

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВОДІВ, ЯКІ ПІДДАЮТЬСЯ ВПЛИВУ ЗСУВНОГО МАСИВУ ҐРУНТУ НА ПОПЕРЕЧНИХ СХИЛАХ

Т. Ю. Пиріг, М. С. Карабінович

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел.: +380995432884, e-mail: taras.pyrih@nung.edu.ua

Інженерна підготовка траси в гірських умовах включає заходи, виконання яких дає можливість проводити основні види лінійних робіт строго за графіком з оптимальними витратами праці і матеріалів та використанням необхідних машин і механізмів. До них відносяться проведення протиобвальних і протизсувних заходів, розчищення траси від лісу та чагарнику, влаштування полиць і виїмок, тимчасових з'їздів з основних доріг та під'їздів до траси, ремонт і посилення існуючих дорожніх покриттів, мостів та переїздів, влаштування водопропускних і водовідвідних споруд, проміжних майданчиків для складування та монтажу труб, а також будівництво переходів через малі річки, струмки і яри.

Для правильного вирішення питань, які входять до складу інженерної підготовки траси, в проекті організації будівництва, який видається проектним інститутом у складі технічного проекту, повинні обов'язково враховуватися матеріали обстеження траси в натурі. Обстеження необхідно проводити до випуску робочих креслень спільно з будівельними організаціями. В матеріалах обстеження повинні бути визначені оптимальні транспортні схеми з доставки на трасу труб, матеріалів і важкої будівельної техніки, обсяги та методи виконання робіт з проведення протиобвальних і протизсувних явищ, обсяги та витрати, пов'язані з реконструкцією існуючих доріг і мостів, а також спорудженням під'їзних доріг та водопропускних пристроїв на них, обсяги і витрати, пов'язані з будівництвом монтажних та складських майданчиків конкретно для кожної складної ділянки траси з підйомом і спуском, а також методи виконання робіт на цих ділянках траси.

Ключові слова: *гірські умови, поперечний схил, зсувний масив ґрунту, напружено-деформований стан трубопроводу, поздовжнє розтягуюче зусилля, стріла прогину трубопроводу посередині прогону, додаткові поздовжні напруження, спричинені дією зсуву.*

Вступ. Як показала практика будівництва магістральних трубопроводів в гірських умовах, комплекс робіт з інженерної підготовки траси повинні проводити виключно спеціалізовані бригади, оснащені не-

обхідною технікою [1]. При виявленні обвальних або зсувних явищ на трасі необхідно будувати нагірні водовідвідні канали, перепускні лотки і швидкотоки, а також проводити прибирання навислих козирків та окремих кам'яних мас [2, 3].

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є аналіз силового впливу зсуву ґрунту на трубопровід, коли переміщення ґрунту, який перейшов в граничний стан, відбуваються одночасно вздовж всього схилу. Завданням дослідження є розрахунок параметрів напружено-деформованого стану трубопроводу, який піддається впливу зсуву ґрунту на поперечному схилі, для різних значень зовнішнього діаметра D_0 .

Основна частина. Як показує практика експлуатації, трубопроводи, прокладені в гірських умовах, часто виявляються розташованими в зсувних масивах [4-6]. Розглянемо випадок силового впливу зсуву ґрунту на трубопровід на поперечному схилі. Нехай трубопровід прокладений в зсувному масиві на ділянці довжиною l (рис. 1). Силовий вплив ґрунту [7]

$$q_{3c} = \frac{4\pi\nu_{3c}\eta}{2 - \ln \text{Re}}, \quad (1)$$

де U_{zc} – швидкість руху зсувного масиву; η – динамічна в'язкість ґрунту; Re – число Рейнольдса.

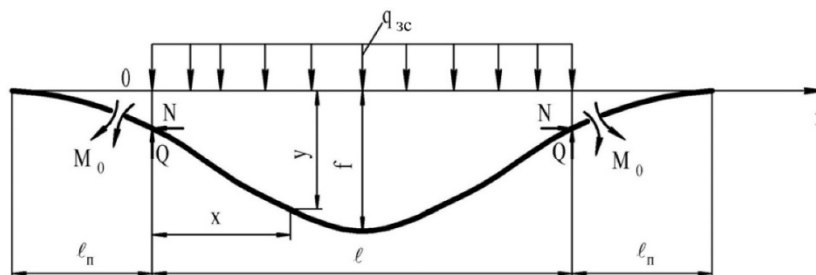


Рис. 1. Розрахункова схема при зсувних переміщеннях ґрунту на поперечних схилах

Швидкість руху зсувного масиву (рис. 2) [8]

$$v_{3c} = \frac{\gamma_{cp}}{\eta} \left(Hy - \frac{y^2}{2} \right) (\sin \alpha_\kappa - \cos \alpha_\kappa \operatorname{tg} \phi_{cp}) - \frac{c_{cp} y}{\eta}, \quad (2)$$

де γ_{cp} – питома вага ґрунту; H – висота зсувного масиву; y – відстань від підосви ковзання до осі трубопроводу; α_{κ} – поперечний нахил косогірної ділянки; ϕ_{cp} – кут внутрішнього тертя ґрунту; c_{cp} – зчеплення ґрунту.

