

УДК 539.4

DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.84.147787>

# Вплив розвитку поздовжніх зміщень ґрунту на напружений стан підземних ділянок трубопроводів в зонах шахтних виробіток

З.С. Ясковець<sup>1</sup> • І.В. Орняк<sup>2</sup>

1 - Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна;

2 - Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського, Київ, Україна

Received: 20 November 2018 / Accepted: 26 November 2018

**Анотація.** Шахтні виробітки можуть представляти значну загрозу цілісності трубопроводів. Існують три складові, які кількісно визначають розподіл напружень вздовж трубопроводу - функція переміщення ґрунту по осі трубопроводу; фізичний закон взаємодії ґрунту і труби через їх відносні зсуви; осьова деформація стінок труби як реакція на осьові напруження. Всі три з них, як правило, добре зрозумілі, однак прогнозування напружень у таких трубопроводах залишається значною проблемою. Насамперед це пов'язано з наступними факторами. По-перше, дуже нелінійний закон взаємодії труба-ґрунт при великій протяжності трубопроводу; по-друге, зазвичай історія розвитку зміщень земної поверхні в процесі відпрацювання шахтних виробіток не враховується, хоча вона може відігравати важливе значення. В даній роботі представлено ефективний алгоритм розрахунку осьових сил та переміщень на основі понять базового та корекційного розв'язків. Виконано модернізацію алгоритму шляхом введення історії розвитку поздовжніх зміщень ґрунту під час відпрацювання шахтної виробітки. Наведено приклади розрахунку напруженого стану газопроводу поздовжнього орієнтованого (паралельного) відносно напрямку шахтної виробітки. Показано вплив врахування історії розвитку поздовжніх зміщень ґрунту на напружений стан газопроводу.

**Ключові слова:** зміщення ґрунту, трубопровід, напружений стан, шахтна виробітка.

## Вступ

Зміщення поверхні ґрунту внаслідок зсувів та осідань можуть стати загрозою для цілісності трубопроводів, тому потребують значної уваги з боку трубопровідних операторів. При оцінці та зменшенні їх впливу необхідно приймати до уваги три основні проблеми [1]:

- Визначення зони впливу, де можливі небезпеки зсуву або осідання, оцінити їх обсяг та інтенсивність щодо умов навколишнього середовища.
- Визначення експериментальних та чисельних підходів до оцінки відгуку трубопроводу для очікуваних зрушень ґрунту.
- Визначення відповідних заходів щодо зменшення впливу зміщень ґрунту та оцінки їх ефективності.

Найпоширеніший випадок це деформації ґрунту спричинені поперечними (бічними) зсувами, аналізу яких присвячено велику кількість аналітичних та експериментальних робіт [2]. Відносні поперечні зміщення між трубопроводом та ґрунтом призводить до згину труби. Велике поперечне зміщення ґрунту може збільшити довжину деформованої кривої лінії трубопроводу в порівнянні з початковою прямою і може призвести до вторинного геометрично нелінійного натягу (канато-подібна поведінка трубопроводу) та спричинення взаємодії ґрунт-трубопровід у поздовжньому напрямку [3, 4].

Шахтне відпрацювання створює особливий вид геологічної небезпеки для трубопроводів. Як зазначено в [1], "з точки зору впливу на земельні ділянки, підземні виробітки складають приблизно 20 відсотків загального осідання землі в США, і більша частина її пов'язана з підземним видобуванням вугілля" [1]. Наприклад, в Україні існує щонайменше 12 ділянок магістральних газопроводів, що страждають від впливу шахтних виробіток, протяжність яких становить від одного до декількох кілометрів [5]. Основні особливості деформації землі та їх вплив на трубопроводи детально описані в документі ASCE [6]. Основну загрозу для цілісності трубопроводу спричиняють горизонтальні (в осьовому напрямку трубопроводу) зміщення ґрунту. Аналогічний акцент зроблено в праці [7].

Ці переміщення, як правило, є зрозумілими на практиці, що підтверджується великою статистикою реальних спостережень. Існують нормативні документи, усталені практики та комп'ютерні програми [8-11], які

в більшості випадків забезпечують надійне прогнозування деформацій ґрунтів та їх розвиток з часом в залежності від геометричних параметрів шахтної виробітки та механічних властивостей ґрунту. Відносні зсуви між точками труби та ґрунту визначають величину опору ґрунту, що знову добре розуміється і дається в різних стандартах, включаючи такі витончені ефекти, як геометрія траншеї, вологість ґрунту тощо [6, 12]

Розуміння деформації ґрунту, характеристики опору ґрунту разом з законами деформації стінки труб завдяки осьовим силам, в принципі, можуть забезпечити наукову основу для точного прогнозування деформації трубопроводу. Тим не менше, в літературі [13] дуже мало прикладів, де є експериментально перевірені розрахункові значення напружень, обумовлені осіданням земної поверхні. Крім того, в нещодавно опублікованій роботі [14] про прогнозування та моніторинг напруженого стану трубопроводів в зоні впливу шахти було зроблено зовсім інші песимістичні висновки. Було зазначено, що: "Трубопровідні навантаження слід контролювати за допомогою тензодатчиків або інших засобів. В зонах зміщень ґрунту напружений стан в трубопроводах не можна спрогнозувати з адекватною точністю".

