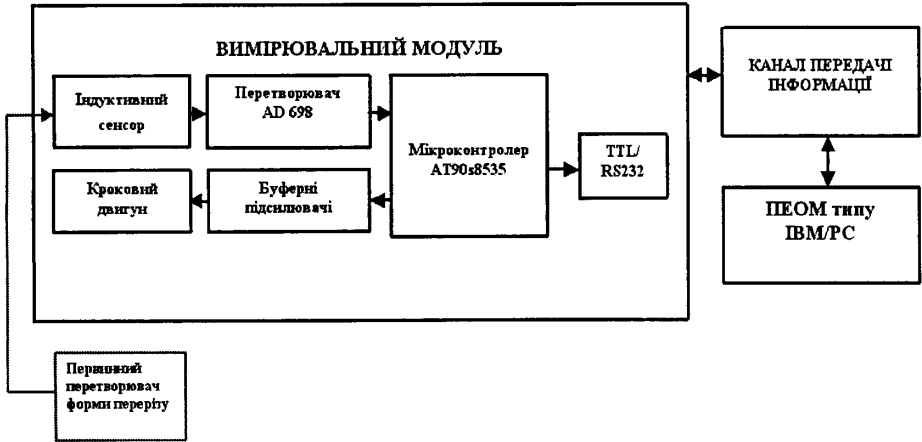


Рис.4 – Структурна схема мікропроцесорного пристрою контролю НДС.

Проведено розробку алгоритмічного забезпечення методу контролю НДС ЛЧМТ та описано підходи до програмної реалізації вказаних алгоритмів.

Здійснено тестування одержаного програмного забезпечення з використанням експериментальних даних, отриманих при розв'язку прямих задач методом кінцевих елементів у середовищі SolidWorks/COSMOSWorks (рис.5). Результати моделювання наведені у таблиці 1. Показані максимальні та середні значення напружень, одержаних при моделюванні провисання ділянок трубопроводу різної довжини методом кінцевих елементів і значення напружень отриманих за розробленою методикою. Наведено також оцінки для порівняння цих даних у вигляді відношень $\left| \frac{\sigma_{сер} - \sigma_{сер}^P}{\sigma_{сер}} \right|$ та $\left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{max}^P}{\sigma_{max}} \right|$. Незначна розбіжність одержаних оцінок (до 17%) свідчить про адекватність запропонованої моделі експериментальним даним.

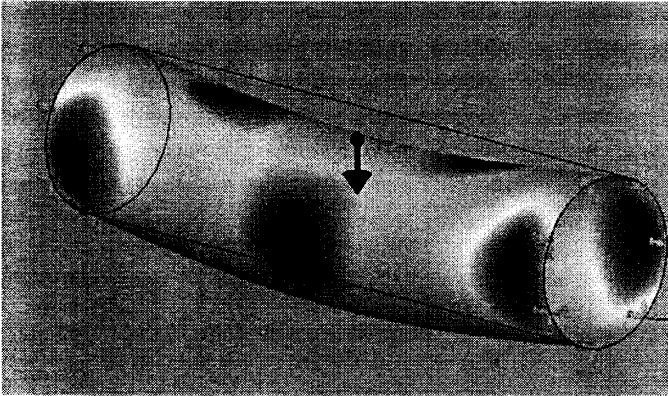


Рис.5 – Моделювання провисання трубопроводу

Таблиця 1 – Аналіз результатів розрахунків при моделюванні провисання повітряної ділянки під дією власної ваги.

Довжина ділянки, м	Результати в розробленому ПЗ		Результати прямої задачі (CosmosWorks)		$\left \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\max}^P}{\sigma_{\max}} \right $, %	$\left \frac{\sigma_{\text{сеп}} - \sigma_{\text{сеп}}^P}{\sigma_{\text{сеп}}} \right $, %
	σ_{\max}^P МПа	$\sigma_{\text{сеп}}^P$ МПа	σ_{\max} МПа	$\sigma_{\text{сеп}}$ МПа		
	10	40,8	8,7	37,8	9,1	7,9
15	45,6	13,4	41,9	14,2	8,8	5,6
20	75,1	28,5	64,0	30,0	17,0	5
25	88,2	41,2	79,5	44,5	8,7	7,4
30	110,4	56,1	95,7	54,1	14,9	3,5

У *четвертому розділі* наведено методику проведення досліджень розробленими засобами у промислових умовах, здійснено дослідження роботи розробленого мікропроцесорного пристрою контролю НДС трубопроводів та наведено результати проведених досліджень ділянок трубопроводів.

