

УДК 622.174.4

ВИЗНАЧЕННЯ КУТА ПРОГИНУ ТРУБОПРОВОДІВ В ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВАХ ЄМНІСНИМ МЕТОДОМ

© Ніколаєв О. В., Лютак З. П., 2002

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Описано методуку використання ємнісних перетворювачів для визначення кутів нахилу трубопроводу під дією навантажень та розроблена математична модель розрахунку його максимального прогину в залежності від зусиль, які діють на трубопровід або в ньому виникають.

Аналізуючи вплив чинників на зміну експлуатаційних параметрів технологічних вузлів підземного зберігання газу (ПСГ) приходимо до висновку, що більшість з них спричиняють тріщини і зміни в ґрунтових масах, які в свою чергу приводить до просідання фундаментів і зміни положення трубопроводів.

Внаслідок поперечного переміщення ґрунту може відбутися просідання фундаментів разом із технологічними вузлами чи зміщення трубопроводу, який пересувається разом з масивом землі, згинаючись за формою жорсткої нитки під дією навантаження ґрунту $q(x)$, і набуває додаткових напружень. Оскільки задача знаходження нахилу технологічного вузла є набагато простішою по відношенню до визначення зміни параметрів трубопроводу внаслідок зміщення, то розглянемо вплив різних чинників на трубопровід.

Задача полягає у визначенні розподілу нормальних напружень σ_H перерізу трубопроводу по його осі Ox

$$\sigma_H = f(x), \quad (1)$$

та проведенні розрахунку на міцність, згідно з четвертою теорією міцності [1]:

$$\sigma_{\text{сум}} = \sqrt{\sigma_H^2 + \sigma_K^2} + \sigma_H \cdot \sigma_K \leq [\sigma_{\text{дон}}], \quad (2)$$

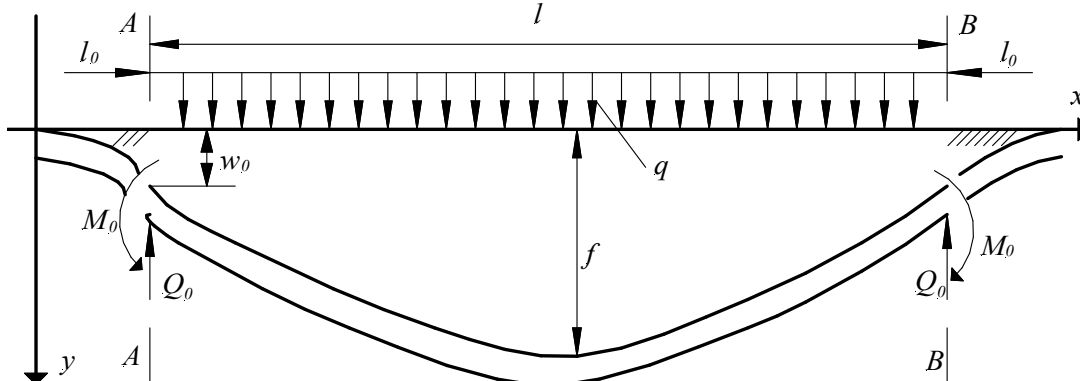


Рис. 1. Схема взаємодії трубопроводу з ґрунтом

де σ_K — кільцеві напруження, які регламентуються нормативними документами; $\sigma_{\text{дон}}$ — допустимі напруження для металу даної труби, які регламентуються технічними умовами експлуатації галузі.

Форма згину трубопроводу, в загальному, описується диференціальним рівнянням першого порядку [2]. В результаті проведення вимірювання кута нахилу трубопроводу ємнісними перетворювачами, встановлюється координата максимального прогину та конфігурація осі трубопроводу, довжина ділянки зсуву ґрунту.

Припустимо, що підземний трубопровід на ділянці АВ довжиною l згинається в вертикальній площині, як зображено на рис. 1. Посередині ділянки прогин трубопроводу є максимальним і рівним f . Вважаємо, що видовження труб відбувається за рахунок їх розтягу на ділянці АВ та ділянок l_0 , які прилягають до зони зсуву. Таким чином, крім силового тиску ґрунту на трубопровід, в ньому з'являється повздовжня розтягуюча сила P . Отже, в трубах до напружень, зумовлених внутрішнім тиском продукту, які враховані в проектних рішеннях, додаються і нормальні напруження від згину та розтягу, що є найбільш небезпечними, так як вони набути в процесі експлуатації. Розрахункова схема взаємодії трубопроводу з ґрунтом зображена на рис. 1.