Найбільш складною у прогнозуванні деформації трубопроводу є сильна нелінійність фізичного закону взаємодії ґрунт-трубопровід. Зазвичай розподілена сила взаємодії представлена у вигляді трьох ділянок, розподіленої функції відносного зсуву ґрунту  $u_g$ , з трубопроводом  $u$ , рис 4. Найбільш проблемою рішення, є те, що ми не знаємо заздалегідь, який стан взаємодії (I, II або III) реалізується в даній точці.

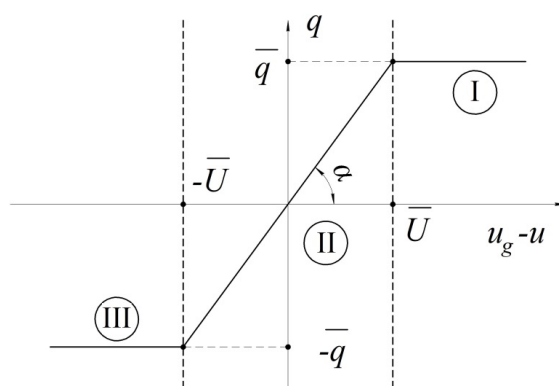


Рис. 1. Узагальнена діаграма взаємодії між трубопроводом та ґрунтом

Аналітичні методи можуть бути дуже ефективними, якщо ми знаємо загальні закономірності деформації ґрунту і можемо спрогнозувати загальну схему розподілу сил взаємодії (I, II або III) уздовж трубопроводу.

Чисельні методи, звичайно, більш популярні в літературі, тому що вони не обмежуються типовою схемою переміщення ґрунту. Рішення досягається шляхом поділу трубопроводу на велику кількість елементарних ділянок, де розподілені сили взаємодії однакові, застосовуючи процедуру поетапного збільшення прикладеного переміщення ґрунту. На кожному кроці визначається додатковий зсув труби для прийнятої дотичної жорсткості для кожної елементарної ділянки трубопроводу. Дотична жорсткість взаємодії ґрунт-труба потім оновлюється як функція відносного зсуву ґрунт-труби [15, 16]. Загальний недолік таких інкрементальних процедур для значного нелінійного закону взаємодій (наприклад, I на рис. 1) полягає в тому, що для збіжності розв'язку вимагається велика кількість ітерацій [17], що накладає значні обмеження.

Метою даної роботи є аналіз напруженого стану трубопроводу з урахуванням історії розвитку поздовжніх зміщень ґрунту в процесі відпрацювання шахтних виробіток. В цій роботі ми пропонуємо оригінальний метод ітерації для наближення до правильного рішення на основі трьох різних особливостей:

Використано поняття базового та корекційного рішень [18]. Корекційне рішення завжди розраховується для кінцевої системи навантаження. Базове рішення на кожній ітерації  $i$ , уточнюється на основі різниці між корекційним рішенням і базовим на попередній ітерації, помножене на динамічний коефіцієнт для управління збіжністю ітераційної процедури  $k$ .

Коефіцієнт  $k$  коригується на кожній ітерації на основі знаку та значення максимальної різниці між базовими та корекційними рішеннями.

Загальне елементарне рішення для кожної елементарної ділянки трубопроводу дається у формі, зручній для матричного застосування, яке значно зменшує кількість невідомих (в ідеалі для будь-якого довгого трубопроводу ми маємо лише матрицю з 4 незалежними невідомими).