Число Рейнольдса визначається за формулою:

$$\text{Re} = \frac{v_{3c} D_3}{\nu}, \quad (3)$$

де V – кінематична в'язкість.

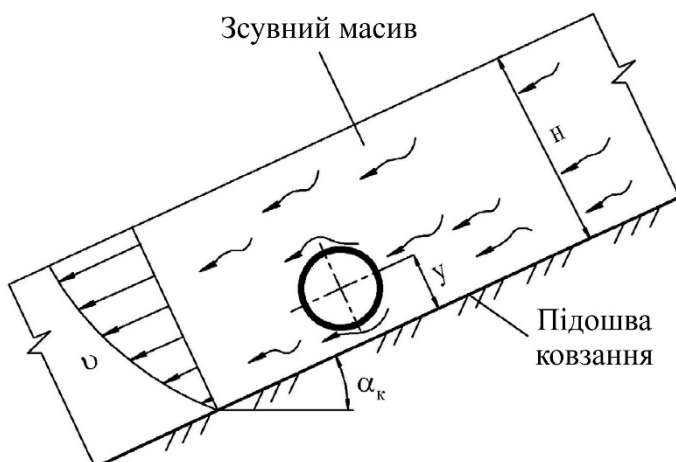


Рис. 2. Схема розташування трубопроводу в зсувному масиві на поперечному схилі

Кінематична в'язкість розраховується за формулою:

$$\nu = \frac{\eta g}{\gamma_{ep}}. \quad (4)$$

Як показали лабораторні дослідження глинистих ґрунтів (супіски, суглинки, глини), величина η змінюється в межах $1 \cdot 10^4 - 9 \cdot 10^7 \text{ МПа} \cdot \text{с}$. Спостереження за зсувами ґрунтів показали, що при $\eta < 1 - 9 \cdot 10^4 \text{ МПа} \cdot \text{с}$ відбувається проковзування всього зсувного масиву по підстилаючому ґрунту.

Значення фактичного поздовжнього розтягуючого зусилля P знаходять, використовуючи залежності, які визначають стрілу прогину трубопроводу посередині прогону:

- під дією силових факторів [9]

$$f = \frac{q_{zc} l^2}{8P} - \left(\frac{M_0}{P} + \frac{q_{zc}}{k^2 P} \right) \frac{ch\left(\frac{kl}{2}\right) - 1}{ch\left(\frac{kl}{2}\right)} + w_0, \quad (5)$$

де M_0 , w_0 – згинальний момент і прогин в початковому та кінцевому перерізах ділянки трубопроводу на схилі, яка піддається силовому впливу зсувного масиву ґрунту, відповідно (в перерізах $x = 0$ і $x = l$); k – коефіцієнт, який дорівнює:

$$k = \sqrt{\frac{P}{EI}}, \quad (6)$$

E – модуль пружності матеріалу труби; I – осьовий момент інерції поперечного перерізу труби;

- на основі геометрії пружнозігнутого трубопроводу [10]

$$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{Pl^2}{EF} + l(2u_0 + u_{cl})}, \quad (7)$$

де F – площа поперечного перерізу труби; u_0 – поздовжнє переміщення кінців прилеглих ділянок трубопроводу довжиною l_n під дією зусилля P ; u_{cl} – видовження ділянки трубопроводу довжиною l за рахунок “слабини” (1–1,5 см на кожні 100 м довжини трубопроводу).

Згинальний момент і прогин в початковому та кінцевому перерізах ділянки трубопроводу на схилі, яка піддається силовому впливу зсувного масиву ґрунту, відповідно дорівнюють:

$$M_0 = \frac{q_{zc} \left(\frac{l}{2P} - \frac{\alpha^2 l}{k_0 D_3} - \frac{1}{kP} \operatorname{th} \left(\frac{kl}{2} \right) \right)}{\frac{4\alpha^3}{k_0 D_3} + \frac{k}{P} \operatorname{th} \left(\frac{kl}{2} \right)}, \quad (8)$$

$$w_0 = \frac{2\alpha}{k_0 D_3} \left(\frac{q_{zc} l}{2} + \alpha M_0 \right), \quad (9)$$

де α – коефіцієнт, який дорівнює:

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{k_0 D_3}{4EI}}, \quad (10)$$

k_0 – коефіцієнт нормального опору ґрунту (коефіцієнт постелі ґрунту при стиску).

