

## ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИН ПЕРЕМІЩЕНЬ В ПРОСТОРОВИХ СИСТЕМАХ ДУГОВИХ ДІЛЯНОК ТРУБОПРОВІДІВ НА РЕМОНТНИХ ДІЛЯНКАХ

М.М.Семеген, З.П.Лютак

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 46077  
e-mail: nung@nung.edu.ua

На основани законів технічної механіки і фізики розповсюдження ультразвукової хвилі визначена міра прогибів дугових елементів трубопроводу на ремонтній ділянці. Показана залежність розподілу прогибів, що виникають в дугових елементах трубопроводу під впливом зовнішньої навантаження, від її розміру і кулової координати дугового елемента. Дана функціональна схема ультразвукового пристосування для визначення швидкості розподілу ультразвуку. На основани виведених залежностей із отриманих результатів по відомих напруженням в сеченнях дугового елемента трубопроводу можна давати рекомендації по проведенню ремонтно-відновительних робіт на даних ділянках, забезпечивши при цьому цілісність конструкції трубопроводу.

On basis of technical mechanics laws and physical considerations on propagation of ultrasonic wave the mode of deformations of the arc element of the pipeline on repair bay is identified. Also the dependence of distribution of travel that appear in the arc element of the pipeline by influence of external factors depending on their size and angular coordinate of arc elements is demonstrated. On basis of the dependences deduced and the results obtained, knowing the travel in the defined sections of the arc part of pipeline, the advices could be given on carrying out of maintenance works at the parts in the specific situations emerged, at the same time having ensured the integrity of pipeline construction.

Однією із важливих умов забезпечення роботоздатності та збільшення терміну служби магістральних нафтогазопроводів, які є функціональними вузлами промислово-транспортного комплексу, є проведення якісного і своєчасного контролю їх технічного стану. У зв'язку з цим все більш актуальним стає завдання створення системних пристроїв і методик, які б стали невід'ємною частиною технологічних систем при обробці та визначенні даних напружено-деформованого стану трубопроводів на ремонтних ділянках. Це є особливо важливо актуальним на небезпечних ділянках газопроводів і трубопроводів систем загалом, відмова яких може призвести до забруднення навколишнього середовища, а також до аварій з важкими наслідками.

Дугові ділянки магістральних трубопроводів піддаються дії зовнішніх чинників, що призводить до виникнення в них деформацій згину та кручення. Для того щоб оцінити безпечність роботи трубопроводів недостатньо знати тільки напруження, які виникають в їх поперечних перерізах під дією зовнішнього чи внутрішнього навантаження.

Визначені напруження дають змогу перевірити міцність системи. Однак навіть дуже міцні трубопроводи можуть виявитися непридатними для експлуатації через недостатню їх жорсткість. Для перевірки жорсткості трубопроводу необхідно визначити переміщення окремих його точок.

Тому метою роботи є оцінка впливу навантажень на трубопровід та теоретичне обґрунтування величини переміщень трубопроводів під дією, а також визначення та контроль величини переміщень з використанням ультразвукового електронного пристрою.

Постає завдання визначити величини переміщень дугових елементів під дією зовнішніх чинників. Шляхи вирішення схожих завдань для окремих випадків відомі [1]. В даній роботі розглянуто метод визначення переміщень на основі законів технічної механіки. Основним недоліком даного методу розрахунку є складність обчислень та оперування великою кількістю розрахункових формул.

Одним із основних методів неруйнівного контролю для визначення величини напружень в стінці магістральних трубопроводів, що експлуатуються, є ультразвуковий метод [2]. Основним чинником, який впливає на зміну характеристик розповсюдження ультразвукової хвилі, є супроводжувана напруженням зміна міжатомних віддалей і пружних модулів, тобто, в кінцевому результаті, деформація ділянок контролю магістральних трубопроводів. За результатами акустичних вимірювань швидкості поширення ультразвукової хвилі визначаємо компоненти тензора напружень:

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де:  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – нормальні напруження,

$\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{zx}, \tau_{xz}, \tau_{zy}, \tau_{yz}$  – дотичні напруження.

Розглянемо дугову ділянку трубопроводу  $ABC$ , заглиблену в ґрунт у системі координат  $XYZ$  (рис. 1). Нехай під час проведення ремонтних робіт частина даної ділянки звільнена від ґрунту. Вважаємо, що дана дугова ділянка тру-

бопроводу в перерізі  $B$  защемлена, оскільки ділянка  $AB$  є заглибленою в ґрунт, а дугова ділянка  $BC$  в перерізі  $C$  навантажена силою  $P$ , яка перпендикулярна площині дуги та відповідно паралельна осі  $Y$ .