## 1. Чисельна процедура на основі базових і корекційних рішень

### 1.1. Основні рівняння та їх рішення

Розглянемо лише випадок пружної деформації трубопроводу. Це пояснюється вимогою діючих в Україні норм [19]. Для прямої ділянки трубопроводу система основних рівнянь є тривіальною:

$$\frac{dN(x)}{dx} = q_t(x);$$

$$\frac{du}{dx} = -\frac{N(x)}{EF},$$
(1)

де  $N$  осьова сила в трубі  $u$  - осьове зміщення точок трубопроводу, спрямованих уздовж осі  $x$  трубопроводу,  $E$  - модуль пружності,  $F$  - площа поперечного перерізу ( $F \approx 2\pi Rt$ , де  $R$  радіус,  $t$  товщина стінки). Розподілена сила  $q_t(x)$ , відповідно до фізичного закону, показаного на рис. 1, залежить від стану взаємодії та відносного зсуву  $\bar{U}$ :

$$\bar{U} = u_g - u$$
(2)

де  $u$  та  $u_g$  - переміщення трубопроводу та ґрунту відповідно. Отже, для трьох станів взаємодії маємо наступні рівняння:

$$q_t(x) = \pm \pi D_n c_{x0} \bar{U} = const$$
(3a)

для I та III пластичного випадку взаємодії, де  $D_n$  зовнішній діаметр,  $c_{x0}, \bar{U}$  константи широко представлені в різних документах [5, 11], і знак "+" застосовується для випадку (стану) I, та "-" для випадку III, та

$$q_t(x) = \pi D_n c_x \bar{U}$$
(3b)

для II пружного випадку, де  $c_x$  це інша константа. Система (1) та (3) зазвичай має дуже просте рішення, яке широко представлено в літературі. Переміщення ґрунту можливо апроксимувати кусково-ламаними прямими лініями. Таким чином, для кожної ділянки апроксимації переміщення ґрунту можна представити як:

$$u_g(x) = \mu_0 + \mu_1 x$$
(4)

Враховуючи (4), отримаємо систему рішення з врахуванням пружної взаємодії труба-ґрунт (ділянка II) для переміщення трубопроводу у формі, зручній для застосування матричним методом:

$$u(x) = u_0 ch(\beta x) - \frac{N_0}{\beta EF} sh(\beta x) + \mu_0 (1 - ch(\beta x)) + \mu_1 \left( x - \frac{1}{\beta} sh(\beta x) \right)$$
(5)

$$N(x) = -u_0 EF \beta sh(\beta x) + N_0 ch(\beta x) + \mu_0 EF \beta sh(\beta x) + \mu_1 EF (ch(\beta x) - 1)$$

де

$$\beta = \sqrt{\frac{\pi D_n c_x}{EF}}$$
(6)

Для випадку пластичної взаємодії труба-ґрунт:

$$u(x) = u_0 - \frac{N_0}{EF} x - \left( \pm \frac{\bar{q} x^2}{2EF} \right);$$
(7)

$$N(x) = N_0 \pm \bar{q} x.$$

де для ділянки III приймається знак "+" та знак "-" для випадку I (див рис. 1). Загальні рішення доповнюються граничними умовами на лівому (L) та правому (R) кінцях трубопроводу [див., наприклад, 21]:

$$N_L = -u_L \beta EF, \quad N_R = u_R \beta EF$$
(8)

### 1.2 Алгоритм розв'язку.

Алгоритм базується на поняттях базового та корекційного рішень і полягає в наступному:

1. Задається переміщення ґрунту в кожній точці вздовж осі,  $u_s$ .
2. Лінія трубопроводу розбивається на  $N$  елементарних ділянок. Вводиться поняття базових переміщень ґрунту в кожній точці на кожній  $i$ -й ітерації  $\bar{u}_{b,i}$ . Перед початком розрахунку вважається, що базові переміщення трубопроводу рівні переміщенням ґрунту  $\bar{u}_{b,0} = u_s$ .

3. За заданими переміщеннями ґрунту та базовими переміщеннями труби на попередній ітерації та значенням граничного взаємного переміщення визначається тип взаємодії для кожної елементарної ділянки.

4. В залежності від типу взаємодії для кожної елементарної ділянки записуються точні рівняння для лінійного та нелінійного випадку, які формують матрицю розв'язку, що доповнюється граничними умовами на кінцях.

5. Розв'язуючи матрицю, отримуємо повні значення переміщень та сил трубопроводу.

6. На основі знайденого розв'язку виконуємо коригування базових переміщень трубопроводу. Базові переміщення на  $i$ -й ітерації  $\overline{u_{b,i}}$  знаходяться через базові переміщення на  $i-1$  ітерації та значень повних переміщень  $\overline{u_{k,i}}$  на цій  $i$ -й ітерації по формулі:

$$\overline{u_{b,i}} = \overline{u_{b,i-1}} + k(\overline{u_{k,i}} - \overline{u_{b,i-1}}), \quad (9)$$

де  $k$  – коефіцієнт для управління збіжністю ітераційної процедури, який вибирається наступним чином:

а)  $A = k \cdot \max \forall x \{ \overline{u_{p,i}(x)} - \overline{u_{b,i-1}(x)} \} < 3\overline{U}$ ; де умовна величина  $3\overline{U}$  є емпіричною. Дана умова обґрунтовується необхідністю обмеження максимальних переміщень таким чином, щоб не відбувалося значних переходів точок труби із стану «граничне додатне тертя» в стан «граничне від'ємне тертя» і навпаки.