Для складання диференціального рівняння згину трубопроводу на ділянці l врахуємо наступні припущення:

- довжина ділянки зсуву значно більша від величини прогину трубопроводу та його діаметру;
- викривлення трубопроводу може відбуватися як за рахунок його видовження в межах ділянки l , так і за рахунок ділянок, що прилягають до зони зсуву ґрунту;
- видовження трубопроводу може відбуватися і за рахунок усунення початкової "слабини", що утворюється при укладці;
- граничні умови на краях ділянки l визначаються роботою ділянок l_0 , які моделюються напівбесмежними балками, що зазнають згину в пружному середовищі, властивості якого характеризуються коефіцієнтами постелі k_0 ;
- швидкість зсуву ґрунту $v_{gr}(x)$ є однаковою на всій довжині ділянки AB .

Для визначення силового тиску ґрунту на трубопровід у зоні зсуву використаємо модельні представлення, запропоновані в роботах [2, 3]. Згідно з прийнятими припущеннями, диференціальне рівняння згину трубопроводу матиме вигляд:

$$EI_z \frac{d^2 y}{dx^2} = M_0 + P(y - w_0) - x \int_0^l \frac{q(x, v_0) d(x)}{2} + \int_0^x q(\zeta, v_0)(x - \zeta) d(\zeta), \quad (3)$$

де M_0 - згинний момент у перерізах $A-A$ і $B-B$; P - повздовжнє зусилля в перерізах $A-A$ і $B-B$; w_0 - прогин трубопроводу; $q(x, v_0), q(\zeta, v_0)$ - інтенсивність розподіленого навантаження в перерізах x, ζ ;

$EI_z = E\pi(D^4 - d^4)/64$ - жорсткість трубопроводу на згин; E - модуль Юнга матеріалу труби; D, d - зовнішній та внутрішній діаметри трубопроводу; x, y - координати; v_0 - швидкість руху ґрунту відносно трубопроводу.

Величини максимального прогину f трубопроводу та M_0, P, w_0, q є невідомими. Визначивши в результаті розв'язку задачі ці параметри можемо розрахувати максимальні напруження, які діють в трубопроводі. У результаті зсуву та просідання ґрунту трубопровід змінить своє положення від прямої лінії A_1A_3 довжиною l на криву з максимальним відхиленням від початкового положення в довільній точці A_f з координатами x_f та y_f (рис. 2).

Задачу визначення максимального прогину трубопроводу вирішимо наступним чином. Визначимо координату максимального прогину $A_f(x_f, y_f)$ трубопроводу.

Для цього по довжині трубопроводу встановлюється кілька ємнісних перетворювачів у вигляді

вимірювальних посудин на однакових віддальях, наприклад, $l/2$.

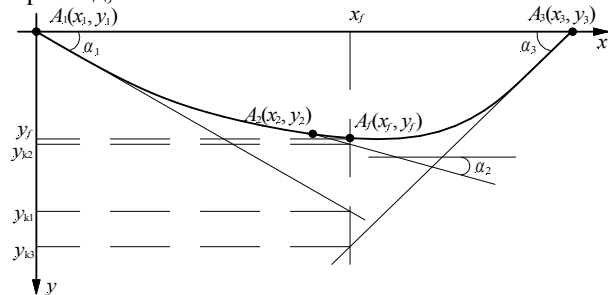


Рис. 2. Визначення найбільшого прогину

Після зміни положення трубопроводу вимірювальні посудини в точках контролю $A_1 - A_3$ змінять свій кут нахилу, а отже і ємність відносно горизонтальної площини (початкового положення) на кути $\alpha_1 - \alpha_3$ відповідно.

У геометричній інтерпретації, тангенс кута нахилу ємнісного перетворювача кривої дорівнює значенню похідної в даній точці, або кутовому коефіцієнту:

$$\operatorname{tg} \alpha_n = y'(x_n) = k_n, \quad (4)$$

що дозволяє скористатись методом половинного поділу відрізка для виявлення тієї половини, на якій знаходиться мінімум. Для цього аналізуємо вибрані три точки $A_1 - A_3$. Якщо в середній точці A_2 кутовий коефіцієнт рівний нулю, то в цій точці є мінімум. В загальному, будемо розглядати випадок, коли $k_2 \neq 0$. Тоді розглядаємо ту половину відрізка A_1A_3 , де кутові коефіцієнти мають різні знаки, а відрізок з однаковими знаками відкидаємо (наприклад, A_1A_2 , а залишається відрізок A_2A_3).