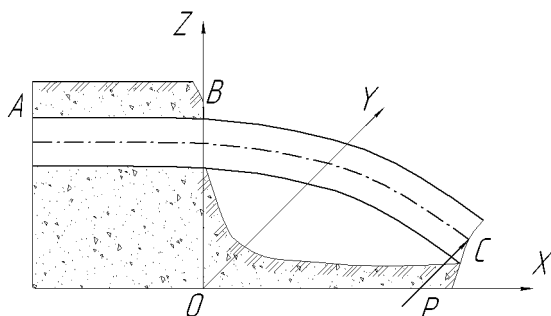


Рисунок 1 – Схема дугової ділянки трубопроводу

Для наочності з метою визначення величини прогину зобразимо дугову ділянку трубопроводу  $BC$  у вигляді рисунків 2 та 3.

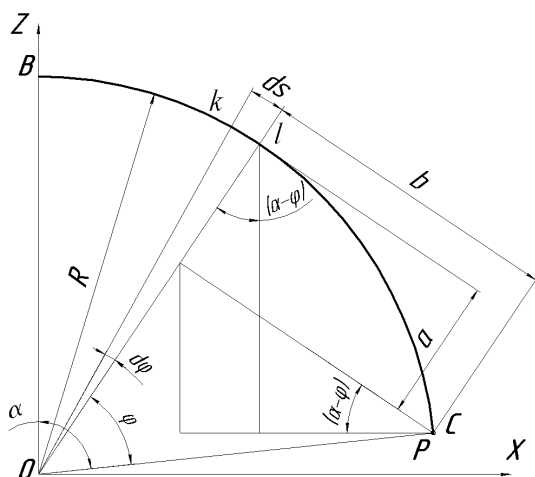


Рисунок 2 – Моменти, які виникають в дуговій ділянці трубопроводу під дією сили

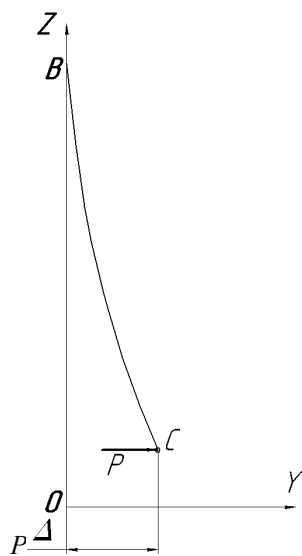


Рисунок 3 – Напрямок дії сили  $P$

На рисунку 2 ділянка трубопроводу зображена у площині  $ZX$  як дуга, радіус кривизни якої  $R$ , а кут дуги –  $\alpha$ . Позначимо на даній ділянці трубопроводу елементарну дугу  $kl$  довжиною  $ds$ . Тоді положення поперечного перерізу в точці  $l$  визначається кутом  $\varphi$ , а кут між радіусами, проведеними з точок  $k$  та  $l$ , буде  $d\varphi$ . Відстані від точки дії сили  $P$ , яка в даному випадку перпендикулярна площині дуги і прикладена в точці  $C$ , до положення поперечного перерізу в точці  $l$  позначимо відповідно  $a$  та  $b$ .

Під дією зовнішньої сили  $P$  в поперечних перерізах даної дугової ділянки трубопроводу виникає деформація згину та кручення, внаслідок якої в поперечних перерізах трубопроводу виникають силові фактори: поперечна сила  $Q$ , згинаючий  $M_{z\kappa}$  та крутний  $M_{\kappa p}$  моменти. Оскільки проекція сили  $P$  на площину  $ZX$  дорівнює 0, тому дані силові фактори діють в двох площинах  $XY$  та  $YZ$ , а дотичні напруження  $\tau_{xz}$  та  $\tau_{zx}$  дорівнюють 0. В розглядуваній моделі (рис. 1) тензор напружень буде мати вигляд:

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ 0 & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де:  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$  – напруження, які виникають під час згину в площинах  $XY$  та  $YZ$ ,

$\sigma_y$  – напруження, яке виникає під дією внутрішнього тиску  $p$ .