б) якщо знак в точці екстремуму на попередній ітерації змінився, це може свідчити про можливість неконтрольованого розходження результатів обчислень. Для подавлення таких осциляцій приймаємо  $A = \frac{A}{2}$ , тобто зменшуємо допустиму величину переміщень в два рази;

в) якщо знак в точці екстремуму на попередній ітерації не змінився, то це значить, що рішення стійке, тоді значення  $A$  можна збільшити, хоча і більш повільно, ніж у пункті б), наприклад, в 1.3 рази, при цьому обмеження  $A < 3\overline{U}$  має зберігатися.

7. Після виконання коригування базових переміщень трубопроводу переходимо до п.2.

8. Розв'язок вважається знайденим, якщо коригуючий розв'язок на поточному ітераційному кроці майже співпадає з поточним базовим розв'язком.

## 2. Врахування історії розвитку поздовжніх зміщень ґрунту

Розглянемо загальний алгоритм розрахунку напружень у випадку декількох етапів навантаження та приклад практичного розрахунку на його основі. Тут поняття однієї стадії навантаження потрібно детально пояснити. "Навантаження" тут це усталені зміщення ґрунту. Звичайно, зміщення ґрунту - це не миттєва подія, вона розвивається з часом. Отже, "стадія навантаження" означає, що протягом деякого проміжку часу кожна точка ґрунту рухається в тому ж напрямку, хоча, звичайно, різні точки ґрунту можуть рухатися в різних напрямках, але їх відношення між величинами переміщень залишаються однаковими.

### 2.1 Алгоритм розрахунку напружень на декілька етапів навантаження

У подальшому аналізі використовуються наступні поняття.

- накопичене зміщення ґрунту на всіх попередніх етапах навантаження,  $u_g^{s-1}(x)$ ;

- додаткове зміщення ґрунту на наступній  $s$ -стадії навантаження,  $\Delta u_g^s(x)$ , отже:

$$u_g^s(x) = u_g^{s-1}(x) + \Delta u_g^s(x), \quad (10)$$

- досягнуте переміщення точок трубопроводу  $u_b^{s-1}(x)$  на всіх попередніх етапах навантаження;

- досягнуті внутрішні сили в кожній точці трубопроводу  $N_b^{s-1}(x)$ ;

- відомі стани взаємодії і розподілена сила взаємодії між ґрунтом і трубою на кожній елементарній ділянці труби, а саме

$$q_t^{s-1}(x) = \pm \overline{q}, \quad \text{для випадку III та I відповідно} \quad (11)$$

$$q_t^{s-1}(x) = (\alpha_0 + \alpha_1 x), \quad \text{для випадку II} \quad (12)$$

Введемо поняття ефективного переміщення ґрунту, яке досягається протягом усього попереднього ( $s-1$ ) етапу навантаження,  $u_g^{se}(x)$ :

$$u_g^{se}(x) = u_b(x) + q_t^{s-1}(x) / (\pi D_n c_x), \quad (13)$$

Зміст  $u_g^{se}(x)$  полягає в тому, що він відображає фізичну суть повторюваної пружно - пластичної поведінки. Тобто неважливо, наскільки далеко ліворуч (для стану I) і праворуч (для стану III) реальна точка лежить на діаграмі взаємодії труба-ґрунт (рис. 4) - на наступному етапі навантаження вона буде поводитися так, наче зараз знаходиться на лінійній ділянці (II стан).

Отже, алгоритм для наступного етапу навантаження практично не відрізняється від того, що описаний у розділі 1.2 статті. Різниця в наступних початкових функціях введення:

1. Основне (первинне) переміщення ділянок трубопроводу рівне  $u_b(x)$ , яке пояснене вище.

2. Початкове ефективне переміщення землі, що дається формулою

$$u_g^e(x) = u_g^{se}(x) + \Delta u_g^s(x) \quad (14)$$

Формула (14) є основною сутністю алгоритму, проста форма якого дозволяє нам використовувати алгоритм, наведений у розділі 1.2, і перейти до пункту 3 лише зміною  $u_g(x)$  на  $u_g^e(x)$ .

