

## ПОЗАШТАТНІ НАПРУЖЕННЯ У ПІДЗЕМНОМУ ТРУБОПРОВОДІ ВІД СТАТИЧНОГО ТА ДИНАМІЧНОГО РОЗВОРОТУ ДЕКІЛЬКОХ БЛОКІВ ОСНОВИ

*М. І. Васьковський<sup>1</sup>, А. Б. Струк<sup>2</sup>, М. В. Маковійчук<sup>3</sup>, І. П. Шацький<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>АТ “НАК “Нафтогаз України”; 01601, м. Київ, вул. Б. Хмельницького, 6, тел. (099) 658-60-01, e-mail: Vaskovskyi@naftogaz.com

<sup>2</sup>НВЦ технічної діагностики “Техдіагаз”; 76011, м. Івано-Франківськ, вул. Січинського, 3В, тел. (097)9313537, e-mail: andrij\_struk@ukr.net

<sup>3</sup>Івано-Франківський відділ Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України; 76002, м. Івано-Франківськ, вул. Микитинецька, 3, тел. (050)7832439, e-mail: makoviy@ua.fm, ipshatsky@gmail.com

Розглядаються питання прогнозування міцності підземних трубопроводів, які прокладені на сейсмоактивних територіях, через ділянки, складені з відносно жорстких рухливих блоків. У таких небезпечних зонах, окрім штатного навантаження тиском транспортованого продукту, труба зазнає додаткових впливів від рухів фрагментів блочної основи. Як показують літературні дані, задачі про вплив взаємодії розломів на напружений стан трубопроводу на сьогодні не досліджені. Метою роботи є розвиток моделі для аналізу позаштатних напружень у підземному трубопроводі на пошкодженій основі, спричинених статичними або гармонічними за часом взаємними розворотами блоків довкола осі труби обабіч декількох розломів. Статичну рівновагу та гармонічні коливання трубопроводу досліджували у лінійній постановці, моделюючи його стержнем з кільцевим поперечним перерізом. Інерцію транспортованого продукту не брали до уваги. Для розгляду питань граничної рівноваги труби використали безмоментну теорію оболонок та енергетичну теорію міцності. Грунтову засипку, що працює на зсув, розглядали як тонкий пружний прошарок Вінклера. Множинне пошкодження суцільної основи подається у вигляді кількох розломів, на яких має місце розрив кута повороту довкола осі труби. Сформулювали крайові задачі для диференціальних рівнянь статичного скруту та крутих гармонічних коливань з розривними правими частинами. На підставі аналітичних розв’язків цих задач для випадків антисиметричного та симетричного розвороту блоків основи досліджено розподіли кута закручування та еквівалентного напруження в трубі, залежні від віддалі між розломами та від частоти вимушених коливань системи.

Ключові слова: підземний трубопровід, статика, гармонічні коливання, напруження, взаємодія розломів, розворот блоків основи.

Рассматриваются вопросы прогнозирования прочности подземных трубопроводов, проложенных на сейсмоактивных территориях через участки, сложенные из относительно жестких подвижных блоков. В таких опасных зонах, кроме штатного нагружения давлением транспортируемого продукта, труба испытывает дополнительные воздействия от движений фрагментов блочного основания. Как показывают литературные данные, задачи о влиянии взаимодействия разломов на напряженное состояние трубопровода на сегодня не исследованы. Целью работы является развитие модели для анализа внештатных напряжений в подземном трубопроводе на поврежденной основе, вызванных статическими или гармоническими во времени взаимными разворотами блоков вокруг оси трубы вблизи нескольких разломов. Статическое равновесие и гармонические колебания трубопровода исследовали в линейной постановке, моделируя его стержнем с кольцевым поперечным сечением. Инерцию транспортируемого продукта не принимали во внимание. Для рассмотрения вопросов предельного равновесия трубы использовали безмоментную теорию оболочек и энергетическую теорию прочности. Грунтовую засыпку, работающую на сдвиг, рассматривали как тонкий упругий слой Винклера. Множественное повреждение сплошного основания представляется в виде нескольких разломов, на которых имеет место разрыв угла поворота вокруг оси трубы. Сформулированы краевые задачи для дифференциальных уравнений статического кручения и крутящих гармонических колебаний с разрывными правыми частями. На основании аналитических решений этих задач для случаев антисимметричного и симметричного разворота блоков основания исследованы распределения угла закручивания и эквивалентного напряжения в трубе, зависящие от расстояния между разломами и от частоты вынужденных колебаний системы.

Ключевые слова: подземный трубопровод, статика, гармонические колебания, напряжения, взаимодействие разломов, разворот блоков основания.

