

УДК 656.56: 51-7

## РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ОЦІНКИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЛІНІЙНИХ ДІЛЯНОК МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

*Жовтуля Л.Я. Олійник А.П. Яворський А.В. Карнаш М.О.*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна*

*e-mail: [z.lyubomyr@gmail.com](mailto:z.lyubomyr@gmail.com)*

*Об'єктом дослідження визначено лінійні частини магістральних нафто- та газопроводів, які є найбільш потенційно небезпечними типами трубопровідних мереж. Розроблено методику оцінки напружено-деформованого стану трубопроводу. Математично змодельовано процес деформування підземної ділянки трубопроводу за даними переміщення деякої множини точок. Описано процес визначення координат точок осі підземного трубопроводу, оцінки точності інтерполяції просторового положення деформованої осі підземного трубопроводу і визначення кроку інтерполяції та параметрів згладжування.*

*Ключові слова: трубопровідні мережі, напружено деформований стан, методика, оцінка ризиків, математична модель, координати осі*

*Объектом исследования определены линейные части магистральных нефте- и газопроводов, которые являются наиболее потенциально опасными типами трубопроводных сетей. Разработана методика оценки напряженно-деформированного состояния трубопровода. Математически смоделировано процесс деформирования подземного участка трубопровода по данным перемещение некоторого множества точек. Описан процесс определения координат точек оси подземного трубопровода, оценки точности интерполяции пространственного положения деформированной оси надземного трубопровода и определения шага интерполяции и параметров сглаживания.*

*Ключевые слова: трубопроводные сети, напряженно-деформированное состояние, методика, оценка рисков, математическая модель, координаты оси*

*The linear part of main oil and gas pipelines, which are potentially the most dangerous type of pipeline networks, selected as the object of investigation. A technique for assessing the stress-strain state of the pipeline has been developed. Underground pipeline deformation process was modeled according to the set of points displacement. In the paper are described: underground pipeline coordinates determining process, estimating the interpolation accuracy of the underground pipeline spatial position, interpolation step and smoothing parameters determining.*

*Keywords: pipeline networks, stress-strain state, methodology, risk assessment, mathematic model, axis coordinates*

Лінійна частина трубопроводів України має значну протяжність та перебуває під дією постійного руху ґрунту. Статистичні дані щодо аварійних випадків [1] на магістральних трубопроводах підтверджують, що одним із найнебезпечніших ризиків такого роду - ризики геодинамічного походження, несвоєчасне виявлення яких може призвести до виникнення надзвичайної ситуації.

Переміщення осі трубопроводу призводить до зміни напружено деформованого стану,

критичні значення якого призводять до руйнування металу.

### **Математичне моделювання процесу деформування підземної ділянки**

При моделюванні процесу деформування підземних ділянок магістральних трубопроводів за даними про зміну просторової конфігурації їх осі використовується підхід, запропонований в [5] для надземних ділянок трубопроводів. В даному випадку з використанням експериментальних методів [2,3,4] визначається геометрична конфігурація осі трубопроводу з

деякою точністю в контрольний момент часу. Вважається, що початкове положення осі трубопроводу є відомим (наприклад з проектною документації). Таким чином для радіус-вектора точки трубопроводу записується наступне співвідношення.

$$\vec{r}(s, \varphi, r, t) = \vec{r}_1(s, \varphi, r, t) + \rho(s, \varphi, r, t) \times (\cos \omega(s, \varphi, r, t) \vec{b}_1 + \sin \omega(s, \varphi, r, t) \vec{n}_1) + \Psi(s, \varphi, r, t) \vec{t}_1 - \frac{D}{2} \vec{n}_1 \quad (1)$$

де  $s, \varphi, r$  – пов'язані з досліджуваною ділянкою підземного трубопроводу, яка моделюється криволінійним циліндричним тілом, координати відповідно:

$s$  – вздовж осі трубопроводу;  
 $\varphi$  – по полярному куту;

$\vec{r}_1$  – радіус-вектор точки на верхній твірній трубопроводу;