### 2.2 Розрахунок з урахуванням історії, для поздовжньої шахтної виробітки

Це більш рідкісний випадок видобутку шахт, тому що нормативні документи зазвичай вказують, що шахта повинна перетинати будь-яку протяжну конструкцію (включаючи трубопровід) у найкоротшій ширині. Тим не менше, в місцях відгалуження систем декількох трубопроводів трапляються випадки поздовжнього взаємного розташування шахтних виробіток (лав) та трубопроводів. На рис. 2 представлено реальний випадок поздовжньо-орієнтованого газопроводу-відводу Ду 300 відносно зони впливу лави 1099. Протяжність газопроводу в зоні впливу лави становить 1500 м.

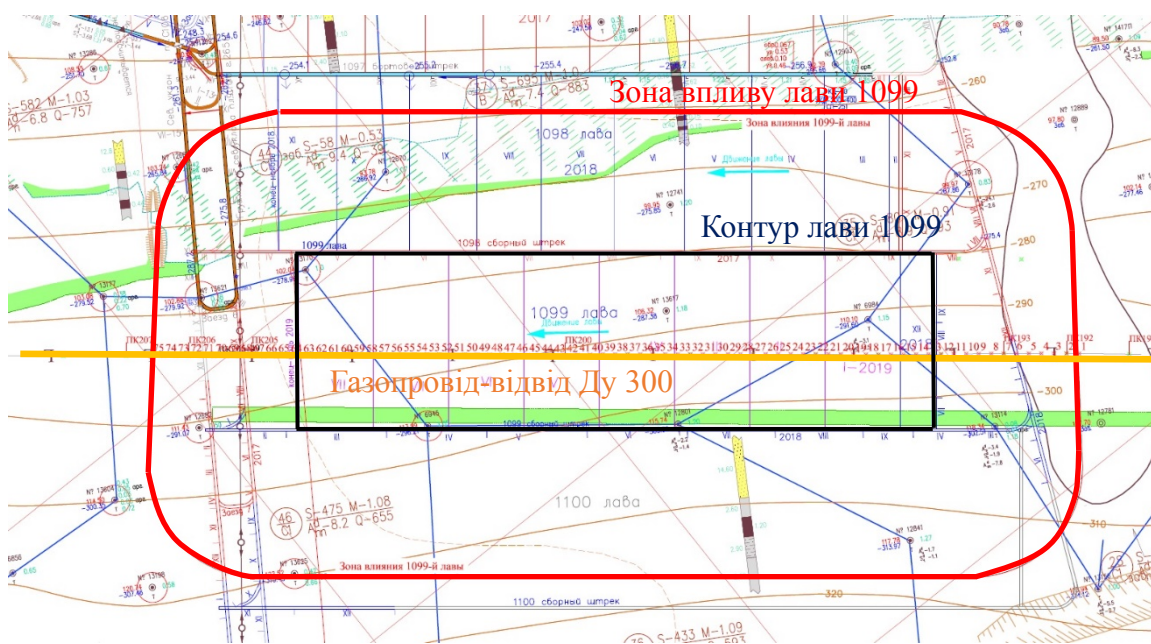


Рис. 2. Взаємне розташування газопроводу та зони впливу лави 1099

На рис. 3 наведено десять графіків зсувів поверхні ґрунту, що відповідають десяти різним положенням шахтної лави від початку відпрацювання (100м, 200м, ... 1000м). Очевидно, що в цьому випадку ми повинні застосувати вищеописану процедуру врахування історії розвитку поздовжніх зміщень ґрунту, оскільки зміщення ґрунту складаються непропорційно, а їхні інтенсивності та знак залежать від положення вершини лави.