*The article discusses the issues of forecasting the strength of underground pipelines laid in seismically active areas through sections composed of relatively rigid moving blocks. In such dangerous areas, in addition to the normal pressure load of the transported product, the pipe is subjected to additional effects from the movements of the fragments of the block foundation. As the literature data show, the problems of the influence of the interaction of faults on the stress state of the pipeline have not yet been studied. The aim of the study is to develop a model for the analysis of abnormal stresses in the underground pipeline on a damaged foundation caused by static or time-harmonic reciprocal turns of the blocks around the axis of the pipe on both sides of several faults. Static equilibrium and harmonic oscillations of the pipeline are investigated in a linear setting, modelling it with a rod with an annular cross section. The inertia of the transported product is not taken into account. To consider the issues of the ultimate equilibrium of the pipe, the momentless theory of shells and the energy theory of strength are used. The soil backfill is considered as Winkler's elastic layer. Multiple damages to the solid foundation are presented in the form of several faults on which there is a rupture of the angle of rotation around the axis of the pipe. We formulated boundary value problems for differential equations of static torsion and torsional harmonic oscillations with discontinuous right-hand sides. Based on the analytical solutions of these problems for the cases of antisymmetric and symmetrical reversal of the foundation blocks, the distributions of the torsion angle and equivalent stress in the pipe, depending on the distance between faults and the frequency of forced oscillations of the system, are investigated.*

Key words: underground pipeline, statics, harmonic oscillations, stresses, fault interaction, reversal of foundation blocks.

### **Вступ**

Для обґрунтованого аналізу ризиків експлуатації трубопровідних систем, що пронизують території тектонічних розломів, необхідно розвивати моделі та методи розрахунку напружено-деформованого та граничного станів трубопроводів у місцях локального пошкодження основи, яка на таких проблемних ділянках структурно виглядає як система взаємно рухомих блоків. Поведінку трубопроводу в складних гірничо-геологічних умовах вивчають, залучаючи підходи гідро- та інженерної геології, механіки та реології ґрунтів, теорії тонких стержнів та оболонок, механіки руйнування. Незважаючи на різноманіття цих моделей, передбачити рівень силового навантаження на трубопровід від основи на аномальних ділянках всередині складно [1–4]. Іноді дослідники обмежуються лише оцінюванням допустимих навантажень на трубопровід на зсувонебезпечних ділянках [5–7], все частіше для дослідження поведінки трубопроводів на порушених територіях застосовується числовий аналіз та імітаційне моделювання [8–10].

У попередніх працях авторів [11, 12] запропоновано методіку аналітичної оцінки позаштатних статичних напружень у трубопроводі під тиском за кінематичними параметрами локалізованих пошкоджень основи. Досліджено вплив статичних розривів переміщень та кутів повороту на поодинокому розломі для безмежного трубопроводу [11, 12] та для трубопроводу з анкерним кріпленням [13]. Згодом цю методіку розповсюдили на випадки вібрації [14, 15] та раптового руху [16] фрагментів основи обабіч ізольованого пошкодження. Проведений нами аналіз літературних джерел свідчить про

те, що питання про вплив декількох розломів на граничний стан трубопроводу досі не вивчалися.

Мета цієї статті полягає у розвитку моделі для аналізу позаштатних напружень у підземному трубопроводі на пошкодженій основі, спричинених статичними або гармонічними за часом взаємними розворотами блоків довкола осі труби обабіч декількох розломів. Передбачається вирішення таких задач: опис ключових гіпотез моделі, формулювання крайових задач статичного та стаціонарного динамічного скруту трубопроводу, побудова аналітичних розв'язків задач для випадків антисиметричного та симетричного розвороту фрагментів основи, аналіз впливів віддалі між розломами та частоти вимушених коливань на напружено-деформований стан труби.

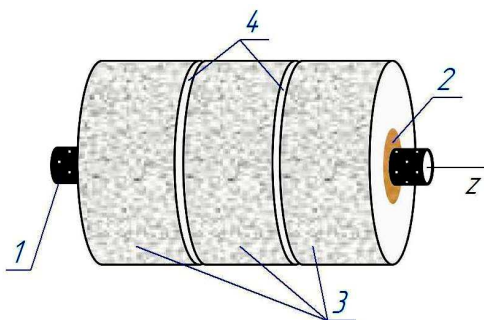
### **Статичний скрут трубопроводу на блокової основі**

Розглянемо прямолінійний трубопровід, який перебуває під штатним внутрішнім тиском транспортованого продукту і взаємодіє з блоковою основою через шар ґрунтової засипки (рис. 1). Фрагменти (блоки) пошкодженої основи обабіч розломів здійснюють повороти довкола осі трубопроводу. Величина та напрям цих поворотів вважаються заданими. У цьому розділі у статичній постановці досліджуємо позаштатні напруження в трубопроводі, спричинені таким кінематичним збуренням.

Сумістимо вісь  $z$  з віссю труби. Нехай основа поділена на три блоки пошкодженнями (розломами), локалізованими в точках  $z = \pm a$ .

Прийmemo основні припущення одновимірної моделі, описаної в працях [11, 12]. Це означає: аналіз проводимо в геометрично та

фізично лінійній постановці; трубопровід моделюємо нескінченним прямолінійним трубчастим стержнем; блоки основи вважаємо абсолютно жорсткими; поведінку тонкого шару ґрунтової засипки описуємо гіпотезою Вінклера; кінематику взаємних поворотів фрагментів основи задаємо розривними функціями від осової координати; міцність трубопроводу оцінюємо, сумуючи штатні та позаштатні напруження; при цьому труба вважається безмоментною оболонкою.