Для дослідження роботи створеного мікропроцесорного пристрою було розроблено стенд у вигляді комплексу апаратних та програмних засобів: безпосередньо калібрувального стенду та тестової програми, реалізованої на ПЕОМ, який дозволяє здійснювати всі необхідні контрольні операції.

Як показали дослідження, розроблений пристрій дозволяє здійснювати вимірювання відстані до металевої поверхні в діапазоні 0 ... 4,2 мм, що задовільняє поставленим вимогам. Температура навколишнього середовища впливає на зміну

характеристики пристрою, яка зміщується по осі ординат, це дозволяє враховувати температурну похибку шляхом встановлення значення сталої у виразі для градувальної характеристики як функції від температури, що відповідає фіксованому положенню пристрою.

На основі градувальної характеристики, з використанням програмного середовища Matlab здійснено підбір функції, закладених у програмне забезпечення системи (рис.6).

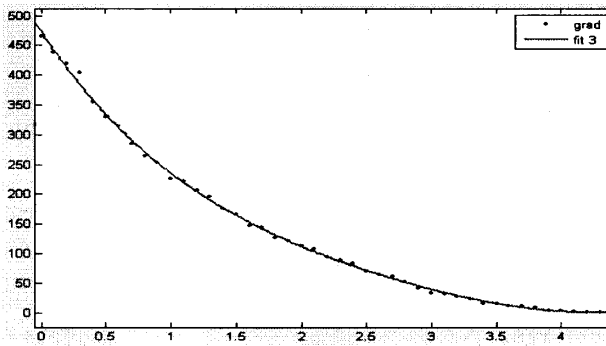


Рис.6 – Градувальна характеристика пристрою та її поліноміальна апроксимація

Отримана градувальна характеристика (рис.6) описується функцією:

$$f(x) = 1.995x^4 - 22.58x^3 + 111x^2 - 328.1x + 473.7,$$

яка використовується у відповідних підпрограмах при розрахунку НДС трубопроводу.

Здійснено натурні дослідження відкритих ділянок ЛЧМТ на трубопроводі ДУГ – II Івано-Франківської та Закарпатської областей. Зміщення ділянок трубопроводу з наявністю овальної форми його перерізу було зафіксовано на трубопроводі в районі села Лопушне Міжгірського району.

Конкретної причини встановленого явища виявити не вдалось, однак найбільш ймовірними причинами можуть бути зміна просторової орієнтації опор, які на вказаній ділянці знаходились у частково зруйнованому стані і ремонтні роботи по відновленню яких активно проводились службами Долинського ЛВУМГ, а також ймовірні порушення технології проведення вскриття трубопроводу через специфіку пролягання даної ділянки.

Довжина ділянки між опорами 120м (магістральний газопровід 1420мм товщина стінки труби 12мм). Контроль форми перерізу трубопроводу здійснювався біля опор (перерізи 1 та 9 – таблиця 2) та через 15 м (перерізи 2...8). Відстань по верхній твірній між вимірами 1-2 та 8-9 становить 14 м. В програму вводились координати верхньої твірної трубопроводу, одержані нівелюванням 2-го класу по кожному перерізу. Встановлено, що форма перерізу труби близька до овальної,

овалізація є максимальною в перерізах 4 і 5 і становить 1.6 та 1.7мм. Було відомо, що проектна форма даної ділянки – пряма.

Максимальні напруження в результаті розрахунку (табл. 2) були одержані в перерізах трубопроводу, що знаходяться між точками вимірювань 4 та 5.

