

ВСТАНОВЛЕННЯ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПІДЗЕМНИХ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБ З ПУСТОТІЛОЮ (СТІЛЬНИКОВОЮ) БУДОВОЮ СТІНКИ

© Дорош М.І., 2012

Враховано вплив ґрунту на напружено-деформований стан поліетиленових труб з пустотілою (стільниковою) будовою стінки. На основі цього запропоновано співвідношення для встановлення величини укорочення вертикального діаметра підземних поліетиленових труб з пустотілою стільниковою будовою стінки. Встановлено рекомендації для забезпечення терміну надійної експлуатації таких труб, укладених у ґрунт.

Influence of soil is taken into account on the tensely-deformed state of polyethylene pipes with the hollow (cellular) structure of wall. On the basis of it correlation is offered for establishment of size of shortening of vertical diameter of underground polyethylene pipes with the hollow cellular structure of wall. Recommendations are set for providing of term of reliable exploitation of such pipes, celled in soil.

Актуальність теми. Під час будівництва низьконапірних промислових, зливових і каналізаційних мереж переважаючим стає використання полімерних матеріалів, особливо поліетилену. Дослідженнями встановлено, що очікуваний термін служби труб із поліетилену становить 50–100 років. Такі труби мають багато переваг порівняно з металевими. Проте полімерні труби великого діаметра із суцільним профілем стінки не забезпечують повною мірою оптимальної масомісткості. Тому необхідні розробки легших трубчастих конструкцій великого діаметра за заданої їх жорсткості. Зокрема такими є поліетиленові труби (рис. 1) з пустотілою (стільниковою) будовою стінки [1, 2]. Технологією виробництва цих труб є неперервний процес намотування на спеціальних пристроях-барабанах звичайних водопровідних поліетиленових трубок діаметром 20÷110 мм з одночасним екструзійним зварюванням їх між витками.

ґрунт, розміщений над підземною трубою, створює вертикальні навантаження та передає силу ваги наземного навантаження. Оскільки великогабаритним поліетиленовим трубам із пустотілою (стільниковою) будовою стінки притаманна гнучкість і еластичність, то під статичним навантаженням власної ваги ґрунту такі конструкції змінюють геометричні розміри, тобто набувають овальної форми у поперечному перерізі. Проте в результаті такої взаємодії виникає бічний відпір ґрунту, що є важливим чинником для забезпечення довготривалого збереження кругової форми конструкції. Отже, горизонтальний відпір потрібно обов'язково враховувати під час розрахунку та проектування розглядуваних конструкцій.



Рис. 1. Поліетиленова труба із пустотілою (стільниковою) будовою стінки

Огляд і аналіз літератури. Для забезпечення терміну надійної експлуатації полімерних низьконапірних трубопроводів великого діаметра, зокрема із пустотілою будовою стінки, першочерговим стає контроль величини їх початкових прогинів (укорочення вертикального діаметра). Загальноприйнято використовувати емпіричну формулу Шпенглера [3, 4]:

$$\frac{\Delta}{D} = \frac{C_1 q}{C_2 S_n + C_3 E'_s}, \quad (1)$$

де Δ – укорочення вертикального діаметра труби; q – інтенсивність вертикального навантаження ґрунту; D – серединний діаметр трубопроводу; S_n – кільцева жорсткість труби [4]; E'_s – січний модуль ґрунту; C_i ($i=1,2,3$) – сталі, однозначного вибору яких в літературі немає, причому для різних національних будівельних правил вони відмінні [4]. Згідно з [5] під час проектування полімерних гнучких трубопроводів великого діаметра із суцільним профілем стінки для забезпечення терміну надійної експлуатації допускається, що відносна деформація вертикального діаметра труби $\Delta/D \cdot 100\%$ не повинна перевищувати 3%. У той самий час у правилах СН 550-82 [6] приймається значення $\Delta/D \cdot 100\% \leq 5\%$. Однак такі стандарти не передбачали пустотілих стінок труб, які вважалися суцільними. Для встановлення того, який із стандартів є застосовним до стільникових труб, можна вибрати схему розрахунку.