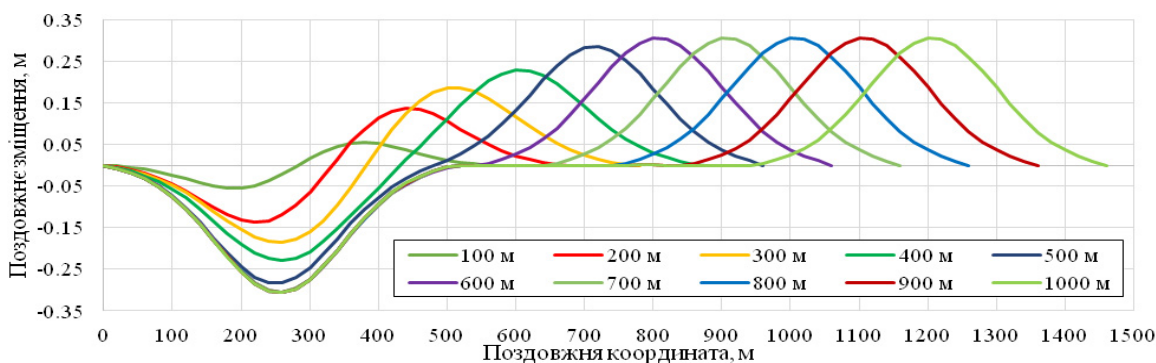


Рис. 3. Поздовжні зміщення ґрунту для різної протяжності відпрацювання лави 1099

Для застосування запропонованої процедури історії розвитку поздовжніх зміщень ґрунту (див. п. 2.1) нам необхідно генерувати графіки додаткового зміщення ґрунту на наступних етапах навантаження. Передбачається, що для моделювання впливу історії з прийнятною точністю, достатньо 100-метрової різниці між положеннями шахтної виробітки. Вхідними даними для розрахунку напруженого стану трубопроводу за введеною процедурою є так звані надбавки до переміщень, які визначаються, як різниці між попередніми та наступними поздовжніми зміщеннями. Таким чином вводимо таке послідовне  $\Delta u_g^s(x)$ , починаючи з  $\Delta u_g^0(x)$ , (на рис. 4 показано як  $u_g(100)$ , тому що  $u_g(0) \equiv 0$ ), тоді  $\Delta_1 = \Delta u_g^1 = u_g(200) - u_g(100)$ ,  $\Delta_2 = \Delta u_g^2 = u_g(300) - u_g(200)$ , і так далі, аж до  $\Delta_9 = \Delta u_g^9 = u_g(1000) - u_g(900)$ .

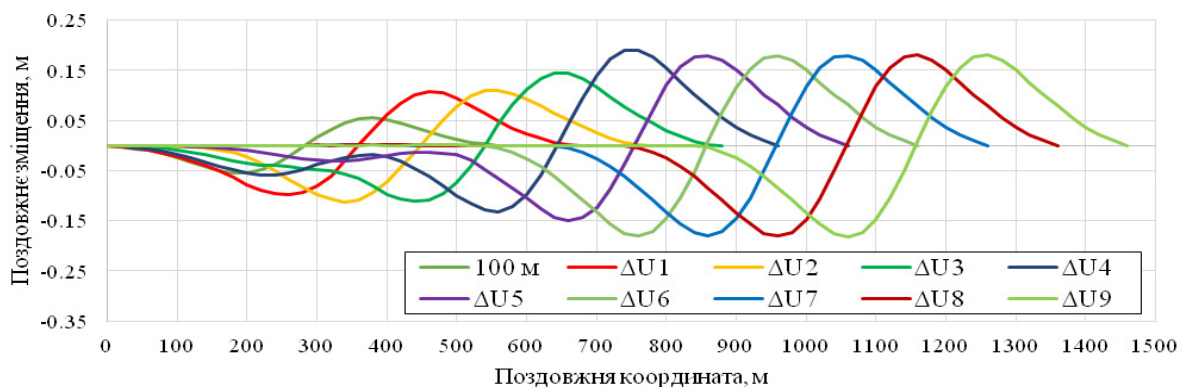


Рис. 4. Вхідні дані додаткових переміщень,  $\Delta u_g^s(x)$

Використовуючи значення зміщень ґрунту на різних етапах навантаження та застосовуючи обидва алгоритми (загальні для даного етапу, та для редагування процедури, пов'язаної з історією), ми можемо отримати повну картину розвитку напружень на різних етапах навантаження. Таким чином, знак і амплітуда навантаження можуть змінюватися з часом для кожної точки трубопроводу. Це необхідно враховувати при виборі заходів щодо зниження наслідків впливу зміщень ґрунту на трубопровід.

На рис. 5 представлено розподіл напружень вздовж осі газопроводу для різних часових кроків (довжин відпрацювання) з врахуванням динаміки розвитку поздовжніх зміщень в часі. Також на рис. 6 представлено результати окремих розрахунків напруженого стану газопроводу. В цьому випадку в якості вхідних даних використано прогнозні значення поздовжніх зміщень в результаті поступового відпрацювання лави (див. рис. 3). Відмітимо, що розбіжність результатів складає до 50 МПа (випадок повного відпрацювання лави – дистанція 1000м), що може бути критичним при формуванні підходів щодо забезпечення надійної експлуатації трубопроводів в зонах впливу шахтних виробіток.