$D$  – зовнішній діаметр трубопроводу;

$\rho(s, \varphi, r, t), \omega(s, \varphi, r, t), \Psi(s, \varphi, r, t)$  – функції, які описують зміну геометрії

$$\vec{r}_1 = \begin{cases} x = s - \frac{D}{2} \alpha_n(s) + (\alpha_n(s) \sin \varphi - \alpha_b(s) \cos \varphi) r \\ y = y(s) - \frac{D}{2} \beta_n(s) + (\beta_n(s) \sin \varphi + \beta_b(s) \cos \varphi) r, \\ z = z(s) - \frac{D}{2} \gamma_n(s) + (\gamma_n(s) \sin \varphi + \gamma_b(s) \cos \varphi) r \end{cases} \quad (3)$$

де координати  $s, \varphi, r$  набувають тих же значень, що і в (2),  $s; y(s); z(s)$  – координати точок верхньої модельованої ділянки,  $D$  – діаметр трубопроводу;  $\alpha_n(s); \beta_n(s); \gamma_n(s)$  – координати вектора нормалі до верхньої твірної;  $\alpha_b(s); \beta_b(s); \gamma_b(s)$  – координати вектора бінормалі.

При побудові (3) використано наступні допущення:

- Оскільки єдиною вихідною інформацією про зміну геометрії підземної ділянки є координати її деформованої осі, то в (1) приймається, що:

$$\begin{cases} \vec{r}_1(s, \varphi, r, t) = \{s; y(s); z(s)\} \\ \rho(s, \varphi, r, t) = r \\ \omega(s, \varphi, r, t) = \varphi \\ \Psi(s, \varphi, r, t) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

що обумовлено тим, що координати верхньої твірної визначаються експериментально і задаються у вигляді координат точок  $s_i; y(s_i); z(s_i)$ , а для одержання  $(s; y(s); z(s))$  використовується

досліджуваної ділянки відповідно в радіальному, поперечному та повздовжньому напрямках і є або заданими, або ж такими, що визначаються в процесі розв'язання задачі;

$\vec{T}_1; \vec{b}_1; \vec{n}_1$  – вектори дотичної бінормалі та нормалі до верхньої твірної. В початковий момент часу коли трубопровід вважається об'єктом з прямолінійною віссю, залежність (1.1) в координатній формі може бути записана наступним чином:

$$\vec{r}_1 = \begin{cases} x = s & D \leq s \leq L \\ y = r \sin \varphi & R_1 \leq r \leq R_2, \\ z = r \cos \varphi & 0 \leq \varphi \leq 2\pi \end{cases} \quad (2)$$

де  $R_1; R_2$  – відповідно внутрішній та зовнішній радіуси трубопроводу;

$L$  – довжина досліджуваної ділянки.

В контрольований момент часу залежність (1.1) записується у вигляді:

інтерполяційна або апроксимаційні процедури[7], тоді як жодної інформації про характер поведінки  $\rho(s; \varphi; r; \tau); \omega(s, \varphi, r, \tau)$  та  $\Psi(s, \varphi, r, \tau)$  немає, що обумовлює їх запис у такому вигляді, в якому це було записано для недеформованої ділянки. Якщо ж подання (1.3) приводить до фізично нереальних результатів, вказані функції моделюються за методиками, указаними в [5], де враховується зміна конфігурації перерізів з різними типами її представлення – еліптичність, грушевидність, пропорційність параметрів еліптичності ступені деформованості осі – проте вказані підходи є вмотивовані для відкритих ділянок, коли інформація про деформацію перерізів є доступною принаймні візуально. У випадку підземних ділянок подання (1.3) є обґрунтованим обмеженістю інформації про деформації перерізів. Цим же пояснюється вибір  $\Psi(s, \varphi, r, \tau) = 0$ , оскільки для підземної ділянки перевірити принаймні візуально виконання гіпотези про плоскі перерізи також не видається можливим. Якщо ж при дослідженні підземної ділянки використовувати ті ж підходи, що і для

надземної, то при цьому при різних способах задання  $\rho(s; \varphi; r; \tau); \omega(s, \varphi, r, \tau); \psi(s, \varphi, r, \tau)$  виникає ще одна проблема – для підземної ділянки складно записати рівняння рівноваги, оскільки практично неможливо врахувати в цих рівняннях дію масових сил (вага труби; вага продукту, вага ґрунту, яка діє на кожний переріз трубопроводу).