Таблиця 2 – Максимальні значення напружень по перерізах

№ точки	Переміщення точки верхньої твірної в горизонтальному напрямі, мм	Найбільше одержане значення напруження в перерізі МПа	Найбільше одержане значення напруження в перерізі при допущенні про незмінність форми перерізів, МПа
1	0	11,8	12,6
2	2,5	39,36	44,9
3	3,2	47,19	61,2
4	3,9	95,2	102,3
5	5,2	109,0	112,0
6	4,6	52,6	61,2
7	3,1	40,1	45,3
8	2,0	11,2	12,4
9	0	10,8	11,8

Максимальне значення отриманих напружень становить 113,8 МПа. Графік повздовжніх напружень у відповідному перерізі, а також форму перерізу показано на рис. 7

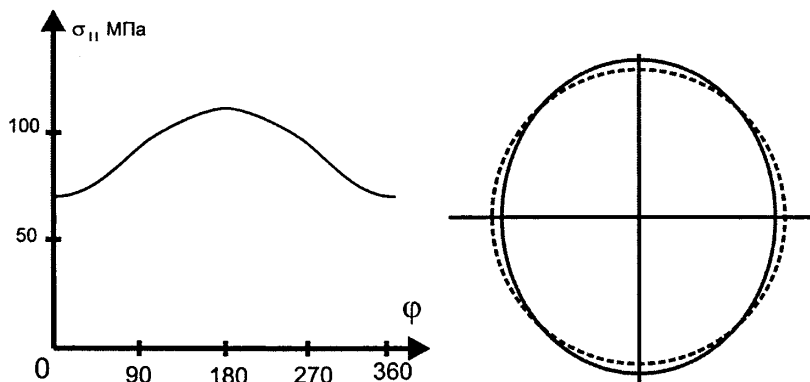


Рис. 7 – Графік осьових напружень у перерізі та форма перерізу трубопроводу у два моменти часу

Решта одержаних компонент тензора напружень на даній ділянці не перевищують 45 МПа. На основі проведених досліджень було зроблено висновок, що деформація даної ділянки трубопроводу не приведе до виникнення аварійної ситуації.

Одержані результати підтвердили ефективність розроблених методів контролю НДС та їх технічної реалізації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу розробки методу контролю НДС відкритих ділянок ЛЧМТ з урахуванням зміни форми їх перерізів. Вирішення цієї задачі має важливе господарське значення, оскільки дає можливість здійснювати контроль параметрів трубопровідних систем за фактичним станом їх конструкції.

1. На основі проведеного аналізу сучасного стану контролю НДС трубопроводів встановлено, що існуючі експериментальні не дають всієї необхідної інформації, а в багатьох випадках для контролю НДС коротких відкритих ділянок ЛЧМТ використання деяких з них є нерациональним. В розрахункових методах контролю НДС, які базуються на спрощених моделях тіла трубопроводу і не враховують реальної конфігурації форми перерізу трубопроводу, за вихідні дані для розрахунків використовується інформація про зовнішні впливи на трубопровід в той час, як в практичних випадках дати кількісну оцінку цих впливів є проблемною задачею.

2. Розроблено математичну модель деформування трубопроводу, яка враховує можливі деформації форми його перерізів в процесі тривалої експлуатації.

3. Розроблено розрахунковий метод контролю НДС відкритих ділянок ЛЧМТ, який, в порівнянні з існуючими, враховує конфігурацію форми труб МТ, що дозволяє підвищити вірогідність контролю НДС. Проведено тестування методу з використанням результатів рішення прямих задач, одержані результати свідчать про адекватність розробленого методу.

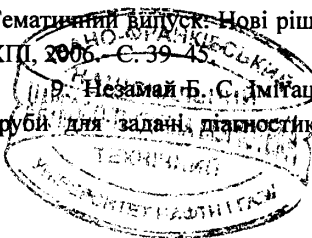
4. Створено метод відтворення просторової конфігурації відкритих ділянок трубопроводу на основі даних про форму його перерізів з використанням методу локальних варіацій, що враховує методичну та систематичну похибки натурних вимірювань

5. Створено мікропроцесорний пристрій контролю конфігурації форми перерізу відкритих ділянок ЛЧМТ, який, в комплексі з розробленим алгоритмічним та програмним забезпеченням дозволяє автоматизувати процес контролю НДС відкритих ділянок ЛЧМТ.