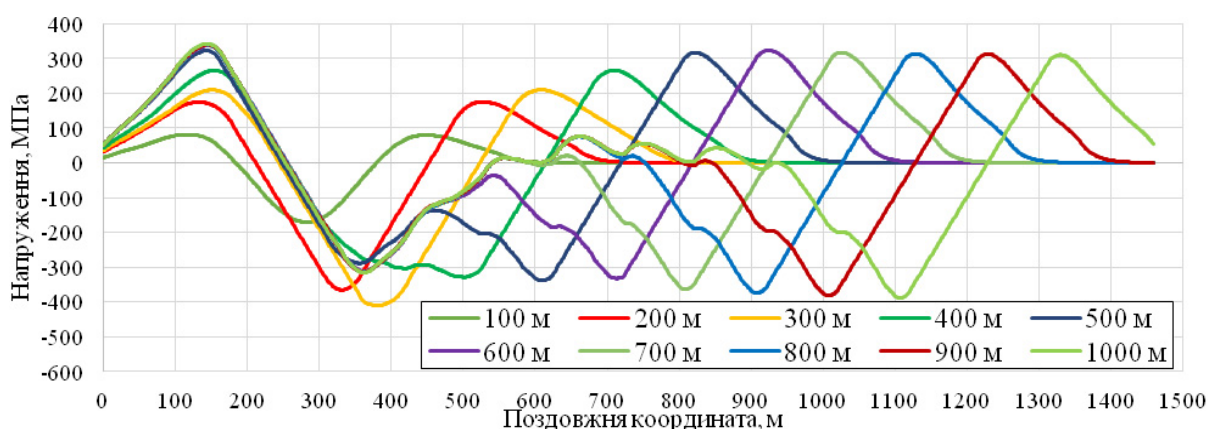


Рис. 5. Напружений стан з врахуванням історії

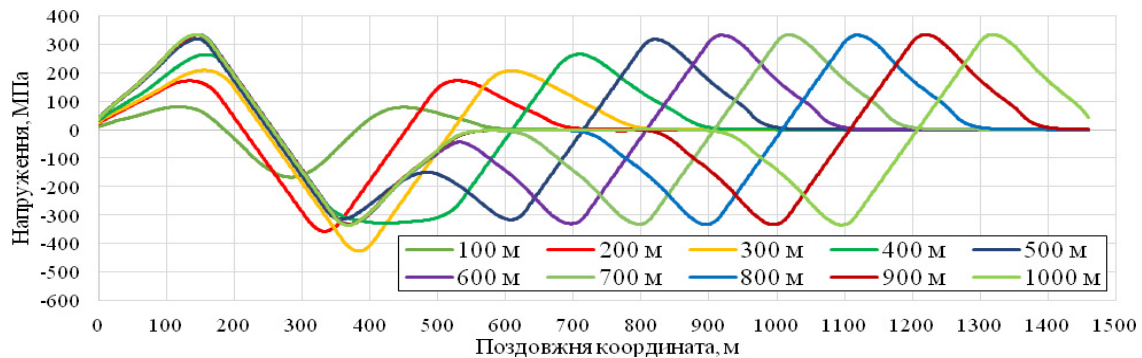


Рис. 6. Напружений стан для окремих положень вершини лави 1099

#### 4. Висновки

1. Запропоновано ефективний алгоритм розрахунку осьових сил та переміщень на основі понять базових та корекційних рішень. Основне рішення алгебраїчно корегується після кожної кроку ітерації для корекції рішення пропорційно, так званому, динамічному коефіцієнту управління збіжністю ітераційної процедури, значення якого може зменшуватися або зростати в залежності від розбіжності або збіжності наступних результатів.

2. Врахування історії розвитку поздовжніх зміщень ґрунту має важливе значення при поздовжньому взаємному розташуванні газопроводу та шахтної виробітки. Створено відповідний алгоритм для врахування історії навантаження, яке базується на понятті ефективного переміщення ґрунту, як суми досягнутого зсуву труби та поправки, яка пропорційна локальній силі взаємодії між трубопроводом та ґрунтом.

3. Виконано розрахунок для поздовжньо орієнтованого газопроводу. Результати розрахунку порівнювались з аналогічними результатами, отриманими для кожного часового кроку окремо. Розбіжність результатів складає до 50 МПа в залежності від часового кроку, що може бути критичним при формуванні підходів щодо забезпечення надійної експлуатації трубопроводів в зонах впливу шахтних виробіток.

## Влияние развития продольных смещений грунта на напряженное состояние подземных участков трубопроводов в зонах шахтных выработок

З.С. Ясковец, И.В. Орыняк

**Аннотация.** В статье рассматривается расчет напряженного состояния подземных трубопроводов в районах шахтных выработок. Разработан эффективный алгоритм расчета осевых деформаций и смещений на основе понятий базового и корректирующего решений. Базовое решение алгебраически исправляется после каждого шага итерации для решения коррекции, которое получается с помощью численно эффективного метода передаточной матрицы. Разработана численная итерационная процедура учета истории продольных перемещений грунта при выработке шахтных лав. Обнаружено, что игнорирование истории продольных перемещений грунта может привести к значительной недооценке напряженного состояния трубопровода.