Таким чином, знаючи (2) та (3), виконується наступна послідовність розрахунків:

1. В контрольний та початковий момент часу визначаються вектори локального базису в кожній точці модельованої ділянки [8]:

$$\bar{\Theta}_i = \frac{\partial \bar{r}_0}{\partial \xi} \quad \xi_1 = s; \xi_2 = \varphi; \xi_3 = r; \quad (5)$$

$$\bar{\Theta}_i^k = \frac{\partial \bar{r}_i}{\partial \xi}$$

де  $i = 1, 2, 3$ ;

$\bar{r}_0$  обраховується за (2), а  $\bar{r}_i$  - за (3).

Обчислення похідних здійснюється шляхом прямого диференціювання (2) та (3) по відповідним координатам.

2. На основі (4) визначаються компоненти метричного тензора:

$$g_{ij}^0 = \bar{\Theta}_i^0 \cdot \bar{\Theta}_j^0, \quad j, i = 1, 2, 3; \quad (6)$$

$$g_{ij}^k = \bar{\Theta}_i^k \cdot \bar{\Theta}_j^k, \quad i, j = 1, 2, 3$$

3. Компоненти  $q_{ij}^0$  та  $q_{ij}^k$  утворюють матрицю, для коректності проведення обчислень повинна виконуватись умова:

$$G^0 = \det \{g_{ij}^0\} \neq 0; \quad (7)$$

$$G^k = \det \{g_{ij}^k\} \neq 0.$$

Виконання (7) дозволяє на основі (6) провести обчислення контраваріантних компонент матриць  $\{G^0\}$  та  $\{G^k\}$  як компонент матриць, обернених до вказаних:

$$g_0^{ij} = \{g_{ij}^0\}^{-1}; \quad (8)$$

$$g_k^{ij} = \{g_{ij}^k\}^{-1}$$

Очевидно, що за (2)

$$G^0 = r^2;$$

$$G^k = r^2 \left( g_{II} - (\alpha_\beta \frac{d\alpha_n}{ds} + \beta_b \frac{d\beta_n}{ds} + \gamma \frac{d\gamma_n}{ds})(R^2 - 2Rr \sin \varphi + r^2) \right). \quad (9)$$

тому у випадку малих деформацій умови (8) виконуються, оскільки в такому випадку

$$\left| \frac{d\alpha_n}{ds} \right| \ll 1, \quad \left| \frac{d\beta_n}{ds} \right| \ll 1, \quad \left| \frac{d\gamma_n}{ds} \right| \ll 1$$

4. Компоненти тензора деформацій обчислюється за формулою [8]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (g_{ij}^0 - g_{ij}^k), \quad j = 1, 2, 3, \quad (10)$$

5. На основі (5) – (10) з використанням апарату лінійної теорії пружності визначаються компоненти тензора напружень за законом Гука [8]:

$$\sigma_{ij} = \lambda I_1(\varepsilon) g_{ij} + 2\mu \cdot \varepsilon_{ij} \quad (11)$$

Вказані обчислення можна проводити також і в рамках моделі анізотропного тіла:

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 Cijkl \cdot \varepsilon_{ij}, \quad (12)$$

де  $Cijkl$  - компоненти тензору пружних модулів матеріалу, проте (12) використовується лише за умови, що матеріал трубопроводу суттєво анізотропний, і коефіцієнти  $Cijkl$  є відомими. Для інженерних розрахунків, як правило, використовується (1.10), де  $rl$  і  $xl$  - параметри Ламе матеріалу, пов'язані з модулем Юнга та коефіцієнтом Пуасона матеріалу наступним чином:

$$\begin{cases} \mu = \frac{E}{2(1+\sigma)} \\ \lambda = \frac{\sigma E}{(1-2\sigma)(1+\sigma)} \end{cases} \quad (13)$$

Для трубопровідних сталей, як правило, приймають  $E=210000$  МПа,  $\sigma = 0,3$ .