1 – труба, 2 – ґрунтовий шар, 3 – блоки основи, 4 – пошкодження (розломи)

**Рисунок 1 – Схема підземного трубопроводу на пошкодженій основі**

На підставі згаданих гіпотез сформулювали крайову задачу статичного скруту нескінченного стержня, яка включає рівняння рівноваги з урахуванням спряження через пружний прошарок [17]:

$$\frac{d^2 \varphi_z}{dz^2} - \lambda^2 (\varphi_z - \varphi_z^0) = 0, \quad -\infty < z < \infty, \quad (1)$$

та крайові умови на безмежності:

$$\frac{d\varphi_z}{dz}(\pm\infty) = 0. \quad (2)$$

Тут прийнято позначення:

$z$  – осьова координата;

$\varphi_z(z)$  – кут закручування трубопроводу;

$$\lambda = \sqrt{\frac{\pi D^3 k_\tau}{4GJ_p}} \approx \sqrt{\frac{k_\tau}{Gh}} \quad \text{– коефіцієнт защем-$$

лення;

$GJ_p$  – жорсткість труби щодо скруту;

$G$  – модуль зсуву матеріалу труби;

$D, h$  – зовнішній діаметр та товщина стінки труби;

$k_\tau$  – коефіцієнт зсувної жорсткості ґрунтової постелі;

задана кусково-стала функція розвороту основи

$$\varphi_z^0(z) = \varphi_z^0(-\infty) + \Theta_1 H(z+a) + \Theta_2 H(z-a); \quad (3)$$

$\varphi_z^0(-\infty)$  – кут повороту крайнього лівого блоку основи;

$\Theta_1, \Theta_2$  – стрибки кута повороту блоків основи при переході через розломи  $z = -a$  та  $z = a$  відповідно;

$H(\dots)$  – функція Гевісайда,

$2a$  – віддаль між пошкодженнями.

Детально розглядали два випадки кінематичного збурення основи обабіч розломів.

Перший варіант – антисиметричний скрут. Нехай у формулі (3)  $\varphi_z^0(-\infty) = -\Theta$ ,  $\Theta_1 = \Theta$ ,  $\Theta_2 = \Theta$ . Тоді вираз

$$\varphi_z^0(z) = \frac{\Theta}{2} (\text{sgn}(z+a) + \text{sgn}(z-a)) \quad (4)$$

означає, що два півнескінченні фрагменти основи повертаються у різні боки на кут  $\Theta$  відносно нерухомого середнього.

Другий варіант – симетричний скрут. Якщо у формулі (3)  $\varphi_z^0(-\infty) = 0$ ,  $\Theta_1 = \Theta$ ,  $\Theta_2 = -\Theta$ , то

$$\varphi_z^0(z) = \frac{\Theta}{2} (\text{sgn}(z+a) - \text{sgn}(z-a)), \quad (5)$$

тобто середній фрагмент основи повертається на кут  $\Theta$  відносно нерухомих крайніх.

Аналітичний розв'язок крайової задачі (1), (2) побудували за результатами праць [11, 12]. Так, для антисиметричного збурення (4)

$$\varphi_z(z) = \Theta (\varphi_z^*(z+a) + \varphi_z^*(z-a)), \quad (6)$$

а для симетричного збурення (5)

$$\varphi_z(z) = \Theta (\varphi_z^*(z+a) - \varphi_z^*(z-a)). \quad (7)$$

Тут:

кут повороту труби, спричинений одиничним взаємним розворотом блоків при  $z = 0$  [11, 12];

$$\varphi_z^*(z) = \frac{1}{2} \left( 1 - \exp\left(-\frac{|z|}{\gamma_\theta}\right) \right) \text{sgn } z;$$

$\gamma_\theta = 1/\lambda \approx \sqrt{Gh/k_\tau}$  – характерний лінійний розмір системи “ґрунт – труба” (обернений до коефіцієнта защемлення).

За розв'язками (6) та (7) компоненти тензора напружень у стінці труби знаходимо із співвідношень:

$$\sigma_z = \nu p \frac{D}{2h}, \quad \sigma_\theta = p \frac{D}{2h}, \quad \tau_{z\theta} = G \frac{D}{2} \frac{d\varphi_z}{dz}. \quad (8)$$

Тут  $p$  – внутрішній тиск у трубопроводі;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона матеріалу труби; нормальні напруження викликані штатним внутрішнім тиском  $p$ , а дотичне напруження – збуренням від повороту блоків основи.