6. Промислова апробація розроблених методів та технічних засобів контролю НДС при проведенні ремонтних робіт на ділянках трубопроводу ДУГ-II біля села Лопушне Міжгірського району Закарпатської області Долинського ЛВУМГ підтвердила їх ефективність.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Заміховський Л.М., Незамай Б.С., Олійник А.П. Застосування многочленів Ерміта в задачах діагностики та оптимізації ремонту трубопроводів. //36.: Розвідка і розробка нафт. і газ. родовищ. – Сер.: Методи і засоби тех. діагностики. – Вип.37 (т.8) – Івано-Франківськ, 2000.-С.51–54.
 2. Замиховский Л. М. Олейник А.П. Незамай Б.С. Оценка деформации внешней поверхности трубопровода на основании аппаратных исследований // Сб.: Методы и средства технической диагностики. – Вып. XIX – Йошкар-Ола, 2002.-С. 116 – 119.
 3. Олійник А. П., Незамай Б. С. Математичне моделювання теплових впливів на ділянки магістрального трубопроводу з урахуванням радіаційного теплообміну // Матеріали 3-ї науково-технічної конф. “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання” – Івано-Франківськ, 2002.-С. 118 – 121.
 4. Незамай Б. С. Методика визначення напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів при зміні форми осі з урахуванням еліптичності січення // Наукові вісті Івано-Франк. ін-ту менеджменту та економіки “Галицька академія”.-Вип.2(6). – Івано-Франківськ, 2004.- С. 145–149.
 5. Незамай Б.С. Методи відтворення форми деформованої осі трубопроводу з використанням многочленів Ерміта // 36.: Розвідка і розробка нафт. і газ. родовищ. – Сер.: Методи і засоби тех. діагностики. – Вип.38 (т.8) – Івано-Франківськ, 2001.-С. 89–92.
 6. Незамай Б.С. Олійник А.П. Математичне моделювання процесу деформування трубопроводу з урахуванням результатів апаратних досліджень його поверхні // Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2004. - №2(24) - С. 116 – 118.
 7. Незамай Б. С. Моделирование процесса деформирования сечений магистральных трубопроводов с дефектами под действием рабочего давления // Сб.: Методы и средства технической диагностики. – Вып. XXIII – Йошкар-Ола, 2006.-С. 174 – 178.
 8. Заміховський Л.М., Ровінський В. А., Євчук О.В., Незамай Б.С. Система визначення відхилення від округлості перерізу лінійної частини магістрального трубопроводу // 36.: Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Вип.42 – Харків: НТУ ХПІ, 2006. – С. 39–45.
9. Незамай Б.С. Імітаційне моделювання процесу контролю форми перерізу труби для задані, діагностики лінійної частини магістральних трубопроводів //



Наукові вісті Івано-Франк. ін-ту менеджменту та економіки “Галицька академія”.- Вип.1(11). – Івано-Франківськ, 2007.- С. 145–149.

АНОТАЦІЯ

Незамай Б.С. Метод та пристрій контролю напружено- деформованого стану магістральних трубопроводів за їх формою перерізів. – 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. 2008.

Дисертація присвячена вирішенню проблеми оцінки напружено-деформованого стану відкритих ділянок лінійної частини магістральних трубопроводів.

Показано, що відкриті ділянки лінійної частини магістральних трубопроводів знаходяться під дією різноманітних впливів, кількісний, а іноді і якісний аналіз яких в реальних умовах неможливий.

Під дією зовнішніх впливів у тілі труб нагромаджуються дефекти, в тому числі дефекти форми перерізу, які впливають на загальний напружено-деформований стан конструкції.

Розроблено математичну модель деформування трубопроводу, яка враховує можливі деформації його перерізів, і тим самим дозволяє більш точно описати явища, що відбуваються з лінійною частиною магістральних трубопроводів в процесі тривалої експлуатації.

Розроблено первинний перетворювач та мікропроцесорний пристрій для контролю конфігурації форми перерізу труби.

Створено метод відтворення просторової конфігурації відкритих ділянок трубопроводу на основі даних про форму його перерізів з використанням методу локальних варіацій.