В поданні (11) функція  $I_1(\varepsilon)$  є першим інваріантом деформацій і обчислюється за формулою:

$$I_1(\varepsilon) = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 \varepsilon_{ij} g_0^{ij}, \quad (14)$$

де  $\varepsilon_i$  обчислюється за (10), а  $g^{ij}$  - за (8).

Визначення компонент  $\sigma_{ij}$  дозволяє виділяти найбільш небезпечні з точки зору зміни напруженого стану сектора досліджуваної ділянки, а якщо вважати, що в початковий момент часу напруження в трубопроводі були рівними нулю, то (11) дозволяє оцінювати реальні значення напружень. Критерієм допустимості напружень може виступати значення межі пружності ( $\sigma_{np} \approx 350$  МПа), або межі текучості ( $\sigma_m \approx 440$  МПа), коли наведені

значення є різними для різних типів трубопровідних сталей і визначаються з довідникової літератури [9]. Слід також зазначити, що описаний підхід до оцінки напруженого стану підземних трубопроводів є інтегральним, він не вимагає детальної інформації про сили і навантаження, дія яких на дану ділянку обумовлена вимірами переміщення. У випадку, коли деякі напруження (наприклад, від дії внутрішнього тиску, температурних перепадів і т. д.) є відомими, можна використати принцип суперпозиції розв'язків задачі теорії пружності, за яким:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^H + \sigma_{ij}^B, \quad (15)$$

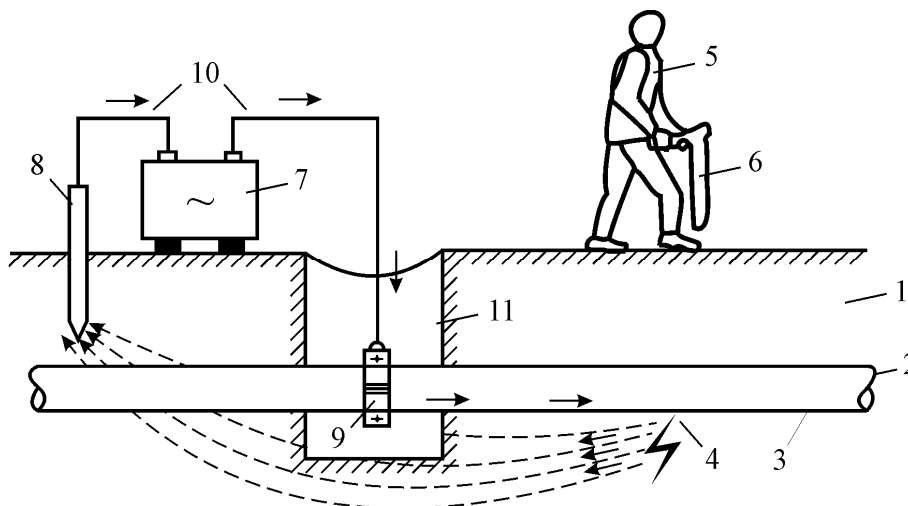
де  $\sigma_{ij}$  - напруження, визначені за (11),  $\sigma_{ij}^B$  - відомі напруження,  $\sigma_{ij}^H$  - напруження невідомої природи.

### Методика визначення координат осі підземної ділянки трубопроводу

Визначення координат закладення трубопроводу, для одержання його фактичного положення в просторі і кривизни може виконуватись безконтактними методами шляхом вимірювання складової електромагнітного поля, створюваного змінним струмом, що протікає по трубопроводу від генератора низької частоти.

Узагальнена схема безконтактного визначення просторового положення підземного одиничного нафтогазопроводу трасошукачем приведена на рисунку 1.