У вибраних точках відкладаємо нормально до осі Ox відрізки, які чисельно рівні кутовим коефіцієнтам. Оскільки рівняння похідної має форму прямої лінії, то пряма, яка сполучає кінці відкладених відрізків, перетинатиме вісь Ox в точці x_f максимального прогину. З подібності трикутників (рис. 3) визначимо x_f :

$$x_f = \frac{k_2 \cdot l}{2(k_2 + k_3)} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_2 \cdot l}{2(\operatorname{tg} \alpha_2 + \operatorname{tg} \alpha_3)}. \quad (5)$$

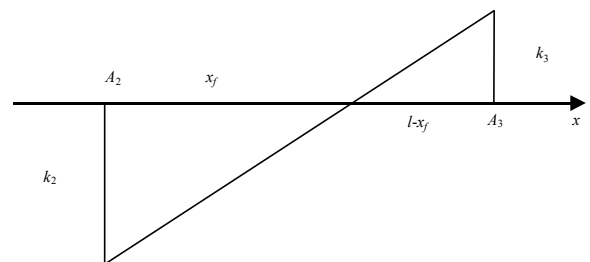


Рис. 3. Геометрична інтерпретація подібності трикутників для визначення точки найбільшого прогину трубопроводу

Таким чином, визначено координату x найбільшого прогину трубопроводу.

Для визначення координати y найбільшого прогину будуємо параболу через три точки контролю. Для цього з точок A_1 і A_3 проводимо дотичні з відомими кутовими коефіцієнтами, рівняння яких є такими:

$$y_{A1} = k_1 x_{A1} + C_{A1}, y_{A3} = k_3 x_{A3} + C_{A3}, \quad (6)$$

де C_{A1} і C_{A3} постійні, які знаходяться шляхом підстановки в рівняння (6) параметрів точок $A_1(0, 0)$, $A_3(l, 0)$ відповідно.

Визначимо y_{k1} та y_{k3} - точки перетину дотичних із прямою на відстані x_f , вибираємо з них більшу за значенням:

$$y_{kf} = \max(y_{k1}, y_{k3}), \quad (7)$$

оскільки вона буде найближчою до шуканої точки y_f .

Через точки $A_1(x_1, y_1)$, $A_{12}(x_f, y_{kf})$, $A_3(x_3, y_3)$ проводимо параболу:

$$y = ax^2 + bx + c, \quad (8)$$

де a , b , c - коефіцієнти, які визначимо за допомогою методу Крамера:

$$a = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad b = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad c = \frac{\Delta_3}{\Delta},$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_f^2 & x_f & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \end{vmatrix}, \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} y_1 & x_1 & 1 \\ y_{kf} & x_f & 1 \\ y_3 & x_3 & 1 \end{vmatrix}, \quad (9)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} x_1^2 & y_1 & 1 \\ x_f^2 & y_{kf} & 1 \\ x_3^2 & y_3 & 1 \end{vmatrix}, \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} x_1^2 & x_1 & y_1 \\ x_f^2 & x_f & y_{kf} \\ x_3^2 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}.$$

Мінімум параболи (8) знайдемо, прирівнюючи її похідну до нуля:

$$x_{\min}|y'=0 = -b/(2a). \quad (10)$$

Значення максимального прогину трубопроводу отримаємо, підставивши в рівняння параболи визначену координату x_{\min} :

$$y_f = ax_{\min}^2 + bx_{\min} + c. \quad (11)$$

Решту невідомих знаходимо із розв'язку диференціального рівняння.

Найнебезпечніший період для міцності трубопроводу настає тоді, коли швидкість поперечного руху труби у всіх перерізах дорівнює нулю, що відповідає рівномірному тиску по всій довжині контакту трубопроводу - ґрунт.

Для оцінки форми прогину трубопроводу побудуємо графік залежності (11). Криві, які описують положення трубопроводу при різних величинах максимального прогину y_f для наступних вхідних даних: $l=200$ м, $l_0=100$ м, $D=0,102$ м, $d=0,09$ м, $k_u=10^4$, матеріал трубопроводу сталь Ст10 зображені на рис. 4.