Ключові слова: трубопровід, дефекти форми перерізу, надійність, деформація, напружено-деформований стан.

АННОТАЦИЯ

Незамай Б.С. Метод и прибор контроля напряженно-деформированого состояния магистральных трубопроводов за их формой сечений. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля и определение состава

веществ. Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. Ивано-Франковск. 2008.

Диссертация посвящена решению проблемы оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) открытых участков линейной части магистральных трубопроводов ЛЧМТ.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и приложений.

Обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, подана научная новизна и практическая ценность полученных результатов, отражены основные результаты работы.

Показано, что открытые участки ЛЧМТ функционируют под воздействием разнообразных внешних факторов, количественный, а иногда и качественный анализ которых в реальных условиях невозможен. Во время длительной эксплуатации в теле трубы накапливаются дефекты, в том числе дефекты формы сечений, которые воздействуют на НДС конструкции.

Проделанный анализ современного состояния диагностирования ЛЧМТ показал, что существующие системы контроля трубопроводов обладают рядом недостатков. Ограниченные функциональные возможности рассмотренных технических средств не позволяют получить всю необходимую информацию о параметрах состояния трубопровода, что влияет на результат контроля его НДС. Существующие расчетные методы определения НДС ЛЧМТ позволяют получать адекватную картину состояния только в случае, когда удастся точно оценить все воздействия на участок трубопровода.

Разработанная математическая модель деформирования трубопровода включает возможные деформации его сечений и, тем самым, позволяет более точно описать явления в теле трубы ЛЧМТ в процессе его эксплуатации.

Впервые создан расчетный метод контроля НДС ЛЧМТ, который, в отличие от существующих, учитывает форму сечения трубы магистрального трубопровода.

Создан метод восстановления пространственной конфигурации открытых участков трубопроводов на основании информации о форме его сечений с использованием метода локальных вариаций.

Разработано алгоритмическое обеспечение, реализующее математическую модель деформирования трубопровода, и позволяющее моделировать НДС конкретных открытых участков ЛЧМТ.

Разработано алгоритмическое и программное обеспечение метода контроля НДС трубопроводов на основании информации о координатах ограниченного числа точек поверхности трубопровода.

С целью выявления требований к средствам контроля формы сечений проведены исследования методами имитационного моделирования. При этом было установлено, что аналитическое представление формы сечения трубопровода,

полученное в результате интерполяции кубическим сплайном со сглаживанием результатов измерений может быть использован для контроля НДС трубопровода.

Разработан первичный преобразователь и микропроцессорное устройство для контроля конфигурации формы сечения трубы.

Промышленное использование разработанных методов и технических средств контроля НДС при проведении ремонтных работ на участках трубопровода около села Лопушне Мижгирского района Закарпатской области Долинского ЛВУМГ подтвердило их эффективность.

Ключевые слова: трубопроводы, дефекты формы сечения, надежность, деформация, напряженно-деформированное состояние.

ABSTRACT

Nezamay B.S. The trunk pipeline's stress and strained state control method and device taking to account the section shape. – Manuscript.

The thesis for obtaining the scientific degree of Candidate of Technical Sciences by speciality 05.11.13 – Device and Methods of Testing and Defining of Matter Composition. Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2008.

The dissertation is devoted to the solution of the stress and strained state estimations problem for the trunk pipeline's linear portion above-ground segments..

It was shown, that above-ground segments of the trunk pipelines linear portion are situated under the action of different influences, the quantitative and sometimes the qualitative one's analysis is impossible in the real working conditions. As results of these external influences action the defect's appearance and accumulation takes place in pipeline, in particularry – the defects of section shape, which make the influence on the general stress and strained state of the construction.

The mathematical model of the deformation process in pipeline is designed taking to account the possible deformation of the one's sections. It allows to describe the processes, which take place in the trunk pipeline linear portion during the long term exploitation, with the increasing level of accuracy.

The sensor and microprocessor device for the pipeline section shape configuration control are designed, the method of above-ground pipeline's segments space configuration reconstruction is given based on the information about the one's section shape using the local variations method.

Key words: pipeline, the section shape defects, reliability, deformation, stress and strained state.