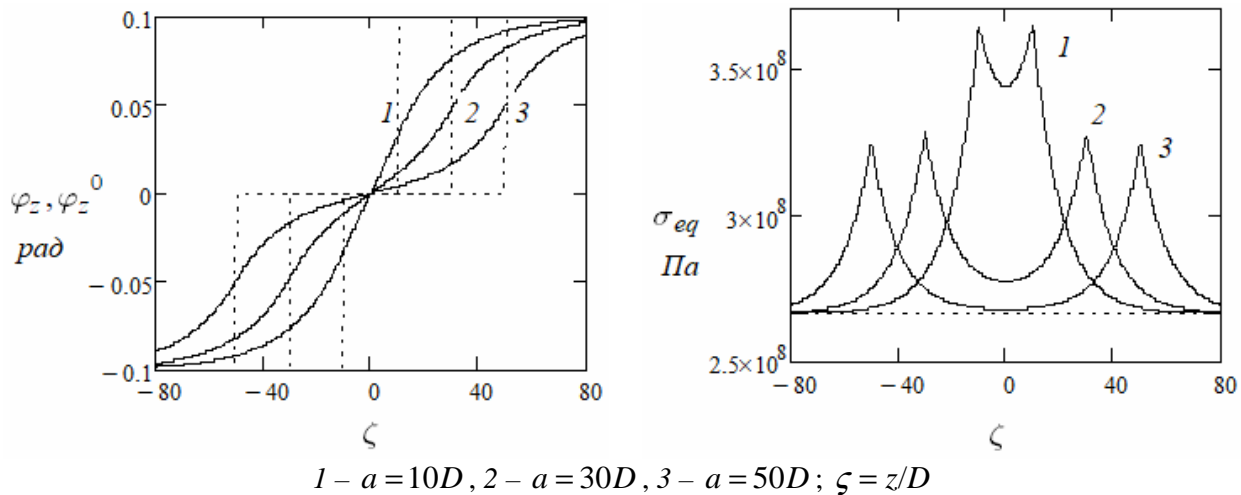


Рисунок 2 – Розподіл кута закручування та еквівалентного напруження вздовж осі труби (статика, антисиметрична задача)

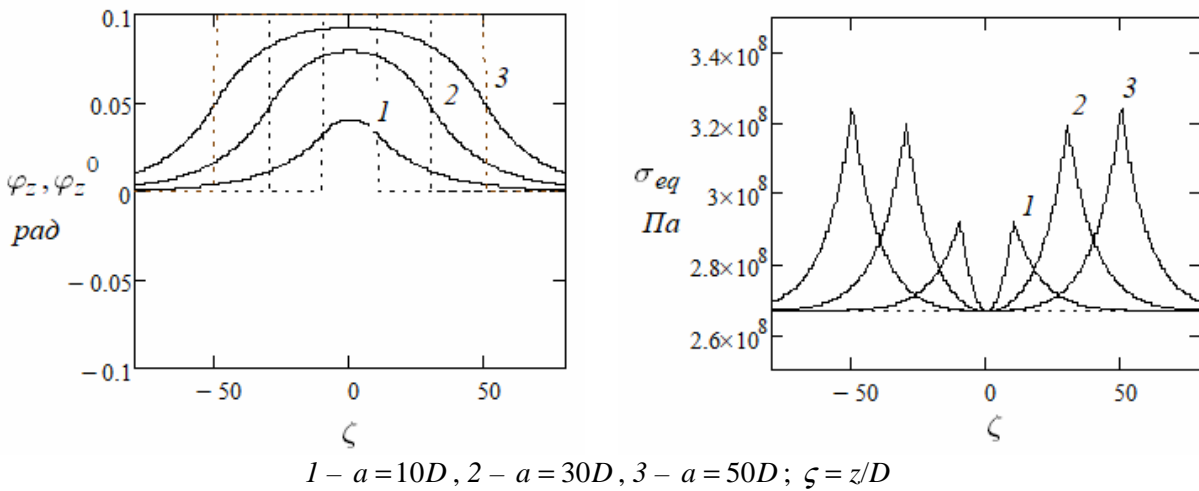


Рисунок 3 – Розподіл кута закручування та еквівалентного напруження вздовж осі труби (статика, симетрична задача)

Для аналізу граничного рівноваги труби використали енергетичну теорію міцності [16]:

$$\sigma_{eq} \equiv \sqrt{\sigma_z^2 - \sigma_z \sigma_\theta + \sigma_\theta^2 + 3\tau_{z\theta}^2} \leq [\sigma], \quad (9)$$

$\sigma_{eq}, [\sigma]$  – еквівалентне та допустиме напруження.

Числові розрахунки виконали, прийнявши для підземного магістрального трубопроводу:  $D = 1420 \text{ мм}$ ,  $h = 18 \text{ мм}$ ,  $G = 8,1 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ ,  $\nu = 0,3$ , а для шару ґрунтової засипки –  $k_\tau = 2 \text{ МПа/м}$ . Внутрішній тиск  $p$  вважали таким, що створює у трубі тангенціальне напруження  $\sigma_\theta = 300 \text{ МПа}$ . Кут повороту довкола осі труби  $\Theta = 0,1 \text{ рад} \approx 6^\circ$ . Значення піввіддалі між розломами основи варіювали:  $a = 10D; 30D; 50D$ .

За формулами (6)–(9) побудували графіки статичного розподілу кута закручування трубо-

проводу та еквівалентного напруження стінці труби у разі антисиметричної (рис. 2) та симетричної (рис. 3) задачі. Штриховими лініями відзначено розривні функції повороту основи (4) та (5).