Загальне переміщення дугової ділянки трубопроводу в напрямку дії сили  $P$  згідно з [1] дорівнює:

$$\Delta = \frac{1}{E \cdot I} \left[ \int_0^{\alpha} M_{z\kappa} \cdot b \, ds + 1,3 \cdot \int_0^{\alpha} M_{\kappa p} \cdot a \, ds \right] = \quad (3)$$

$$= \frac{P \cdot R^3}{E \cdot I} \int_0^{\alpha} [\sin^2 \varphi + 1,3 \cdot (1 - \cos \varphi)^2] d\varphi$$

де:  $E$  – модуль пружності,

$I$  – осьовий момент інерції.

Після інтегрування в межах від 0 до  $\varphi = \alpha$  отримаємо:

$$\Delta = \frac{P \cdot R^3}{E \cdot I} (2,45\alpha + 0,15 \sin \alpha \cos \alpha - 2,6 \sin \alpha) \quad (4)$$

Для розрахунку згинаючих та крутних моментів в площині  $XY$  (рис. 2, 3) розглянемо проекції цих моментів на площину  $XY$ , які дорівнюють:

$$M_{z\kappa(xy)} = Pb \cos(\alpha - \varphi) = PR \sin \varphi \cos(\alpha - \varphi) \quad (5)$$

$$M_{кр(xy)} = Pa \sin(\alpha - \varphi) = PR(1 - \cos \varphi) \sin(\alpha - \varphi) \quad (6)$$

Для розрахунку згинаючих та крутних моментів в площині YZ (рис. 2, 3) розглянемо проекції цих моментів на площину YZ, які дорівнюють:

$$M_{з(yz)} = Pb \sin(\alpha - \varphi) = PR \sin \varphi \sin(\alpha - \varphi) \quad (7)$$

$$M_{кр(yz)} = Pa \cos(\alpha - \varphi) = PR(1 - \cos \varphi) \cos(\alpha - \varphi) \quad (8)$$

Результати аналізу практичних розрахунків свідчать, що величина дотичних напружень від дії поперечних сил незначна, тому надалі у розрахунках величиною даних дотичних напружень можна знехтувати.

У випадку згину в двох площинах нормальні напруження в довільній точці поперечного перерізу визначаються з формули [4]:

в площині XY :

$$\sigma_x = \frac{M_{з(xy)}}{0,5W_\rho} \quad (9)$$

в площині YZ :

$$\sigma_z = \frac{M_{з(yz)}}{0,5W_\rho} \quad (10)$$

де  $W_\rho$  - полярний момент опору кільцевого поперечного перерізу дугового елемента.

$$W_\rho = \frac{\pi}{16D} (D^4 - d^4) \quad (11)$$

де:  $D$  - зовнішній діаметр труби дугового елемента трубопроводу,

$d$  - внутрішній діаметр труби дугового елемента трубопроводу.

Визначимо переміщення дугової ділянки трубопроводу в напрямку дії сили  $P$  залежно від діючих нормальних напружень в площині XY, враховуючи формули (4), (5), (9):

$$\Delta = \frac{0,5 \cdot \sigma_x \cdot W_\rho \cdot R^2}{E \cdot I \sin \varphi \cos(\alpha - \varphi)} \cdot \frac{2,45\alpha + 0,15 \sin \alpha \cos \alpha - 2,6 \sin \alpha}{E \cdot I \sin \varphi \cos(\alpha - \varphi)} \quad (12)$$

Визначимо переміщення дугової ділянки трубопроводу в напрямку дії сили  $P$  залежно від діючих нормальних напружень в площині YZ, враховуючи формули (4), (7), (10):

$$\Delta = \frac{0,5 \cdot \sigma_z \cdot W_\rho}{E \cdot I \cdot \sin \varphi \sin(\alpha - \varphi)} \cdot \frac{R^2 (2,45\alpha + 0,15 \sin \alpha \cos \alpha - 2,6 \sin \alpha)}{E \cdot I \cdot \sin \varphi \sin(\alpha - \varphi)} \quad (13)$$

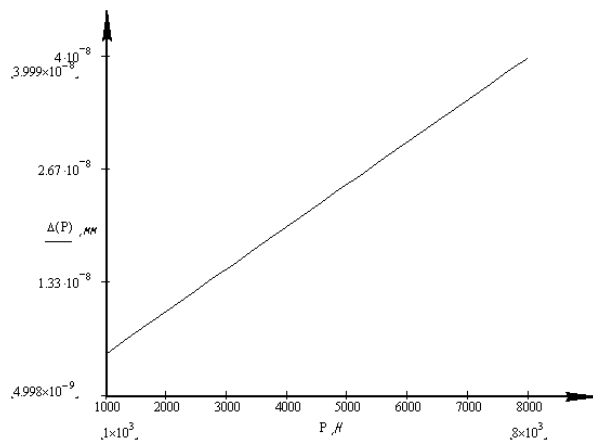


Рисунок 4 – Залежність переміщення дугової ділянки трубопроводу від дії прикладеного зусилля  $P$