Поздовжнє переміщення кінців прилеглих ділянок трубопроводу довжиною l_n під дією зусилля P визначається залежно від характеру взаємодії трубопроводу з ґрунтом:

- при пружному зв'язку

$$u_0 = \frac{P}{\beta EF}, \quad (11)$$

де β – коефіцієнт, який дорівнює:

$$\beta = \sqrt{\frac{\pi D_3 k_u}{EF}}, \quad (12)$$

k_u – коефіцієнт опору ґрунту при поздовжньому переміщенні трубопроводу (коефіцієнт постелі ґрунту при зсуві);

- при пружнопластичному зв'язку

$$u_0 = \frac{\tau_{cp}}{k_u} + \frac{P^2 - P_{cp}^2}{2\pi D_3 \tau_{cp} EF}, \quad (13)$$

де τ_{cp} – граничні дотичні напруження по контакту трубопроводу з ґрунтом; P_{cp} – граничне зусилля, при якому пружний зв'язок переходить в пружнопластичний.

Граничне зусилля, при якому пружний зв'язок переходить в пружнопластичний, визначається за формулою:

$$P_{ep} = \frac{\beta E F \tau_{ep}}{k_u}. \quad (14)$$

Задаючись декількома значеннями поздовжнього розтягуючого зусилля P , визначають прогини трубопроводу посередині прогону за формулами (5) і (7). За результатами розрахунку будують графіки залежності $f(P)$, точка перетину яких визначає фактичні значення прогину f_ϕ і зусилля P_ϕ . Після цього визначають згинальний момент M_0 за формулою (8) і згинальний момент M_c посередині прогону трубопроводу (в перерізі $x = \frac{l}{2}$) за формулою:

$$M_c = \left(M_0 + \frac{q_{zc}}{k^2} \right) \frac{1}{ch\left(\frac{kl}{2}\right)} - \frac{q_{zc}}{k^2}. \quad (15)$$

Для безвідмовної роботи трубопроводу перевірку його міцності в поздовжньому напрямку необхідно виконувати з урахуванням додаткових поздовжніх напружень, спричинених дією зсуву [11]:

- в перерізах $x = 0$ і $x = l$

$$\sigma_{zc} = \frac{P_\phi}{F} \pm \frac{M_0}{W}, \quad (16)$$

де W – осьовий момент опору поперечного перерізу труби;

- в перерізі $x = \frac{l}{2}$

$$\sigma_{zc} = \frac{P_\phi}{F} \pm \frac{M_c}{W}. \quad (17)$$

Проведемо розрахунок напружено-деформованого стану гіпотетичного трубопроводу, який піддається впливу зсуву ґрунту на поперечному схилі. Вихідні дані для розрахунку: зовнішній діаметр нафтопроводу $D_3 = 530$ мм; номінальна товщина стінки нафтопроводу $\delta_n = 5,9$ мм; модуль пружності матеріалу труби $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; площа поперечного перерізу труби $F = 0,0097$ м²; осьовий момент інерції поперечного перерізу труби $I = 0,000333$ м⁴; осьовий момент опору поперечного перерізу труби $W = 0,00126$ м³; питома вага ґрунту $\gamma_{ep} = 22 \frac{\kappa H}{м^3}$; кут внутрішнього тертя ґрунту $\phi_{ep} = 15^\circ$; зчеплення ґрунту $c_{ep} = 12$ кПа; динамічна в'язкість ґрунту $\eta = 9000$ МПа·с; коефіцієнт

постелі ґрунту при стиску $k_0 = 15 \frac{MN}{M^3}$; коефіцієнт постелі ґрунту при зсуві $k_u = 8 \frac{MN}{M^3}$; коефіцієнт надійності по навантаженню від ваги ґрунту $n_{ep} = 0,8$; висота шару засипання ґрунту від верхньої твірної трубопроводу до денної поверхні $h_3 = 0,6 \text{ м}$; навантаження від власної ваги одиниці довжини ізолюваного трубопроводу з транспортованим продуктом $q_{mp} = 2422 \frac{H}{M}$; середній питомий тиск ґрунту на одиницю поверхні контакту трубопроводу з ґрунтом $p_{ep} = 14626 \text{ Па}$; граничні дотичні напруження по контакту трубопроводу з ґрунтом $\tau_{ep} = 15917 \text{ Па}$; довжина ділянки трубопроводу в зсувному масиві $l = 135 \text{ м}$; висота зсувного масиву $H = 5,5 \text{ м}$; відстань від підоснови ковзання до осі трубопроводу $y = 4,635 \text{ м}$; кут нахилу косогору $\alpha_k = 25^\circ$; видовження ділянки трубопроводу за рахунок “слабини” $u_{cl} = 0,015 \text{ м}$.