Бачимо, що ефекти взаємодії розломів за антисиметричного та симетричного скруту принципово відрізняються між собою. У разі асиметричного розвороту крайніх блоків основи зменшення віддалі між розломами супроводжується істотним зростанням еквівалентних напружень (див. рис. 2). У той же час при повороті середнього блоку основи зближення розломів призводить загалом до зменшення напружень у трубі (див. рис. 3).

### Крутні коливання трубопроводу на пошкодженій основі

Розглянемо тепер усталені крутні коливання трубопроводу, спричинені гармонічними за

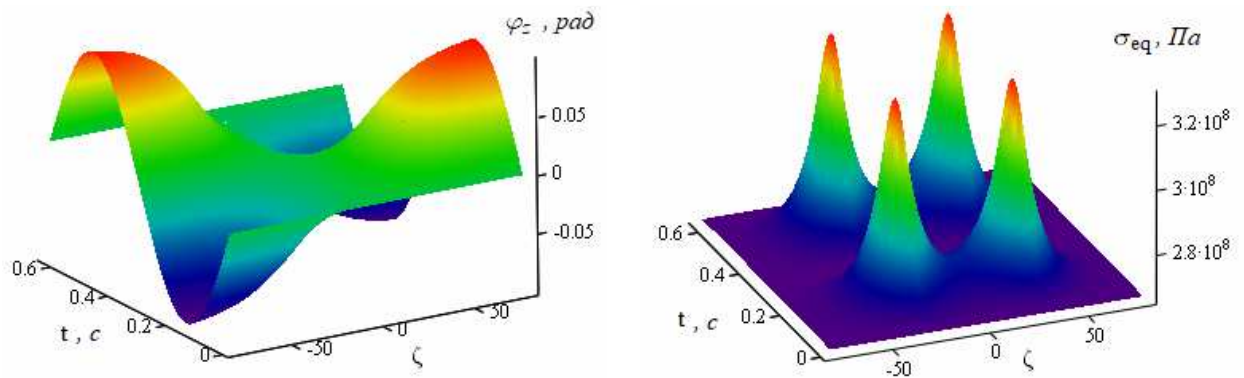


Рисунок 4 – Просторово-часовий розподіл кута закручування та еквівалентного напруження (коливання, антисиметрична задача);  $\zeta = z/D$

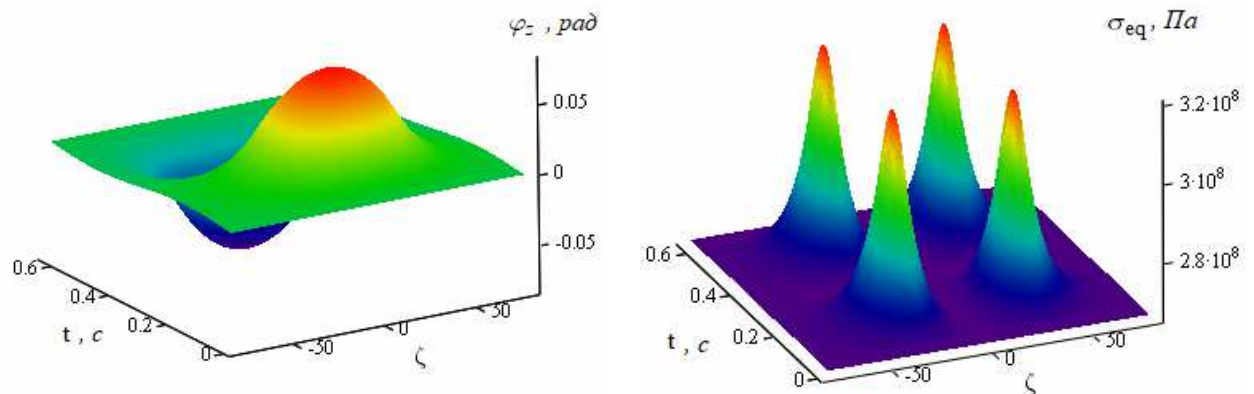


Рисунок 5 – Просторово-часовий розподіл кута закручування та еквівалентного напруження (коливання, симетрична задача);  $\zeta = z/D$

часом взаємними розворотами фрагментів пошкодженої основи. Кінетичним моментом транспортованого продукту нехтуємо порівняно з кінетичним моментом труби. Задачу стаціонарної динаміки нескінченного стержня сформулювали без початкових умов [17]:

$$\frac{\partial^2 \varphi_z}{\partial z^2} - \lambda^2 (\varphi_z - \varphi_z^0) = \frac{1}{c_2^2} \frac{\partial^2 \varphi_z}{\partial t^2},$$

$$-\infty < z < \infty, \quad t > 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varphi_z}{\partial z}(\pm\infty) = 0, \quad t > 0. \quad (11)$$

Тут:

$z, t$  – осьова координата та час;

$\varphi_z(z, t)$  – динамічний кут закручування;

$c_2 = \sqrt{G/\rho}$  – швидкість розповсюдження хвилі зсуву;

$\rho$  – густина матеріалу труби;

задана функція розвороту основи

$$\varphi_z^0(z, t) = \left\{ \varphi_z^0(-\infty) + \Theta_1 H(z+a) + \Theta_2 H(z-a) \right\} \sin \omega t;$$

$\Theta_1, \Theta_2$  – амплітуди розривів кута повороту блоків основи при переході через розломи  $z = -a$  та  $z = a$  відповідно;

$\omega$  – частота вимушених коливань.