Як джерело струму при проведенні контролю (рисунок 1) використовується сигнал-генератор (7) або станція катодного захисту, що підключається до нафтогазопроводу 2 і заземлювача 8.



1- ґрунт; 2 – нафтогазопровід; 3 – ізоляційне покриття; 4 – пошкодження ізоляційного покриття; 5 – оператор; 6 – приймач пристрою контролю; 7 – сигнал-генератор; 8 – заземлювач; 9 – хомут; 10 – з'єднувальні провідники; 11 – експлуатаційний колодязь

**Рисунок 1. Узагальнена схема безконтактного визначення положення одиничного підземного нафтогазопроводу.**

Місцезнаходження осі трубопроводу визначають відповідно до керівництва з експлуатації трасошукача. Кожна визначена контрольна точка на осі трубопроводу закріплюється тимчасовим кілком або металевим штирем з номером для подальшого визначення просторових координат. Розміщення визначених контрольних точок показує положення трубопроводу в плані. Глибину залягання трубопроводу визначають в місцях визначення осі трубопроводу, як правило, трасошукачами, що дозволяють виконувати прямі вимірювання глибини залягання. Глибину

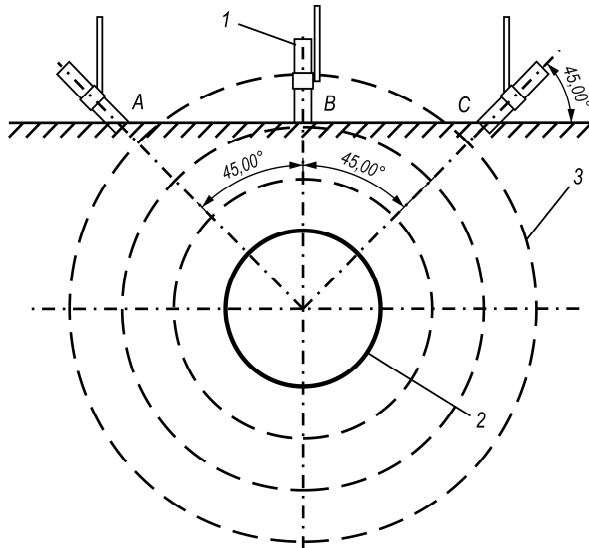
залягання трубопроводу  $h_\phi$  визначають за формулою:

$$h_\phi = H - \frac{1}{2} \cdot D, \quad (16)$$

де  $H$  – відстань від поверхні ґрунту до осі трубопроводу в метрах, яка визначена за допомогою трасошукача. За відсутності трасошукачів, що дозволяють виконувати прямі вимірювання глибини залягання трубопроводу.

Магнітну антену приймального пристрою трасошукача розміщують перпендикулярно до осі трубопроводу та під кутом  $45^\circ$  від вертикальної осі. Пересуваючи магнітну антену від проекції осі трубопроводу поперемінно у

різні сторони, визначають місцезнаходження точок А і С (рисунок 2) за мінімальною гучністю звукового сигналу і/або рівнем індикатора приймального пристрою трасошукача. Вимірюють відстані АВ та ВС.



1 – магнітна антена приймального пристрою трасошукача, 2 – трубопровід, 3 – силові лінії магнітного поля  
**Рисунок 2 – Визначення глибини залягання МН.**

Середнє значення відрізків АВ і ВС буде відповідати відстані від поверхні землі до осі трубопроводу. Глибину залягання нафтопроводу  $h_{\phi}$  визначають за формулою:

$$h_{\phi} = \frac{AB + BC}{2} - \frac{1}{2} \cdot D = \frac{1}{2} \cdot (AB + BC - D) \quad (17)$$

де D – діаметр нафтопроводу.

Наступним кроком є визначення просторових координат з допомогою високоточних GPS передавачів. Вимірювання проводять по закріплених контрольних точках. Особливістю цього процесу є додавання до координати висоти параметри глибини залягання трубопроводу.

Для даних досліджень використовується трасошукач SeekTech SR-60 який визначає з потрібною точністю положення осі трубопроводу та глибину залягання.