**Ключевые слова:** смещение грунта, трубопровод, напряженное состояние, шахтная выработка

## The influence of sequence of alongside displacement of soil on stresses in buried pipeline in zone of mine subsidence

Z.S. Yaskovets, I.V. Orynyak

**Abstract.** The paper deals with stress-strain state calculation of buried pipelines in the areas of coal mining. The effective algorithm for axial strain and displacement calculation based on notions of basic and correction solution was developed. The basic solution is algebraically corrected after each iteration step for correction solution, which obtained by numerically efficient transfer matrix

*method. A numerical iterative procedure for taking into account of the history of longitudinal soil displacements during mining is developed. It was found that the ignoring of the history of longitudinal soil displacements can cause to a significant underestimation of the stress state of the pipeline.*

*Keywords: soil displacement, pipeline, stressed state, mine production*

## References

1. Guidelines for Constructing Natural Gas and Liquid Hydrocarbon Pipelines Through Areas Prone to Landslide and Subsidence Hazards// Pipeline Research Council International, Inc. Prepared by: C-CORE, D.G. Honegger Consulting, SSD, Inc. January 2009.
2. Dimitrios K. Karamitros, George D. Bouckovalas, George P. Kouretzis. Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings// Soil Dynamics and Earthquake Engineering. - 2007. - Vol. 27, № 3. - P. 200-211. ISSN 0267-7261.
3. Kennedy RP, Chow AW, Williamson RA. Fault movement effects on buried oil pipeline. Transport Eng J ASCE. -1977. - №103. С. 617–33.
4. ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering. Differential Ground Movement Effects on Buried Pipelines. Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline System. – 1984. – P.150–228.
5. Сакун М.Ю., Система спостережень та захисту магістральних газопроводів, які підробляються вуглевидобувними шахтами // Нафт. і газова пром-сть. - 2006. - №4. - С. 45-48.
6. American Lifelines Alliance. Guidelines for the design of buried steel pipe. July 2001 (with addenda through February 2005).
7. Ainbinder A.B., Strength and Stability Design of Main and Field Pipelines. A Handbook, 1991. Nedra, Moscow. Russian.
8. CISPM, Comprehensive and Integrated Subsidence Prediction Model, Morgantown, WV, Version 2.0 User's Manual, Department of Mining Engineering, College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University.
9. Luo Y.and Peng S., "Integrated Approach for Predicting Mining Subsidence in Hilly Terrain," Mining Engineering, June 1999.
10. Peng, S.S., 1992. Surface subsidence engineering, (Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc), 161 p.
11. Departmental Standard of Ukraine 101.00159226.001-2003. The rules for undermining of building, structures and natural objects at conventional extraction of coal/ Ukrainian Ministry of Fuel and Energy. Kiev 2004 – 127p.
12. C-CORE, 2008, Pipeline integrity for ground movement hazards, report prepared for Pipeline Research Council International and the U.S. Department of Transportation, C-CORE Report R-07-082-459.
13. Ориняк І.В., Ясковець З. С. Розрахунок напруженого стану підземних газопроводів в зонах шахтних виробіток з використанням методу функції внутрішнього // Проблеми міцності, 2018, (подано до друку).
14. Derby M.P., Saunders M.D., Zand B. Geotechnical Instrumentation: Monitoring Longitudinal Stress of a High Pressure Pipeline During Longwall Mining Operations — A Case Study in West Virginia. ASME. International Pipeline Conference, Volume 3: Operations, Monitoring and Maintenance; Materials and Joining :V003T04A017. doi:10.1115/IPC2016-64065.
15. Vazouras, P., Karamanos, S. A., and Dakoulas, P., 2012, “Mechanical Behavior of Buried Steel Pipes Crossing Active Strike-Slip Faults,” Soil Dyn. Earthquake Eng., 41, pp. 164–180.
16. Casamichele P, Maugeri M., Motta E. “Non-linear analysis of soil-pipeline interaction in unstable slopes”. XIII World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, August 1-6, 2004, Paper №. 3161.
17. Vazouras, P., Karamanos, S. A., and Dakoulas, P., “Finite Element Analysis of Buried Steel Pipelines Under Strike-Slip Fault Displacements,” Soil Dyn. Earthquake Eng. – 2010. Vol. 30, №11. - P. 1361–1376.
18. Оруняк, І.В., Богдан, А.В. Problem of large displacements of buried pipelines. Part 1. Working out a numerical procedure Strength of Materials. -2007. –Vol. 39, 257 p, <https://doi.org/10.1007/s11223-007-0032-2>
19. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы.// Нормы проектирования. – М.: Стройиздат, 1985.