Мета роботи – встановити напружено-деформований стан поліетиленових підземних труб з пустотілою будовою стінки та розробити рекомендації для забезпечення терміну надійної їх експлуатації.

Основний матеріал. Поліетилен є в'язкопружним матеріалом, поведінка якого у деформованому стані залежить від величини зовнішнього навантаження, температури та часу експлуатації. За тривалої дії зовнішніх зусиль конструкції з поліетилену руйнуються за напружень, величина яких є менша порівняно з межею плинності. Тому міцність конструкцій з поліетилену істотно залежить від часу дії зовнішніх зусиль та температури експлуатації. Відповідні дослідження міцності поліетиленових труб за дії внутрішнього гідростатичного тиску уможливили розроблення міжнародних стандартів [7, 8]. Допустимі навантаження на поліетиленові конструкції можна встановити з такої умови:

$$\max \sigma_i \leq MRS, \quad (2)$$

де $\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2}$ – інтенсивність напружень; σ_{ii} – головні напруження; MRS – мінімальна довготривала міцність [7, 8], тобто MRS – напруження, отримані екстраполяцією результатів випробувань поліетиленових труб на їхню стійкість до внутрішнього гідростатичного тиску на термін служби до 50 років. Переважно для виготовлення труб з пустотілою (стільниковою) будовою стінки використовуються поліетилен марки ПЕ-80 та ПЕ-100, для яких відповідно $MRS=8$ МПа та 10 МПа.

Для використання нерівності (2) необхідною стає оцінка напружено-деформованого стану довгої поліетиленової підземної труби з пустотілою (стільниковою) будовою стінки (рис. 2). Схему стінки такої труби показано на рис. 3.

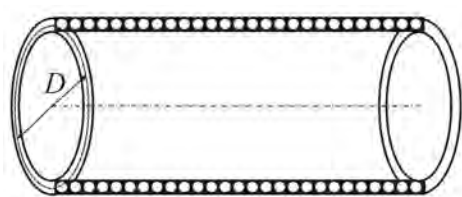


Рис. 2. Схема довгої одношарової стільникової труби

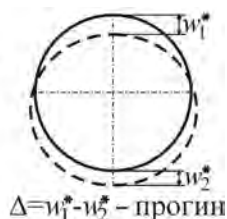


Рис. 3. Будова стінки труби

Рівняння рівноваги елемента розглядуваної труби має такий вигляд [9]:

$$\frac{\partial N}{\partial \varphi} - Q + Rq_2 = 0, \quad \frac{\partial Q}{\partial \varphi} + N + Rq_3 = 0, \quad \frac{1}{R} \frac{\partial M}{\partial \varphi} - Q = 0, \quad (3)$$

де N , Q та M – внутрішні сили; q_2 та q_3 – дотична та нормальна складові зовнішнього навантаження, викликаного вагою ґрунту та його бічною реакцією; φ – центральний кут; R – серединний радіус труби.

Залежність між згинальним моментом M та переміщеннями v та w є:

$$M = -D \left(\frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right), \quad (4)$$

а між поздовжньою силою N та переміщеннями v та w :

$$N = B \left(\frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial \varphi} - \frac{w}{R} \right), \quad (5)$$

де $D = \frac{d^3 E}{12(1-\nu^2)} [0,837 - 3\pi(1/2 - 1/sdr)^4]$ – циліндрична жорсткість стінки труби [10], а

$B = \frac{dE}{(1-\nu^2)} [0,933 - \pi(1/2 - 1/sdr)^2]$ – жорсткість на розтяг [10]. Тут $sdr = d/t = 10$; d – діаметр

поліетиленової трубки (рис. 3); t – її товщина; E та ν – відповідно модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона поліетилену.