1. Швидкість руху зсувного масиву за формулою (2):

$$v_{zc} = \frac{22 \cdot 10^3}{9000 \cdot 10^6} \left(5,5 \cdot 4,635 - \frac{4,635^2}{2} \right) (\sin 25^\circ - \cos 25^\circ \cdot \operatorname{tg} 15^\circ) - \frac{12 \cdot 10^3 \cdot 4,635}{9000 \cdot 10^6} = 2,988 \cdot 10^{-7} \frac{M}{c}.$$

Якщо перевести величину швидкості руху зсувного масиву в m за рік, то вона складе $9,42 \frac{m}{\text{рік}}$.

2. Кінематична в'язкість ґрунту за формулою (4):

$$\nu = \frac{9000 \cdot 10^6 \cdot 9,81}{22 \cdot 10^3} = 4013182 \frac{M^2}{c}.$$

3. Число Рейнольдса за формулою (3):

$$\operatorname{Re} = \frac{2,988 \cdot 10^{-7} \cdot 0,53}{4013182} = 3,945 \cdot 10^{-14}.$$

4. Силловий вплив зсувного масиву ґрунту за формулою (1):

$$q_{zc} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 2,988 \cdot 10^{-7} \cdot 9000 \cdot 10^6}{2 - \ln 3,945 \cdot 10^{-14}} = 1028 \frac{H}{M}.$$

5. Коефіцієнт β за формулою (12):

$$\beta = \sqrt{\frac{\pi \cdot 0,53 \cdot 8 \cdot 10^6}{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,0097}} = 0,0808 \frac{1}{M}.$$

6. Граничне зусилля, при якому пружний зв'язок переходить в пружнопластичний, за формулою (14):

$$P_{cp} = \frac{0,0808 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,0097 \cdot 15917}{8 \cdot 10^6} = 327650 \text{ Н}.$$

7. Коефіцієнт α за формулою (10):

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{15 \cdot 10^6 \cdot 0,53}{4 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,000333}} = 0,4106 \frac{1}{\text{м}}.$$

8. Задамося декількома значеннями поздовжнього розтягуючого зусилля P , рівними 0,2, 0,7 та 1,2 МН, і визначимо прогини трубопроводу посередині прогону за формулами (5) та (7). Спочатку проведемо розрахунки при $P = 0,2 \text{ МН}$.

9. Коефіцієнт k за формулою (6):

$$k = \sqrt{\frac{0,2 \cdot 10^6}{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,000333}} = 0,0535 \frac{1}{\text{м}}.$$

10. Згинальний момент в початковому та кінцевому перерізах ділянки трубопроводу на схилі, яка піддається силовому впливу зсувного масиву ґрунту, за формулою (8):

$$M_0 = \frac{1028 \cdot \left(\frac{135}{2 \cdot 0,2 \cdot 10^6} - \frac{0,4106^2 \cdot 135}{15 \cdot 10^6 \cdot 0,53} - \frac{1}{0,0535 \cdot 0,2 \cdot 10^6} \operatorname{th} \left(\frac{0,0535 \cdot 135}{2} \right) \right)}{\frac{4 \cdot 0,4106^3}{15 \cdot 10^6 \cdot 0,53} + \frac{0,0535}{0,2 \cdot 10^6} \operatorname{th} \left(\frac{0,0535 \cdot 135}{2} \right)} = 821453 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

11. Прогин в початковому та кінцевому перерізах ділянки трубопроводу на схилі, яка піддається силовому впливу зсувного масиву ґрунту, за формулою (9):

$$w_0 = \frac{2 \cdot 0,4106}{15 \cdot 10^6 \cdot 0,53} \left(\frac{1028 \cdot 135}{2} + 0,4106 \cdot 821453 \right) = 0,042 \text{ м}.$$

12. Стріла прогину трубопроводу посередині прогону під дією силових факторів за формулою (5):

$$f = \frac{1028 \cdot 135^2}{8 \cdot 0,2 \cdot 10^6} - \left(\frac{821453}{0,2 \cdot 10^6} + \frac{1028}{0,0535^2 \cdot 0,2 \cdot 10^6} \right) \frac{\operatorname{ch} \left(\frac{0,0535 \cdot 135}{2} \right) - 1}{\operatorname{ch} \left(\frac{0,0535 \cdot 135}{2} \right)} + 0,042 = 6,163 \text{ м}.$$