Виміряні дані координат точок верхньої твірної, та початкові координати трубопроводу дають змогу оцінити діючі значення напружень.

### 3 Оцінка точності інтерполяції просторового положення деформованої осі надземного трубопроводу і визначення кроку інтерполяції та параметрів згладжування.

Для реалізації методики оцінки напружено-деформованого стану, що виражається залежностями (1.1)-(1.13) необхідно за експериментально вимірними значеннями координат точок верхньої твірної ( $s_c, ucs_i, z(s_i)$ ) одержати вирази для радіус-вектора будь-якої точки твірної у вигляді  $\vec{r} = (S; ucs; z(s))$ , де  $u(s)$  та  $z(s)$  є неперервними функціями. Для цього використовується широко відомий апарат інтерполяції з використанням інтерполяційного кубічного сплайну [5, 6] або інтерполяційного кубічного сплайну із згладжуванням експериментальних даних [4]. Для інтерполяційного кубічного сплайну встановлено [10, 11] параметри сітки інтерполяції, які характеризуються співвідношеннями між мінімальною та максимальною відстанями між вузлами інтерполяції:

$$\left( \frac{h_{\max}}{h_{\min}} \right)^{1/2} = \frac{8|\varepsilon_1 - z\varepsilon|\sqrt{3}}{3\|f''\|_2 h_{\max}^{3/2}} - \frac{2}{3}, \quad (18)$$

де  $\varepsilon_1$  – точність, з якою необхідно інтерполювати функцію  $f(x)$  сплайном  $S_{f(x)}$ , величина  $\varepsilon$  встановлює рівень точності задання значень функції у вузлах інтерполяції;  $\|f''\|_2$  – норма функції  $f''(x)$  у відповідному метричному просторі [12]. Залежність (17) може бути записана у більш компактній формі з урахуваннями того, що для магістральних трубопроводів радіус кривини осі повинен задовольняти умову:

$$R(x) \geq C \cdot D_{TP}, \quad (19)$$

де  $D_{TP}$  – діаметр трубопроводу,  $C$  – константа, яка задається значенням  $C \in [900; 1000]$ ,  $R(x)$  – радіус кривини трубопроводу, який може бути для інженерних розрахунків записаний у вигляді:

$$R(x) = \frac{1}{|f''(x)|}, \quad (20)$$

З урахуванням (19) та (20) залежність (18) для рівномірної сітки вимірювання координат вузлів з кроком  $h$  може бути записана у вигляді

$$h^{3/2} = \frac{8|\varepsilon_1 - z\varepsilon| \cdot CD_{TP} \sqrt{3}}{L^{1/2}}, \quad (21)$$

$$h = \left[ \frac{8|\varepsilon_1 - z\varepsilon|CD_{TP}\sqrt{3}}{L^{1/2}} \right]^{2/3}, \quad (22)$$

Для ділянки трубопроводу довжиною  $L=100\text{м}$ , діаметром труби  $D_{TP}=1,21\text{м}$  з рівнем точності вимірювання  $1\text{см}$  значення кроку  $h$ , з яким треба проводити вимірювання координат точок верхньої твірної з кроком  $h=6$  метрів, що є цілком допустимим при критичних вимірюваннях. Особливістю інтерполяційного кубічного сплайну є те, що при його побудові на точність інтерполяції осі суттєво впливає точність задання вузлів інтерполяції. Як правило, значне відхилення від реальних даних дає результати, які не відповідають реальній фізичній картині процесу. Вихід із цієї ситуації можливий шляхом реалізації двох підходів:

- використання інших методів інтерполяції (многочлени Лагранжа, Чебишева, Ерміта) або апроксимації за методом найменших квадратів, при цьому одержані криві можуть суттєво відрізнятись від реальних в окремих випадках (недостатня кількість вузлів інтерполяції, їх нераціональне розміщення тощо);