Стільникова трубу розрахована для двох схем навантаження. За першою схемою (рис. 4) розглядалась дія вертикальних зусиль інтенсивності q із врахуванням реактивного тиску η з боку ґрунту. У другій схемі (рис. 4) передбачалось просідання труби у ґрунт.

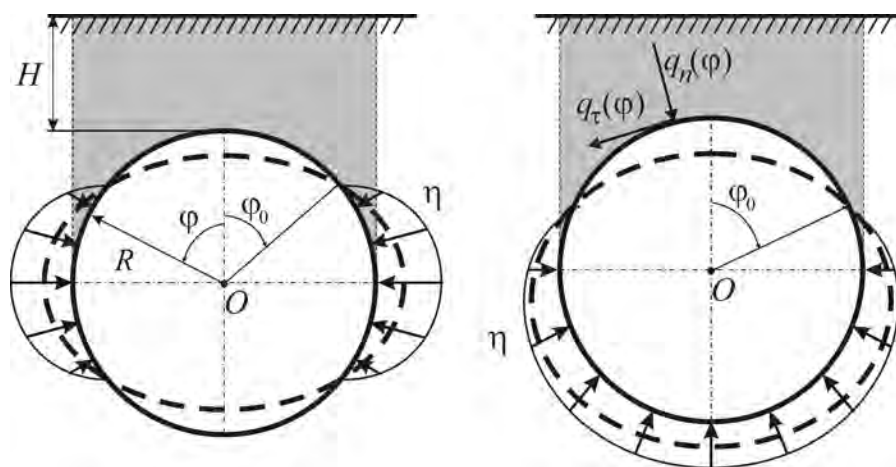


Рис. 4. Схема навантаження стільникової труби (поперечний переріз), де $q_n(\varphi)$ та $q_\tau(\varphi)$ – нормальна та дотична складові навантаження, викликані вертикальним тиском ґрунту q

Розподіл навантаження, спричиненого дією ваги ґрунту q на конструкцію, задавався за формулами:

$$q_n(\varphi) = q \cos^2 \varphi, \quad q_\tau(\varphi) = q \cos \varphi \sin \varphi, \quad (6)$$

причому для першої схеми навантаження (рис. 4, а) кут $\varphi \in [0, 2\pi]$, а для другої (рис. 4, б) $\varphi \in [-\pi/2, \pi/2]$; $q = \gamma(H + R(1 - \nu^2))$ – середнє значення вертикального тиску ґрунту; H – висота засипки ґрунту, γ – питома вага ґрунту.

Реактивний тиск з боку ґрунту подавали відповідно до моделі типу Вінклера, причому враховували “безвідпірні” зони [11]:

$$\eta(\varphi) = \begin{cases} k w(\varphi), & \text{коли } w(\varphi) \geq 0, \\ 0, & \text{коли } w(\varphi) < 0, \end{cases} \quad (7)$$

де w – радіальні переміщення; k – радіальний коефіцієнт відпору ґрунту, який згідно з розробками Гальоркіна та Шпенглера [3], можна визначити за співвідношенням $k = R^{-1} E'_s$. Тут E'_s – січний модуль ґрунту, значення якого залежить від типу ґрунту та його ущільнення [4, 5].

Дотична та нормальна складові зовнішнього навантаження q_2 та q_3 , що входять у рівняння (3) на основі співвідношень (6) та (7), є такими:

$$q_2 = -q_\tau \text{ та } q_3 = -q_n - \eta. \quad (8)$$

Розв'язок системи рівнянь (3)-(5) вибирали у вигляді одинарних рядів Фур'є та застосовували метод послідовних наближень [12]:

$$w(\varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n^t \cos n\varphi \quad v(\varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n^t \sin n\varphi, \quad (9)$$