13. Оскільки прийняте зусилля $P = 200000 \text{ Н}$ менше $P_{cp} = 327650 \text{ Н}$, то зв'язок між трубопроводом і ґрунтом є пружним. В такому випадку поздовжнє переміщення кінців прилеглих ділянок тру-

бопроводу довжиною l_n під дією зусилля P визначаємо за формулою (11):

$$u_0 = \frac{0,2 \cdot 10^6}{0,0808 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,0097} = 0,00121 \text{ м.}$$

14. Стріла прогину трубопроводу посередині прогону на основі геометрії пружнозигнутого трубопроводу за формулою (7):

$$f = \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{0,2 \cdot 10^6 \cdot 135^2}{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,0097}} + 135 \cdot (2 \cdot 0,00121 + 0,015) = 1,296 \text{ м.}$$

15. Аналогічним чином розраховуємо параметри при $P = 0,7 \text{ МН}$ і $P = 1,2 \text{ МН}$ (табл. 1).

Таблиця 1. Параметри напружено-деформованого стану трубопроводу, який піддається впливу зсуву ґрунту на поперечному схилі, для різних значень поздовжнього розтягуючого зусилля P

$P, \text{ МН}$	$k, \frac{1}{\text{м}}$	$M_0, \text{ Н} \cdot \text{м}$	$w_0, \text{ м}$	f за формулою (5), м	$u_0, \text{ м}$	f за формулою (7), м
0,2	0,0535	821453	0,042	6,163	0,00121	1,296
0,7	0,1001	458360	0,0266	2,571	0,00554	1,992
1,2	0,131	335603	0,0214	1,643	0,01434	2,598

16. За результатами розрахунку будуємо графіки залежності прогину трубопроводу посередині прогону f від поздовжнього розтягуючого зусилля P (рис. 3), за точкою перетину яких визначаємо фактичні значення прогину $f_\phi = 2,2 \text{ м}$ і зусилля $P_\phi = 0,82 \text{ МН}$.

17. Коефіцієнт k за формулою (6):

$$k = \sqrt{\frac{0,82 \cdot 10^6}{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,000333}} = 0,1083 \frac{1}{\text{м}}.$$

18. Згинальний момент в початковому та кінцевому перерізах ділянки трубопроводу на схилі, яка піддається силовому впливу зсувного масиву ґрунту, за формулою (8):

$$M_0 = \frac{1028 \cdot \left(\frac{135}{2 \cdot 0,82 \cdot 10^6} - \frac{0,4106^2 \cdot 135}{15 \cdot 10^6 \cdot 0,53} - \frac{1}{0,1083 \cdot 0,82 \cdot 10^6} \operatorname{th} \left(\frac{0,1083 \cdot 135}{2} \right) \right)}{\frac{4 \cdot 0,4106^3}{15 \cdot 10^6 \cdot 0,53} + \frac{0,1083}{0,82 \cdot 10^6} \operatorname{th} \left(\frac{0,1083 \cdot 135}{2} \right)} = 419901 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

19. Згинальний момент посередині прогону трубопроводу (в перерізі $x = \frac{l}{2}$) за формулою (15):

$$M_c = \left(419901 + \frac{1028}{0,1083^2} \right) \frac{1}{ch\left(\frac{0,1083 \cdot 135}{2}\right)} - \frac{1028}{0,1083^2} = -86956 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