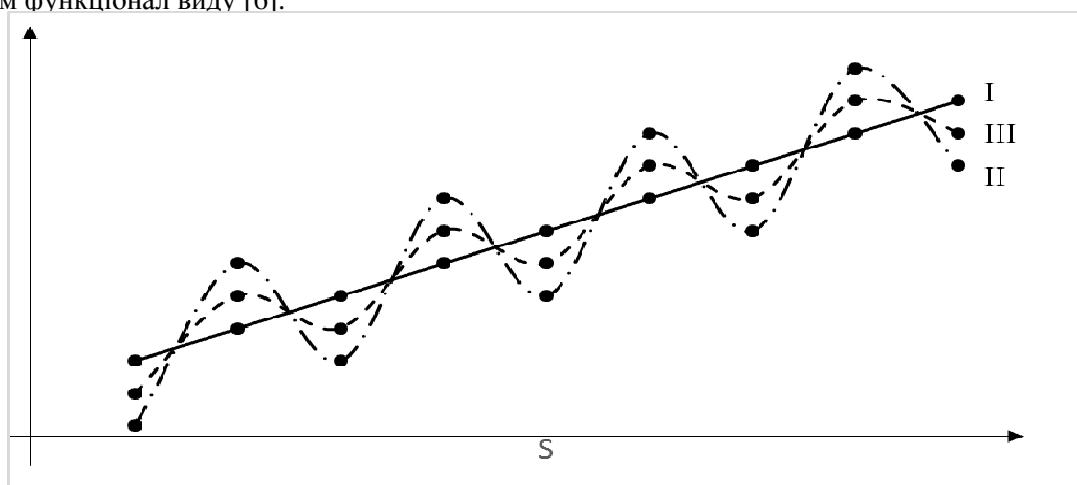
- використання підходів, пов'язаних з реалізацією апарату згладжуючих сплайнів, які дозволяють зменшувати похибку вимірювань координат точок за рахунок введення деяких поправляючих коефіцієнтів, які залежать від точності вимірювання цих координат експериментальними методами. При реалізації апарату згладжуючого сплайну шукана згладжуюча функція мінімізує на класі  $W_2^2[a;b]$  інтегрованих на відрізку  $[ab]$  функцій з їх квадратом функціонал виду [6]:

$$\Phi(u) = \int_a^{10} U''(x)^2 dx + \sum_{k=0}^n P_k (U(x_k) - \tilde{f}_k)^2 \quad (23)$$

Формула (1.21) вимагає детального пояснення:  $\tilde{f}_k$  - це координати реально виміряних точок;  $U(x_k)$  - координати точки на кривій, що описує сплайн;  $P_k$  - вагові коефіцієнти. Задача мінімізації (1.21) вирішується для різних значень  $P_k$ . В граничних випадках якщо  $P_k \rightarrow \infty$  для будь-якого  $K$ , то побудований сплайн фактично не буде являтися згладжуючим, він буде проходити через всі вузлові точки з координатами  $(x_k; \tilde{f}_k)$ . Якщо  $P_k \rightarrow 0$ , то фактично одержана лінія буде прямою, оскільки вона доставлятиме екстремум функціоналу виду

$$\Phi(u) = \int_a^D U''^2(x) dx, \quad (23)$$

який, очевидно, матиме мінімум при  $U''(x) = 0 \Rightarrow U(x) = Ax + B$  - тобто,  $U(x)$  - пряма лінія. Знаючи, з якою точністю проводяться вимірювання  $f_k$  можна підібрати такі значення  $P_k$ , при яких конфігурація функції  $U(x)$  буде, з одного боку, згладжувати вплив похибки вимірювання, а з іншого, не дозволить втратити особливості конфігурації реальної ділянки. Модельно це може бути зображено наступним чином: (рисунк 3)



I – абсолютне згладжування; II – не згладжений сплайн; III – згладжена крива

Рисунок 3 – Згладжування експериментальних даних.