причому відпір ґрунту задавали розвиненням

$$\eta(\varphi) = \sum_{n=0}^N \eta_n^t \cos n\varphi, \quad (10)$$

де коефіцієнти η_n^t приймали у вигляді [12]:

$$\eta_n^t = k C_n^t - k a_n \sum_{i=0}^{\infty} f_{ni} C_i^{t-1}, \quad (11)$$

де $t = 1 \dots T$, $C_i^0 = 0$, $f_{ni} = \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} \cos n\varphi \cos i\varphi d\varphi + \int_{\pi-\varphi_0}^{\pi+\varphi_0} \cos n\varphi \cos i\varphi d\varphi$ – для першої схеми наванта-

ження (рис. 4, а) та $f_{ni} = \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} \cos n\varphi \cos i\varphi d\varphi$ – для другої схеми навантаження (рис. 4, б);

$a_0 = 1/2\pi$ та $a_n = 1/\pi$ для $n \neq 0$. Кут φ_0 (рис. 4) визначали з умови $w(\varphi_0) = 0$.

Підставляючи розвинення (9)–(11) у систему диференціальних рівнянь (3)–(5) для t -го кроку ітерації, отримаємо коефіцієнти розвинень (9) у явному вигляді:

$$C_n^t = \frac{R^2}{n} \frac{n(R^2 B + D) \left(-q_n + k a_n \sum_{i=0}^{\infty} f_{ni} C_i^{t-1} \right) - (R^2 B + D n^2) q_\tau}{R^2 D k + R^4 B k + D B (n^2 - 1)^2}; \quad (12)$$

$$B_n^t = \frac{R^2}{n^2} \frac{n(R^2 B + D n^2) \left(q_n + k a_n \sum_{i=0}^{\infty} f_{ni} C_i^{t-1} \right) + (R^2 B + D n^4 + R^4 k) q_\tau}{R^2 D k + R^4 B k + D B (n^2 - 1)^2} \quad (13)$$

та $C_0^t = \frac{R^2}{B + R^2 k} \left(-q_n + k a_0 \sum_{i=0}^{\infty} f_{0i} C_i^{t-1} \right)$, $B_0^t = 0$.

Встановивши з рівнянь (4), (5) та співвідношень (12), (13) внутрішні сили N та M , можемо розрахувати нормальні розтягуючі або стискаючі напруження у кільцевому напрямку у стінці досліджуваної конструкції:

$$\sigma_{22}(\varphi, \alpha_3) = \left[\frac{N(\varphi)}{d} n_{22} - \frac{12M(\varphi)(\alpha_3 - z_c)}{d^3} m_{22} \right], \quad (14)$$

$$\text{де } n_{22} = [0,93 - \pi(1/2 - 1/sdr)^2]^{-1}, \quad m_{22} = [0,84 - 3\pi(1/2 - 1/sdr)^4]^{-1}$$

та $z_c = -0,12d [3,73 - \pi(1 - 2/sdr)^2]^{-1}$ – зміщення серединної поверхні у стінці труби з пустотілою (стільниковою) структурою. Інші компоненти напружень є незначними порівняно з визначеними. Тому ними знехтували.

У результаті проведених досліджень уможливується вибір та перенесення стандартів проектування поліетиленових труб із суцільною стінкою на труби порожнистої структури. Для схем навантажень стільникової конструкції за дії ґрунту (рис. 4) розрахунки зміни відносних прогинів (укорочення вертикального діаметра) стільникової труби $\Delta/D \cdot 100\%$ (суцільні лінії на рис. 5) проведено залежно від січного модуля ґрунту E'_s . Показані на рис. 5 результати були порівняні із розрахунками прогинів, отриманими за розробленими міжнародними будівельними стандартами (російським, німецьким, шведським) для суцільних поліетиленових труб (пунктирні лінії). Так, крива 2 відповідає розрахунку прогину за російським будівельним стандартом проектування підземних трубопроводів [4] згідно з формулою $\Delta/D = 0,11q(8S_n + 0,06E'_s)^{-1}$; крива 3 – за німецьким будівельним стандартом, де $\Delta/D = 0,1q(16S_n + 0,08E'_s)^{-1}$; крива 4 – за шведським та формулою $\Delta/D = 0,083q(16S_n + 0,122E'_s)^{-1}$.