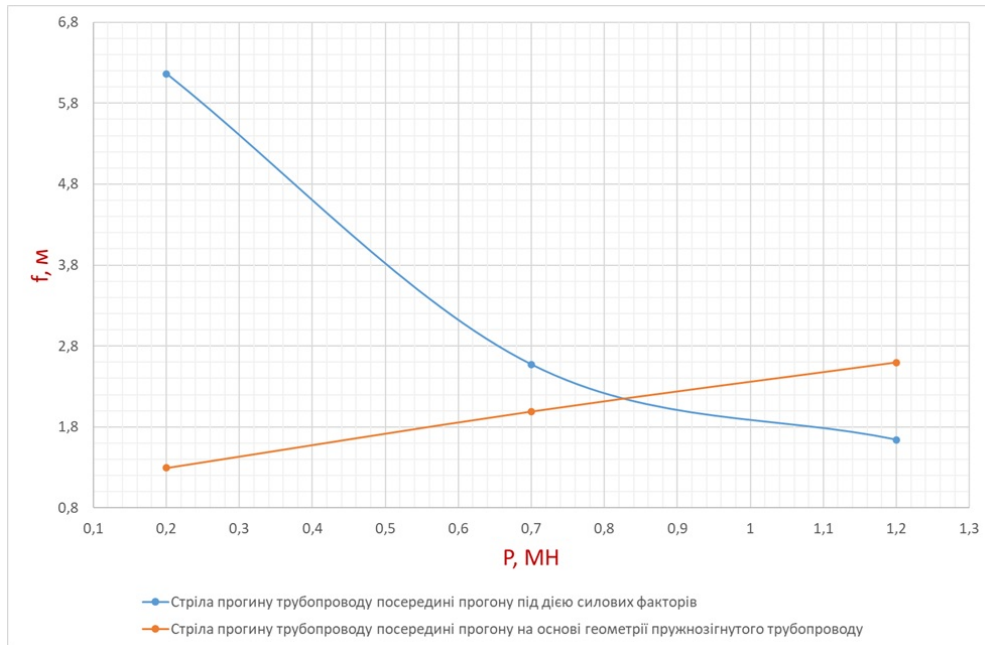


Рис. 3. Визначення фактичних значень прогину f_ϕ і зусилля P_ϕ

20. Додаткові поздовжні напруження в перерізах $x=0$ і $x=l$, спричинені дією зсуву, за формулою (16):

$$\sigma_{zc} = \frac{0,82 \cdot 10^6}{0,0097} + \frac{419901}{0,00126} = 418 \text{ МПа}.$$

21. Додаткові поздовжні напруження в перерізі $x = \frac{l}{2}$, спричинені дією зсуву, за формулою (17):

$$\sigma_{zc} = \frac{0,82 \cdot 10^6}{0,0097} + \frac{86956}{0,00126} = 154 \text{ МПа}.$$

Параметри напружено-деформованого стану трубопроводу, який піддається впливу зсуву ґрунту на поперечному схилі, для різних значень зовнішнього діаметра нафтопроводу D_3 подано в табл. 2. Залежності фактичного прогину f_ϕ , фактичного зусилля P_ϕ і додаткових поздовжніх напружень, спричинених дією зсуву, σ_{zc} від діаметра трубопроводу D_3 наведено на рис. 4-6.

Таблиця 2. Параметри напружено-деформованого стану трубопроводу, який піддається впливу зсуву ґрунту на поперечному схилі, для різних значень зовнішнього діаметра нафтопроводу D_3

D_3 , мм	f_ϕ , м	P_ϕ , МН	k , $\frac{1}{м}$	M_0 , $H \cdot м$	M_c , $H \cdot м$	σ_{3c} в перерізах $x=0$ і $x=l$, МПа	σ_{3c} в перерізі $x=\frac{l}{2}$, МПа
530	2,2	0,82	0,1083	419901	-86956	418	154
720	1,5	0,78	0,0598	768491	-305769	315	154
820	1,36	0,74	0,0450	1039438	-484803	279	149
1020	1,24	0,68	0,0273	1813233	-977122	232	134
1220	1,14	0,52	0,0167	2761517	-1601565	200	120
1420	1,06	0,32	0,0098	3849309	-2317685	178	109