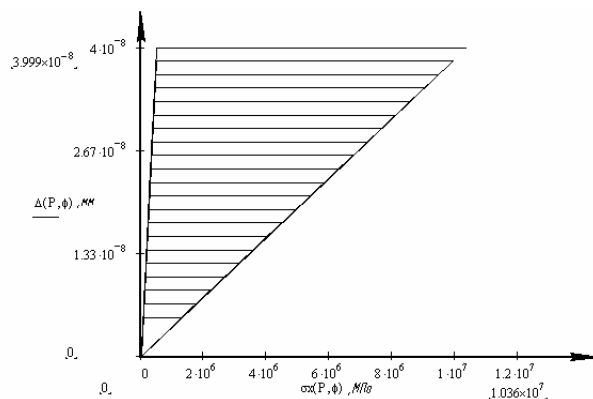


Рисунок 5 – Залежність величини переміщення дугової ділянки трубопроводу  $\Delta(P, \varphi)$ , мм від величини нормальних напружень  $\sigma_x(P, \varphi)$ , Па

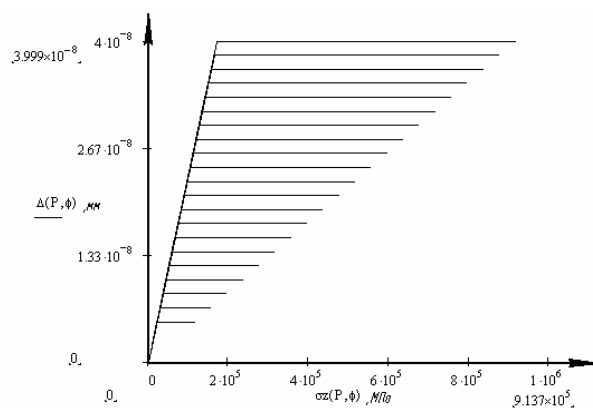


Рисунок 6 – Залежність величини переміщення дугової ділянки трубопроводу  $\Delta(P, \varphi)$ , мм від величини нормальних напружень  $\sigma_z(P, \varphi)$ , Па

Дотичні напруження від дії крутного моменту в двох площинах XY та YZ сумуються геометрично. Дотичні напруження в площині XY від дії крутного моменту визначаємо за формулою [4]:

$$\tau_{xy} = \frac{M_{kp(xy)}}{W_{\rho}}, \quad (14)$$

дотичні напруження в площині YZ від дії крутного моменту:

$$\tau_{yz} = \frac{M_{kp(yz)}}{W_{\rho}}. \quad (15)$$

Визначимо переміщення дугової ділянки трубопроводу в залежності від діючих дотичних напружень в площині XY, враховуючи формули (4), (6), (14):

$$\Delta = \frac{\tau_{xy} \cdot W_{\rho} \cdot R^2 (2,45\alpha + 0,15 \sin \alpha \cos \alpha - 2,6 \sin \alpha)}{E \cdot I (1 - \cos \phi) \sin(\alpha - \phi)}, \quad (16)$$

Визначимо переміщення дугової ділянки трубопроводу залежно від діючих дотичних напружень в площині YZ, враховуючи формули (4), (8), (15):

$$\Delta = \frac{\tau_{yz} \cdot W_{\rho} \cdot R^2 (2,45\alpha + 0,15 \sin \alpha \cos \alpha - 2,6 \sin \alpha)}{E \cdot I (1 - \cos \phi) \cos(\alpha - \phi)}. \quad (17)$$

На основі загальних фізичних міркувань можна стверджувати, що фізичним параметром, який відповідає величині фактичних напружень в досліджуваному металі, є швидкість або час поширення ультразвукової хвилі. В напрямку кожної з координатних осей можуть розповсюджуватися три незалежні об'ємні хвилі: одна поздовжня і дві поперечні (зсувні) з різними швидкостями і взаємно ортогональними поляризаціями [5].

$$\delta V_{ik} = f(\sigma_{ln}), \quad (18)$$

де:  $\delta V_{ik}$  – відносна зміна швидкості розповсюдження ультразвукової хвилі;

$\sigma_{ln}$  – напруження;