Методики оптимізації (1.23) за параметрами  $P_k$ , які характеризують рівень згладжування даних в залежності від точності вимірювання є добре відомими, вони використовуються для надземних ділянок [5], тому їх використання для підземних ділянок є добре вмотивованим. Зокрема, використовується процедура мінімізації функціоналу (1.22) шляхом реалізації ітераційної процедури, на кожному кроці якої коефіцієнти  $P_k$  знаходяться за формулою:

$$P_k^{(j+1)} = P_k^{(j)} \cdot \frac{|U^{(j)}(x_k) - \tilde{y}_k|}{\varepsilon}, \quad (25)$$

яка реалізується до тих пір, поки не досягається виконання умови

$$\frac{|U^{(j)}(x_k) - \tilde{y}_k|}{\varepsilon} \rightarrow 1. \quad (26)$$

В формулах (25), (26)  $j$  - номер кроку ітераційного процесу;  $\varepsilon$  - точність, з якою проводиться вимірювання координат вузлових точок,  $P_k^{(j)}$  - значення коефіцієнта згладжування на кроці ітераційного процесу  $j$ ,  $U^j(x_k)$  - згладжені координати вузлової точки  $X_k$  після процедури мінімізації (23) на кроці ітераційного процесу за номером  $j$ ;  $y_k$  - початкові незгладжені координати цієї вузлової точки. Тестові розрахунки при реалізації вказаних методик показують, що при використанні ітераційної процедури згладжування, похибка при оцінці напружень складає  $\pm 5$  МПа для діючої ділянки трубопроводу, вимірювання переміщень якого, проводиться з точністю 1 мм для ділянки трубопроводу довжиною  $L=100$ м.

### Висновки

Авторами проведено теоретичні дослідження з моделювання процесу деформації трубопроводу для оцінки, а саме оцінки діючих значень та прогнозування напружень. Розроблено методику оцінки напружено-деформованого стану трубопроводу. Математично змодельовано процес деформування підземної ділянки трубопроводу за даними переміщення деякої множини точок. Описано процес визначення координат точок осі підземного трубопроводу, оцінки точності інтерполяції просторового положення

деформованої осі надземного трубопроводу і визначення кроку інтерполяції та параметрів згладжування.

Проведені дослідження дають змогу безконтактним методом оцінити напружено-деформований стан підземної частини лінійного трубопроводу. Авторами планується продовжити дослідження із оцінки напружень трубопроводу під дією зсуву ґрунтів.

*1. Gas pipeline incidents. 8-th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (1970-2010). Режим доступу: ([http://www.egig.nl/downloads/8th\\_report\\_EGIG.pdf](http://www.egig.nl/downloads/8th_report_EGIG.pdf)). 2. Баи В. Я. Исследование напряжений и деформаций термoeлектрическим методом / В. Я. Баи. – Київ: Наукова думка, 1984. – 100 с. 3. Золочевский В. А. экспериментальные в строительстве механике / В. А. Золочевский. – Москва: Стройиздат, 1983. – 192 с. 4. Клюев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика / В. В. Клюев. – Москва: Машиностроение, 2003. – 656 с. – (3). 5. Олійник, А. П. Математичні моделі процесу квазістаціонарного деформування трубопровідних та промислових систем при зміні їх просторової конфігурації [Текст] / А. П. Олійник // Наукове видання. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – 320 с. 6. Самарский А. А. Численные методы: Учеб. пособие для вузо / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 432 с. 7. Марчук Г. И. МЕТОДЫ. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ. МАТЕМАТИКИ / Г. И. Марчук. – Москва: Наука, 1984. – 608 с. 8. Седов Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. – Москва: Наука, 1984. – 572 с. 9. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы / Госстрой СССР. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1999. – 125с. 10. Корнейчук Н. П. Экстремальные задачи теории приближения / Н. П. Корнейчук. – Москва: Наука, 1976. – 320 с. 11. Корнейчук Н. П. Сплайны в теории приближения / Н. П. Корнейчук. – Москва: Наука, 1984. – 422 с. 12. Бахвалов Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов. – Москва: Наука, 1973. – 631 с.*

**Поступила в редакцію 12.05.2017 р.**

**Рекомендували до друку: докт.техн.наук, проф. Семенцов Г.Н., докт. техн. наук, проф. Заміховський Л.М.**