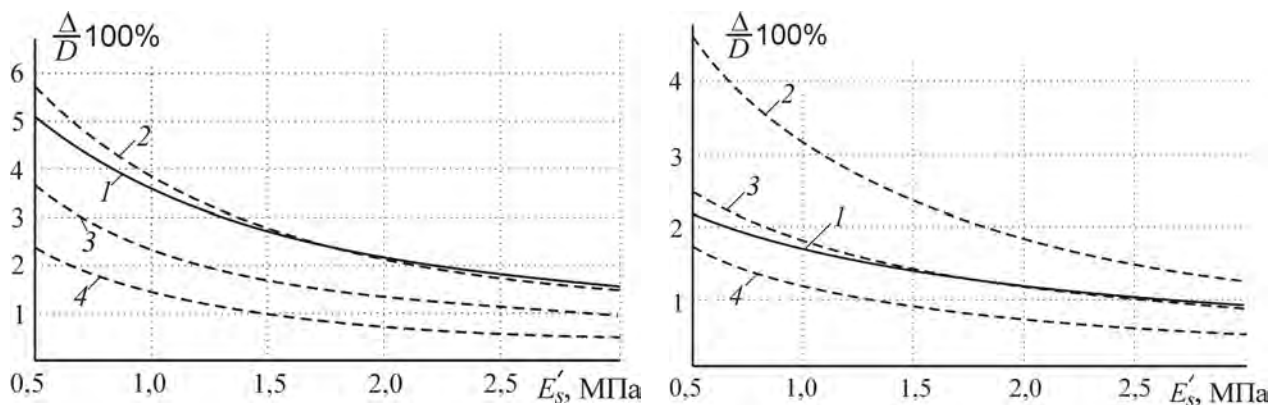


Рис. 5. Зміна відносного прогину $\Delta/D \cdot 100\%$ довгої стільникової труби від січного модуля ґрунту E'_s :
а – розрахунки, проведені для першої схеми навантаження (див. рис. 4, а); б – для другої схеми

Тут $\Delta = |w(0) - w(\pi)|$ – прогин труби; $S_n = EI/D^3$ – кільцева жорсткість (базовий класифікатор підземних полімерних труб великого діаметра: $S_n = 2,4,8$ кПа), де I – момент інерції стінки стільникової труби на метр довжини; D – середній діаметр труби. Виявилось, що для першої схеми навантаження (рис. 4, а) найбільшим є збіг з російським стандартом. У разі другої схеми (рис. 4, б) найбільшим є німецький стандарт.

Використовуючи вищедержані результати теоретичного характеру, можемо сформулювати відповідні рекомендації для встановлення надійного періоду експлуатації поліетиленових труб з пустотілою (стільниковою) будовою стінки. Для цього необхідно виконати нерівності (2).

Напруження σ_{22} розраховували за співвідношенням (14) залежно від січного модуля ґрунту E'_s для нескінченно довгої стільникової труби (рис. 6).