Інші позначення такі, як у формулах (1), (2).

Подібно до задачі статики досліджували два варіанти збурення основи: гармонічні повороти крайніх блоків у протифазі відносно нерухомого середнього фрагмента (антисиметрія):

$$\varphi_z^0(z, t) = \frac{\Theta}{2} (\text{sgn}(z+a) + \text{sgn}(z-a)) \sin \omega t, \quad (12)$$

та гармонічні коливання середнього блоку відносно нерухомих крайніх (симетрія):

$$\varphi_z^0(z, t) = \frac{\Theta}{2} (\text{sgn}(z+a) - \text{sgn}(z-a)) \sin \omega t. \quad (13)$$

Для кінематичних збурень (12) та (13) отримали аналітичні розв'язки задачі динамічного скруту –

$$\varphi_z(z, t) = \Theta (\Phi_z^*(z+a) + \Phi_z^*(z-a)) \sin \omega t \quad (14)$$

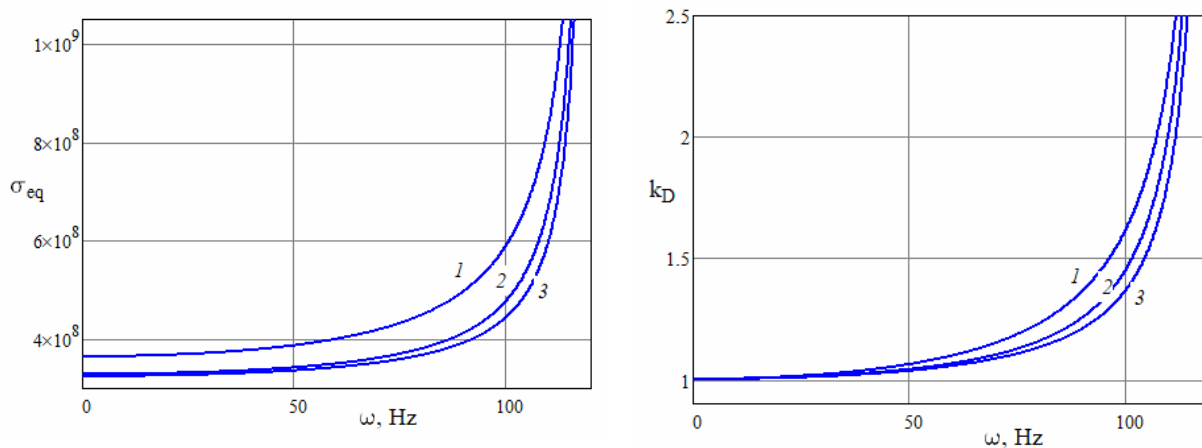
та

$$\varphi_z(z, t) = \Theta (\Phi_z^*(z+a) - \Phi_z^*(z-a)) \sin \omega t \quad (15)$$

відповідно.

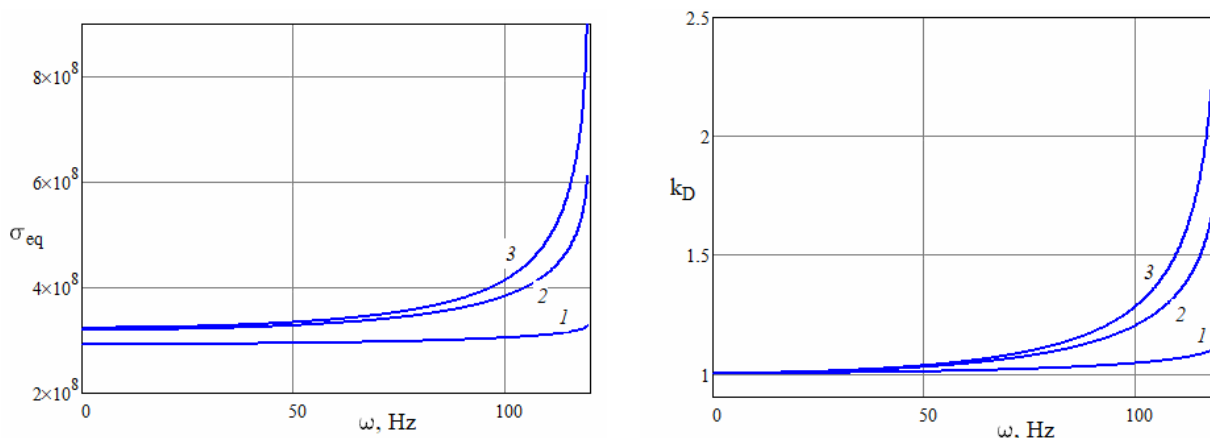
Тут:

амплітуда коливань труби для поодинокого розлому



1 –  $a = 10D$ , 2 –  $a = 30D$ , 3 –  $a = 50D$

Рисунок 6 – Частотні залежності максимального еквівалентного напруження та коефіцієнта динамічності (антисиметрична задача)