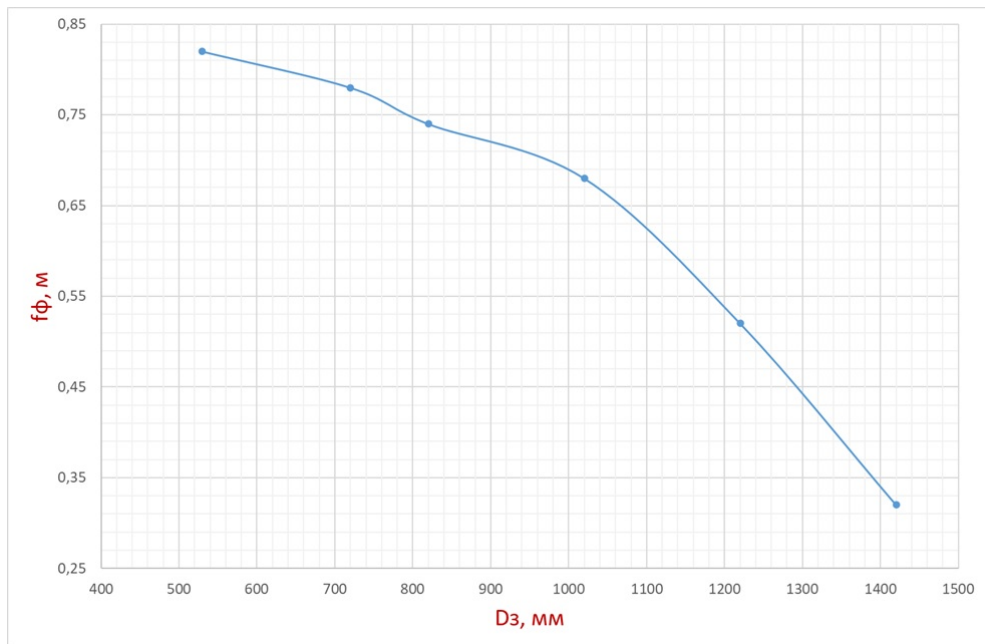


Рис. 4. Залежність фактичного прогину f_ϕ від діаметра трубопроводу D_3

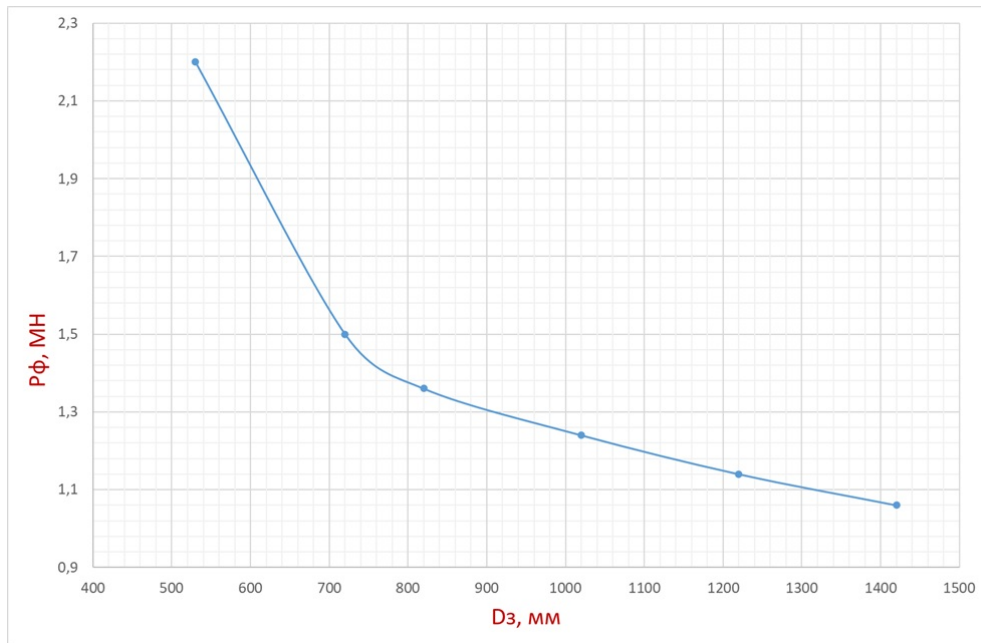


Рис. 5. Залежність фактичного зусилля P_ϕ від діаметра трубопроводу D_3

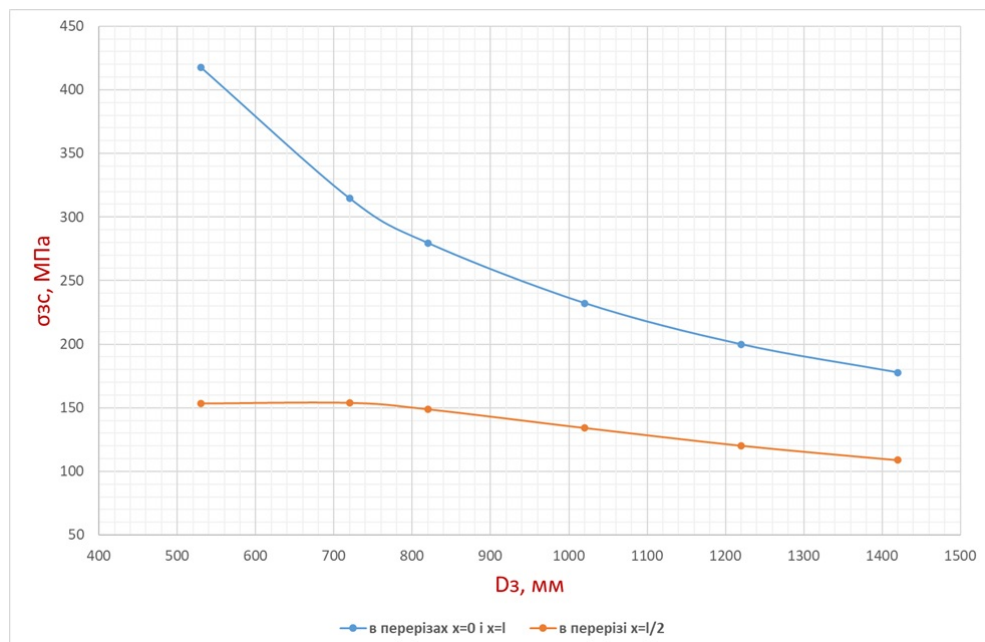


Рис. 6. Залежність додаткових поздовжніх напружень, спричинених дією зсуву, σ_{3c} від діаметра трубопроводу D_3

Висновок. За результатами проведених розрахунків встановлено залежності фактичної стріли прогину трубопроводу посередині прогону f_ϕ , фактичного поздовжнього розтягуючого зусилля P_ϕ і додаткових поздовжніх напружень, спричинених дією зсуву, σ_{zc} від діаметра трубопроводу D_z . Результати досліджень можуть бути використані при перевірці міцності в початковому та кінцевому перерізах і посередині прогону ділянки трубопроводу на схилі, яка піддається силовому впливу зсувного масиву ґрунту, в поздовжньому напрямку для його безвідмовної роботи.