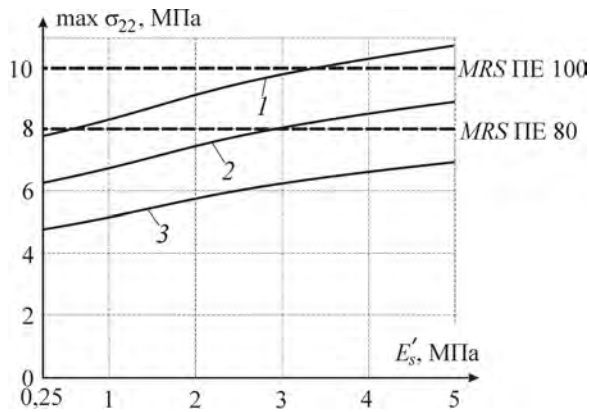


Рис. 6. Значення максимальних напружень σ_{22} залежно від січного модуля ґрунту E'_s за кільцевої жорсткості $S_n=8$ кПа

У розрахунках приймаємо, що відносний прогин труби $\Delta/D100$ % у першому випадку не перевищує шести відсотків (крива 1), у другому – п'яти (крива 2) та у третьому – чотирьох відсотків (крива 3). З показаних на рис. 6 графіків перевіряємо виконання критеріального співвідношення (2). Наприклад, якщо беремо поліетилен ПЕ-100 з $MRS=10$, то нерівність (2) виконуватиметься за умови

$$\frac{\Delta}{D}100\% \leq 5\%, \quad (15)$$

у випадку ПЕ-80 ($MRS = 8$) – за умови

$$\frac{\Delta}{D}100\% \leq 4\%. \quad (16)$$

Прогин стільникової труби визначаємо з формули

$$\frac{\Delta}{D} = \frac{0,11q}{8S_n + 0,06E'_s}, \quad (17)$$

що відповідає російському будівельному стандарту.

З аналізу формул (15)–(17) випливає, що міцність стільникових труб, укладених у ґрунт, значною мірою залежить від типу ґрунту та якості його ущільнення.

Висновки. Досліджено вплив ґрунтів на напружено-деформований стан поліетиленових труб з пустотілою будовою стінки. У результаті встановлено, що для розрахунку прогинів потрібно користуватись російським стандартом у разі жорсткої основи траншеї. Коли труби мають м'яке ґрунтове усадження, їх розрахунок та проектування потрібно проводити згідно з німецьким будівельним стандартом. Відповідно критичне значення відносного прогину поліетиленової труби з пустотілою будовою стінки становить 5 % для марки поліетилену ПЕ-100 та 4 % – для ПЕ-80.

1. Корпорация «Энергоресурс-инвест» представляет новую технологию производства крупногабаритных полимерных изделий с пустотелой (сотовой) конструкцией стенки // Полимерные трубы. – 2007. – № 2. – С. 6–7. 2. Великогабаритні полімерні конструкції з пустотілою (стільниковою) будовою стінки // Вода і водоочисні технології. – 2008. – № 5. – С. 65–66. 3. Балсон Ф.С. Загубленные сооружения: статическая и динамическая прочность / пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1991. – 240 с. 4. Швабауэр В.В., Гвоздев И.В. Расчет подземного трубопровода из термопластов // Полимерные трубы. – 2007. – № 3. – С. 52–56. 5. Jonson L. E. Plastic pipes for water supply and sewage disposal // Borealis. – 1996. – 156 p. 6. СН 550-82. Инструкция по проектированию технологических трубопроводов из пластмассовых труб. 7. ISO 9080:2003. Plastic piping and ducting systems – Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation. 8. ISO 12162:1995. Thermoplastics materials for pipes and fittings for pressure application – Classification and designation – Overall service (design) coefficient. 9. Гольденвейзер А.Л. Теория упругих тонких оболочек. – 2-е изд. – М.: Наука, 1976. – 512 с. 10. Максимук О.В., Стацук М.Г., Дорош М.І. Розрахунок стільникового полімерного трубопроводу, підкріпленого періодичною системою пружних шпангоутів // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 2009. – № 2. – С. 135–143. 11. Виноградов С.В. Расчет подземных трубопроводов на внешние нагрузки. – М.: Стройиздат, 1980. – 135 с. 12. Стацук М.Г., Дорош М.І. Розрахунок стільникових трубопроводів великого діаметра в неоднорідному ґрунтовому середовищі // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – № 6. – С. 47–50.