1 –  $a = 10D$ , 2 –  $a = 30D$ , 3 –  $a = 50D$

Рисунок 7 – Частотні залежності максимального еквівалентного напруження та коефіцієнта динамічності (симетрична задача)

$$\Phi_z^*(z) = \frac{\operatorname{sgn} z}{2 \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)} \left(1 - \exp\left(-\sqrt{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} \frac{|z|}{\gamma_\theta}\right)\right);$$

$$\omega_0 = \lambda c_2 = \frac{c_2}{\gamma_\theta} \approx \sqrt{\frac{k_\tau}{\rho h}} - \text{частота відсікання.}$$

Числовий аналіз амплітуди динамічних полів для різних віддалей між пошкодженнями проводили за формулами (14), (15) та (8), (9). Під час розрахунків користувались такими ж параметрами, як у статичній задачі. При  $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  значення частоти відсікання становить  $\omega_0 \approx 119 \text{ Гц}$ .

Графіки зміни просторового розподілу кута закручування та еквівалентного напруження за період коливань при фіксованих  $\omega = 10 \text{ Гц}$  та  $a = 30D$  зображені на рис. 4 і 5 відповідно для антисиметричної та симетричної задачі. Аналіз результатів показав, що при гармонічному збуренні кут повороту та дотичне напруження є

гармонічними функціями від часу, тоді як еквівалентне напруження є загалом періодичною функцією від часу, яка змінюється з удвічі більшою частотою. Зазначене є наслідком нелінійності умови міцності. Із збільшенням частоти збурення амплітуда коливань труби зростає, прямуючи до безмежності при  $\omega \rightarrow \omega_0$ . Найбільші значення еквівалентного напруження спостерігаємо в місцях розломів. Із збільшенням частоти коливань коефіцієнт защемлення зменшується, отож ширина піків напружень зростає, а це сприяє посиленню взаємодії пошкоджень при усталеній вібрації. Залежності максимального на періоді еквівалентного напруження в трубі  $\max \sigma_{eq} = \sigma_{eq}(\pm a, \pi/(2\omega))$  та коефіцієнта динамічності  $k_D = \max \sigma_{eq}^{dyn} / \max \sigma_{eq}^{cm}$  від частоти вимушених коливань для різних віддалей між розломами показані на рис. 6, 7. Ефект інтерференції пошкоджень якісно такий самий, як у задачах статички.

### Висновки

Розроблена модель деформування підземного трубопроводу на пошкодженій основі дозволяє оцінити кінематику, напружено-деформований та граничний стан труби за заданими параметрами статичного та вібраційного розвороту фрагментів блочної основи.

За розв'язками задач статичного та динамічного скруту встановлено, що зближення пошкоджень основи призводить до збільшення (зменшення) еквівалентних напружень у трубі при антисиметричному (симетричному) розвороті блоків основи.

Коефіцієнт динамічності напружень зростає із збільшенням частоти гармонічних коливань, прямуючи до безмежності в околі частоти відсікання.

Значення частоти відсікання залежить тільки від жорсткості шару ґрунтової засипки, від густини матеріалу труби та від товщини її труби. На частоту відсікання практично не впливають ні діаметр, ні жорсткість матеріалу трубопроводу.

Започатковані у цій статті дослідження доцільно розповсюдити на задачі нестационарної динаміки трубопроводів, споруджених на пошкодженій основі.

### Література

1. Айнбиндер А. Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость. Справочное пособие. М.: Недра, 1992. 287 с.
2. Бородавкин П. П. Подземные магистральные трубопроводы. Проектирование и строительство. М.: Недра, 1982. 384 с.
3. Мазур И. И., Иванцов О. М. Безопасность трубопроводных систем. М.: ИЦ „ЕЛИМА”, 2004. 1104 с.
4. Харионовский В. В. Надежность и ресурс конструкций газопроводов. М.: Недра, 2000. 467 с.
5. Trifonov O. V., Cherniy V. P. Elastoplastic stress-strain analysis of buried steel pipelines subjected to fault displacements with account for service loads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2012. Vol. 33, Issue 1. P. 54–62.
6. Velychkovych A. S., Andrusyak A. V., Pryhorovska T. O., Ropyak L. Y. Analytical model of oil pipeline overground transitions, laid in mountain areas. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*. 2019. Vol. 74, Article Number 65.
7. Крижанівський Є. І., Рудко В. П., Шацький І. П. Оцінка допустимих навантажень на

трубопровод у зоні сповзань ґрунту. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2004. Т. 40, № 4. С. 98–100.

8. Vazouras P., Karamanos S.A., Dakoulas P. Mechanical behavior of buried pipes crossing active strike-slip faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2012. Vol. 61. P. 164–180.

9. Zhang J., Liang Z., Han C. J. Finite element analysis of wrinkling of buried pressure pipeline under strike-slip fault. *Mechanika*. 2015. Vol. 21, Issue 3. P. 31–36.