Література

1. Kryzhanivskyi E. I., Rudko V. P., Shats'kyi I. P. Estimation of admissible loads upon a pipeline in the zone of sliding ground. *Materials Science*. 2004. Vol. 40, no. 4. P. 547-551.
2. Шацький І. П., Струк А. Б. Деформування підземного трубопроводу в місцях локального руйнування основи. *Доповіді Національної академії наук України*. 2009. № 12. С. 69-74.
3. Vazouras P., Karamanos S. A., Dakoulas P. Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2012. Vol. 41. P. 164-180.
4. Integrated Risk Assessment of Mountainous Long-Distance Oil and Gas Pipelines Based on Multisource Spatial Data / B. Wang et al. *ACS Omega*. 2024. Vol. 9, no. 28. P. 30492-30507.
5. Lee E. M., Fookes P. G., Hart A. B. Landslide issues associated with oil and gas pipelines in mountainous terrain. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 2016. Vol. 49, no. 2. P. 125-131.
6. Research on the Axial Stress Distribution Law of Mountain Pipeline Under the Action of Lateral Landslides / H. Chen et al. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2024. Vol. 60, no. 2. P. 344-365.
7. Terzaghi K., Peck R. B., Mesri G. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1996. 592 p.
8. Pudasaini S. P., Krautblatter M. The landslide velocity. *Earth Surface Dynamics*. 2022. Vol. 10, no. 2. P. 165-189.
9. Шваб'юк В. І. Опір матеріалів: підручник. Київ: Знання, 2016. 400 с.
10. Goodno B. J., Gere J. M. *Mechanics of Materials*. 9th ed. Boston: Cengage Learning, 2020. 1184 p.
11. Пиріг Т. Ю., Іванов О. В., Бурнасенков О. А. Розрахунок напруженого стану трубопроводів, які піддаються впливу зсуву ґрунту на поперечних схилах. *Ricerche scientifiche e metodi della loro realizzazione: esperienza mondiale e realtà domestiche*: зб. наук. пр. "ЛОГОС" з матеріалами V Міжнар. науково-практ. конф., м. Болонья, 26 квіт. 2024 р. Вінниця-Болонья, 2024. С. 213-217.

Стаття надійшла до редакційної колегії 05.06.2025 р.

RESEARCH OF THE STRESS-STRAIN STATE OF PIPELINES EXPOSED TO THE INFLUENCE OF LANDSLIDE MASSIF ON TRANSVERSE SLOPES

T. Yu. Pyrih, M. S. Karabinovych

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;

76019, Ivano-Frankivsk, Karpatska st., 15;

tel.: +380995432884, e-mail: taras.pyrih@nung.edu.ua

Engineering preparation of the route in mountainous conditions includes measures, the implementation of which makes it possible to carry out the main types of linear works strictly according to the schedule with optimal labor and material costs and the use of the necessary machines and mechanisms. These include the implementation of anti-landfall and anti-landslide measures, clearing the route from forest and bushes, arranging of shelves and notches, temporary exits from the main roads and entrances to the route, repairing and strengthening existing road surfaces, bridges and crossings, arranging of culverts and drainage structures, intermediate platforms for storage and installation of pipes, as well as construction of crossings over small rivers, streams and ravines.

In order to correctly solve the issues that are part of the engineering preparation of the route, the construction organization project, which is issued by the design institute as part of the technical project, must necessarily take into account the materials of the route survey in kind. The survey must be carried out before the release of working drawings in conjunction with construction organizations. The survey materials should determine the optimal transport schemes for the delivery of pipes, materials and heavy construction equipment to the route, the volumes and methods of work performance to prevent landfalls and landslides, the volumes and costs associated with the reconstruction of existing roads and bridges, as well as the construction of access roads and culverts on them, the volumes and costs associated with the construction of assembly and storage platforms specifically for each difficult section of the route with ascent and descent, as well as the methods of work performance on these sections of the route.

Key words: *mountainous conditions, transverse slope, landslide massif, stress-strain state of pipeline, longitudinal tensile force, pipeline deflection boom in the middle of the span, additional longitudinal stresses caused by shear action.*