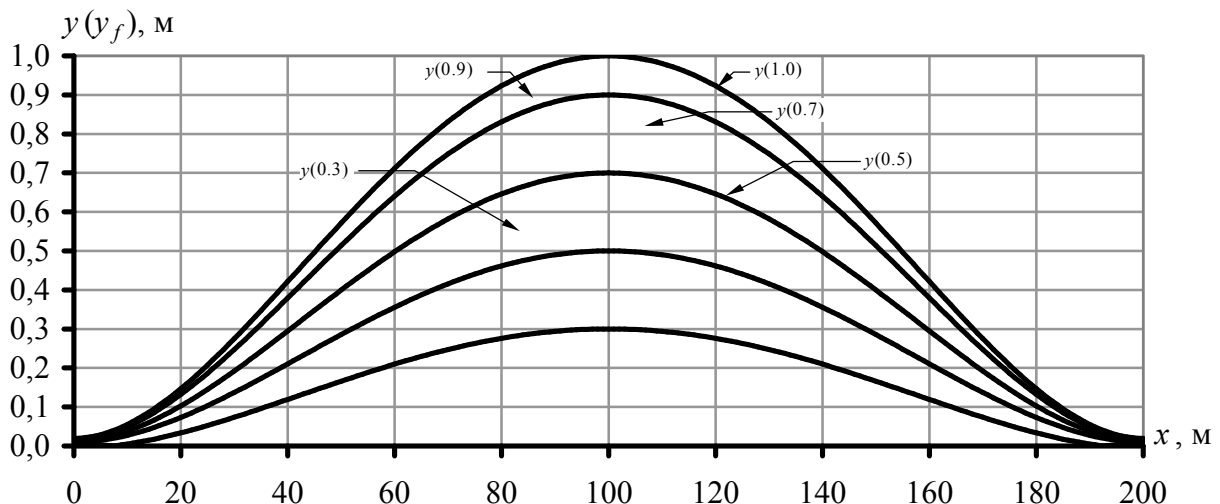


Рис. 4. Форма вигину трубопроводу

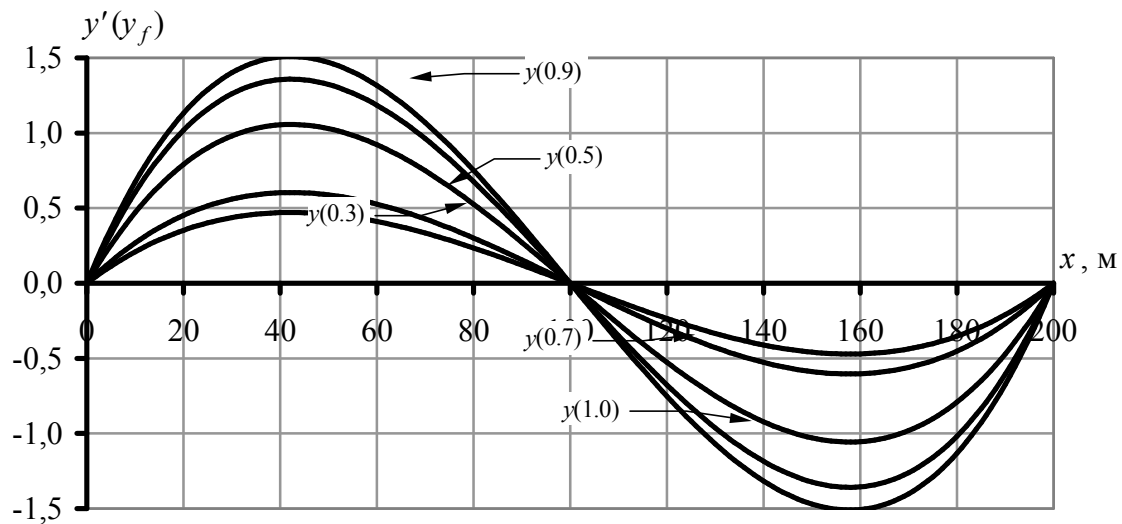


Рис. 5. Розподіл кута нахилу трубопроводу від максимального прогину

Згідно з розробленою моделлю, посередині ділянки зсуву отримано максимальний прогин. Для оцінки величини кута нахилу трубопроводу побудуємо графік розрахункової залежності $y'(x)$. Величина кута нахилу трубопроводу $y'(x)$ в межах досліджуваної ділянки при певних величинах прогину зображена на рис. 5.

В результаті розв'язку сформульованих задач отримані аналітичні залежності, які дозволяють вибрати параметри і визначити степінь їх впливу на зміну характеристик трубопроводів ПСГ в експлуатаційних умовах. Розроблена і математично обґрунтована модель дає можливість в експлуатаційних умовах через зміну просторового положення трубопроводу розрахувати в ньому розподіл напружень, оцінити і прогнозувати технічний стан ПСГ в ціло-

му. Доказано, що в межах максимального прогину вітки трубопроводу діаметром від 0 до 1000 мм ділянкою завдовжки до 100 м, кут її нахилу може змінюватися від 0 до 2 градусів.

1. Винокуров В. А., Куркин С. А., Николаев Г. А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / Под редакцией Б. Е. Патона. - М.: Машиностроение, 1986. - 576 с.
2. Гольденвейзер А. И. Теория тонких упругих оболочек. - М.: Недра, 1976. - 512 с.
3. Айнбиндер А. Б., Гильзин С. К. Напряженно-деформированное состояние подземного трубопровода, имеющего различные формы начального искривления. — В кн.: Строительство объектов нефтяной и газовой промышленности (ВНИИСТ, Тр., вып. 35), 1997.