10. Орыняк И. В., Богдан А. В. Проблема больших перемещений подземных трубопроводов. Сообщ. 1. Разработка численной процедуры. *Пробл. прочности*. 2007. № 3. С. 51–74.

11. Шацький І. П., Струк А. Б. Напружений стан трубопроводу в зонах локального руйнування ґрунту. *Пробл. прочности*. 2009. № 5. С. 127–133.

12. Шацький І. П., Струк А. Б. Деформування підземного трубопроводу в місцях локального руйнування основи. *Доп. НАН України*. 2009. № 12. С. 69–74.

13. Струк А. Б. Напруження у підземному трубопроводі від пошкодження основи поблизу анкерного кріплення. *Нафтогазова енергетика*. 2019. № 2(32). С. 53–60.

14. Shatskyi I., Struk A., Vaskovskyi M. Static and dynamic stresses in pipeline built on damaged foundation. *Trans. VŠB – TU Ostrava, Civ. Eng. Ser.* 2017. Vol. 17, Issue 2. P. 119–124.

15. Shatskyi I., Vaskovskyi M., Aksionov V., Venhrynyuk T. Cyclic straining of pressurized buried pipeline crossing the fault. *Proc. 22<sup>nd</sup> Int. Sci. Conf. “MECHANIKA 2017” (19 May 2017, Kaunas, Lithuania)*. Kaunas, 2017. P. 351–354.

16. Васьковський М. І. Динамічний скрут підземного трубопроводу від раптового повороту фрагмента основи. *Нафтогазова енергетика*. 2020. № 1 (33). С. 66–72.

17. Rabotnov Y. N. Mechanics of deformable solids. М.: Nauka, 1988. 712 p.

### References

1. Aynbinder A. B. Raschet magistralnyh i promyslovyh truboprovodov na prochnost i ustoychivost. Spravochnoe posobie. М.: Nedra, 1992. 287 p. [in Russian]
2. Borodavkin P. P. Podzemnyie magistralnyie truboprovody. Proektirovanie i stroitelstvo. М.: Nedra, 1982. 384 p. [in Russian]
3. Mazur I. I., Ivantsov O. M. Bezopasnost truboprovodnyh sistem. М.: ELIMA, 2004. 1104 p. [in Russian]

4. Kharionovskii V. V. Nadezhnost i resurs konstruktsiy gazoprovodov. M.: Nedra, 2000. 467 p. [in Russian]
5. Trifonov O. V. Cherniy V. P. Elastoplastic stress-strain analysis of buried steel pipelines subjected to fault displacements with account for service loads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2012. Vol. 33, Issue 1. P. 54–62.
6. Velychkovych A. S., Andrusyak A. V., Pryhorovska T. O., Ropyak L. Y. Analytical model of oil pipeline overground transitions, laid in mountain areas. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*. 2019. Vol. 74, Article Number 65.
7. 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, Issue 4. P. 547–551. [in Ukrainian]
8. Vazouras P., Karamanos S. A., Dakoulas P. Mechanical behavior of buried pipes crossing active strike-slip faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2012. Vol. 61. P. 164–180.
9. Zhang J., Liang Z., Han C. J. Finite element analysis of wrinkling of buried pressure pipeline under strike-slip fault. *Mechanika*. 2015. Vol. 21, Issue 3. P. 31–36.
10. Orynyak I. V., Bogdan A. V. Problem of large displacements of buried pipelines. Part 1. Working out a numerical procedure. *Strength of Materials*. 2007. Vol. 39, Issue 3. P. 257–274. [in Russian]
11. Shats'kyi I. P., Struk A. B. Stressed state of pipeline in zones of soil local fracture. *Strength of Materials*. 2009. Vol. 41, Issue 5. P. 548–553. [in Ukrainian]
12. Shatskyi I. P., Struk A. B. Deformuvannya pidzemnoho truboprovodu v mistsiakh lokalnoho ruinuвання osnovy. *Dop. NAN Ukrainy*. 2009. Nr 12. P. 69–74. [in Ukrainian]
13. Struk A. B. Underground pipeline stresses caused by damage near anchor mounting. *Oil and Gas Power Eng*. 2019. No 2(32). P. 53–60. [in Ukrainian]
14. Shatskyi I., Struk A., Vaskovskyi M. Static and dynamic stresses in pipeline built on damaged foundation. *Trans. VŠB – TU Ostrava, Civ. Eng. Ser.* 2017. Vol. 17, Issue 2. P. 119–124.
15. Shatskyi I., Vaskovskyi M., Aksionov V., Venhrynyuk T. Cyclic straining of pressurized buried pipeline crossing the fault. *Proc. 22<sup>nd</sup> Int. Sci. Conf. "MECHANIKA 2017" (19 May 2017, Kaunas, Lithuania)*. Kaunas, 2017. P. 351–354.
16. Vaskovskyi M. I. Dynamic torsion of underground pipeline due to sudden rotation of foundation fragment. *Oil and Gas Power Engineering*. 2020. No 1 (33). P. 66–72. [in Ukrainian]
17. Rabotnov Y. N. Mechanics of deformable solids. M.: Nauka, 1988. 712 p.