індекс  $i$  характеризує напрям розповсюдження ультразвукової хвилі;

індекс  $k$  характеризує напрям поляризації ультразвукової хвилі.

$$\delta V_{ik} = \begin{cases} \frac{V_{ik} - V_{ik}^0}{V_l} = \frac{\Delta V_{ik}}{V_l}, i = k, V_{ik}^0 = V_l \\ \frac{V_{ik} - V_{ik}^0}{V_t} = \frac{\Delta V_{ik}}{V_t}, i \neq k, V_{ik}^0 = V_t \end{cases}, \quad (19)$$

де:  $V_{ik}$  – матриця швидкостей розповсюдження ультразвукової хвилі в напруженому середовищі;

$V_{ik}^0$  – матриця швидкостей розповсюдження ультразвукової хвилі в ненапруженому середовищі;

$V_l$  – швидкість поздовжніх ультразвукових хвиль в ненапруженому середовищі;

$V_t$  – швидкість поперечних ультразвукових хвиль в ненапруженому середовищі.

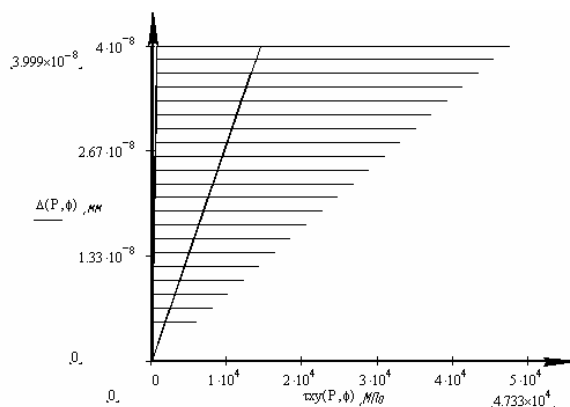


Рисунок 7 – Залежність величини переміщення дугової ділянки трубопроводу  $\Delta(P, \phi)$ , мм від величини дотичних напружень  $\tau_{xy}(P, \phi)$ , Па

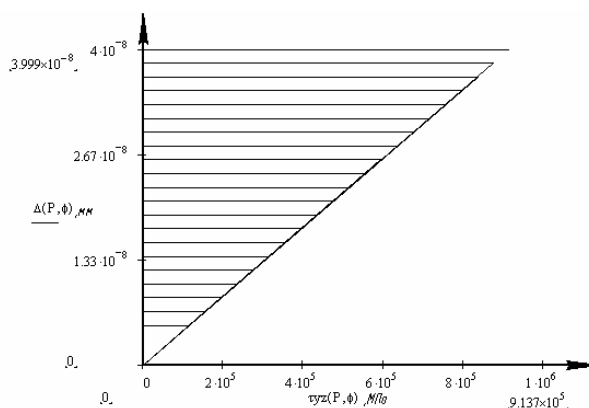


Рисунок 8 – Залежність величини переміщення дугової ділянки трубопроводу  $\Delta(P, \phi)$ , мм від величини дотичних напружень  $\tau_{yz}(P, \phi)$ , Па

Введемо позначення для матриці 4-го рангу ізотермічних лінійних акустопружних коефіцієнтів швидкості [5] та, показавши рівняння (18) у диференціальній формі, отримаємо:

$$d(\delta V_{ik}) = \beta_{ik \ln} d\sigma_{ln}, \quad (20)$$

де  $\beta_{ik \ln}$  – матриця акустопружних коефіцієнтів.

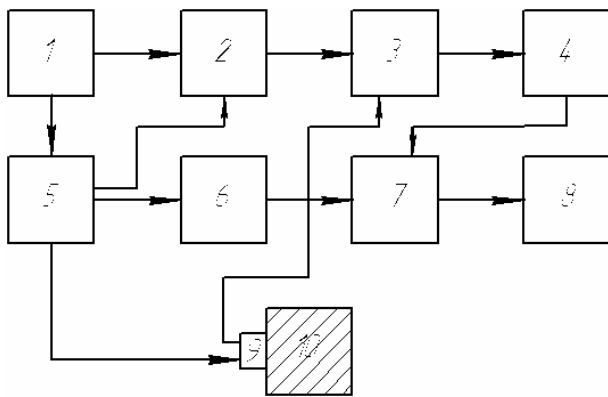
Припустивши компоненти матриці акустопружних коефіцієнтів постійними для даного середовища, проінтегруємо (20) в лінійному наближенні:

$$\delta V_{ik} = \beta_{ik \ln} (\sigma_{ln} - \sigma_{ln}^0), \quad (21)$$

де  $\sigma_{ln}^0$  – тензор початкових напружень.

Для визначення швидкості поширення ультразвуку розроблено електронний пристрій, зображений на рисунку 9, на який отримано позитивне рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель №2008 00077 від 21.03.2008 р.

Для проведення розрахунків використовувались початкові дані:  $P = 1000\text{Н}, 1350\text{Н}, \dots, 8000\text{Н}$ ;  $R = 115\text{м}$ ;  $\phi = 0, 1^0, \dots, 20^0$ ;  $D = 1,420\text{м}$ ;  $\delta = 0,2\text{м}$ ;  $p = 6 \cdot 10^6\text{Па}$ ;  $\alpha = 20^0$ .



1 – блок синхронізації; 2 – блок комутації;  
3 – блок підсилення; 4 – блок формування  
одиночних імпульсів; 5 – генератор зондуючих  
імпульсів; 6 – формувач імпульсів вимірювання  
інтервалу часу; 7 – блок формувача кінцевого  
відліку; 8 – таймер; 9 – п'єзоелектричний  
перетворювач; 10 – об'єкт контролю

**Рисунок 9 – Функціональна схема  
ультразвукового пристрою**

**Висновок:** розроблено математичну модель для визначення величини переміщень дугової ділянки трубопроводу під дією експлуатаційних навантажень. Визначивши ультразвуковим методом значення дійсних напружень в перерізах трубопроводу, можна робити висновок щодо проведення ремонтних робіт і можливої величини переміщень трубопроводу. Із рисунків 4, 5, 6, 7, 8 для вибраних умов навантаження встановлено залежності величини переміщення дугової ділянки трубопроводу  $\Delta(P, \varphi)$  від напружень, які виникають на розглядуваній ділянці трубопроводу, що знаходиться під дією сили  $P$ . Кількість ліній на графіках вказує на вибір різних початкових значень сили  $P$  при побудові графіків залежності величини переміщень від величини напружень та кутової координати  $\varphi$  дугової ділянки трубопроводу.

За кута  $\varphi = 20^0$  величина переміщення  $\Delta(P, \varphi)$  зростає у випадку зростання величини напружень  $\tau_{xy}(P, \varphi)$  від 0 до  $1,4 \cdot 10^4$  Па, а далі у разі зростання дотичних напружень  $\tau_{xy}(P, \varphi)$  залишається сталою. Проте за значень кута  $\varphi$  від 0 до  $19^0$  величина переміщення  $\Delta(P, \varphi)$  зростає у випадку зростання величини напружень  $\tau_{xy}(P, \varphi)$  від 0 до  $1 \cdot 10^3$  Па, а далі у разі зростання величини напруження  $\tau_{xy}(P, \varphi)$  залишається сталою, тобто не залежить від зміни кута  $\varphi$ . Величина напружень  $\tau_{yz}(P, \varphi)$  не впливає на величину переміщень дугової ділянки трубопроводу. Величина переміщення  $\Delta(P, \varphi)$  зростає у випадку зростання

величини напружень  $\sigma_x(P, \varphi)$  від 0 до  $0,5 \cdot 10^6$  Па, а далі у разі зростання  $\sigma_x(P, \varphi)$  величина переміщення залишається сталою, тобто не залежить від зміни кута  $\varphi$ . У випадку зростання величини напружень  $\sigma_z(P, \varphi)$  від 0 до  $1,8 \cdot 10^5$  Па, величина переміщення  $\Delta(P, \varphi)$  зростає, а далі у разі зростання величини напружень  $\sigma_z(P, \varphi)$  переміщення  $\Delta(P, \varphi)$  залишається сталою, тобто не залежить від зміни кута  $\varphi$ .

### Література

- 1 Юргенсон Х. Гибкость и прочность трубопроводов. – М.: Высшая школа, 1959. – 273 с.
- 2 Лютак З.П., Семенен М.М. Векторне визначення напружень ремонтних ділянок магістральних газопроводів // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції „Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці” „ІФНТУНГ-40”. – Івано-Франківськ, 16-20 квітня 2007 р. – С. 27.
- 3 Семенен М.М., Лютак З.П. Визначення напружено-деформованого стану дугових елементів в просторових системах трубопроводів на ремонтних ділянках // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2007. – №2(16). – С. 170-178.
- 4 Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1969. – 734 с.
- 5 Бобренко В.М., Вангели М.С. Акустическая тензометрия. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 204 с.