

**ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ НЕРІВНОМІРНИХ
ОСІДАНЬ ТРУБОПРОВОДУ У ПРОСАДОЧНИХ ҐРУНТАХ**

С.Ф.Пічугін, д.т.н., професор, П.Ю.Винников, аспірант

*Полтавський національний технічний університет імені
Юрія Кондратюка, Україна*

Постановка проблеми у загальному вигляді. У конструкції магістрального трубопроводу діють кільцеві σ_h та поздовжні напруження σ_l . Кільцеві напруження знаходяться за формулою

$$\sigma_h = \frac{nPD_{in}}{2t}, \quad (1)$$

де P – робочий (нормативний) тиск у трубі; n – коефіцієнт надійності за внутрішнім тиском [1 – 3]; D_{in} – внутрішній діаметр труби; t – товщина стінки трубопроводу.

Визначення товщини стінки трубопроводу за нормами різних країн майже не відрізняється. Розрахунок ведеться з умови неперевищення кільцевими напруженнями σ_h межі текучості матеріалу трубопроводу R_y з урахуванням коефіцієнтів надійності [1 – 3]:

$$\sigma_h \leq \gamma_i R_y, \quad (2)$$

де γ_i – коефіцієнти надійності, встановлені відповідними нормами.

Величина поздовжніх напружень у трубопроводі визначається трьома параметрами: внутрішнім тиском, впливом температурних деформацій та напружень від згину трубопроводу

$$\sigma_l = \mu\sigma_h \pm \alpha E_p \Delta t \pm \sigma_{bend}, \quad (3)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона матеріалу трубопроводу; α – коефіцієнт лінійного розширення металу труби; E_p – модуль деформації сталі; Δt – розрахунковий температурний перепад; σ_{bend} – згинальні напруження у трубопроводі.

Останні складаються з напружень, викликаних пружним згином ділянок трубопроводу, а також напружень, які викликані нерівномірними деформаціями ґрунтової основи трубопроводу σ_{dif}

$$\sigma_{bend} = \pm \frac{E_p D_{ex}}{2\rho} \pm \sigma_{dif}, \quad (4)$$

Де D_{ex} – зовнішній діаметр труби; ρ – радіус кривизни осі трубопроводу, його максимальне значення регламентовано нормами [2].

Аналіз останніх досліджень і виділення не розв’язаних раніше частин загальної проблеми. Кільцеві, температурні та напруження від вигину проаналізовані в Українських та закордонних нормах [2 – 3]. Менш досліджені напруження від нерівномірних деформацій основи трубопроводу σ_{dif} [4 – 5]. Слід розрізнити, у яких ґрунтових умовах необхідно враховувати вплив деформацій основи, наприклад, для трубопроводів, які прокладені у мілких однорідних пісках значення напружень від нерівномірного осідання не перевищує 15 МПа [6].

Значні нерівномірні осідання основи трубопроводу характерні для нестандартних умов прокладання, таких як: заболочені та підтоплені території; території з підземними пустотами різноманітного характеру (підроблюванні території, зони шахтного будівництва, території з карстовими пустотами та ін.); зони вічномерзлих ґрунтів; зсувонебезпечні території; сейсмонебезпечні зони [4 – 5].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття. Для України однією з найпоширеніших є проблема лесових просадочних ґрунтів, оскільки вони займають 65 – 70% території. Особливо гострою ця проблема є для південних районів, де просадочна товща складає 45...50 м, а величина просадок від власної ваги ґрунту може досягати 1...2 м [7]. Між тим у більшості програмних комплексів відсутні моделі, які описують нелінійні деформації лесового ґрунту внаслідок локального замочування від власної ваги та додаткового навантаження.

Тому **метою роботи** є обґрунтування білінійної та мультилінійної моделі деформації просадочного ґрунту для оцінювання нерівномірних осідань трубопроводів.

Викладення основного матеріалу досліджень. Взаємодія трубопроводу з основою зазвичай моделюється балкою на пружній Вінклерівській основі [4, 6]. Ґрунт виступає у вигляді просторових пружних в’язей, що обмежують переміщення труби. Опір переміщенням залежить від модуля деформації ґрунту E_s . Але у даній постановці

можливо розглядати лише трубопровід у ґрунтах без особливих властивостей, де осідання прямопропорційні опору ґрунту основи.

Просадочні ґрунти у природному стані є достатньо надійною основою, але унаслідок їх замочування характеристики міцності та деформативності суттєво знижуються, в результаті чого можливе просідання ґрунту, навіть, від його власної ваги [7 – 9].

Використання складних моделей ґрунту призводить до значного ускладнення розрахунків. Тому доцільно використовувати метод скінчених елементів (МСЕ). Оскільки розв'язок даної задачі потребує урахування фізичної та геометричної нелінійності, пропонується використовувати програмний комплекс Ansys.

Просідання ґрунту відбувається внаслідок локального замокання [9]. Джерела замокання можуть бути точкові чи майданчикові. Трубопроводи прокладають переважно далеко від житлових пунктів, отже замокання обмежується наступними джерелами: зрошувальні території, перетини трубопроводів з підземними комунікаціями (каналізаційними колекторами, водопроводами), надземними та підземними зрошувальними системами.

Розглянемо інженерно-геологічний розріз, характерний для Чорнухінського лесового плато Полтавської області (рис. 1, а). Розріз складено такими ґрунтами: ІГЕ - 1 – суглинок гумусований; ІГЕ - 2 – суглинок лесовий; ІГЕ - 3 – суглинок лесовий; ІГЕ - 4 – суглинок; ІГЕ - 5 – суглинок. Відповідні характеристики ґрунтів наведено в табл. 1.

Значні труднощі при складанні скінченоелементної (СЕ) моделі виникають з обґрунтуванням стисливої товщі під трубою. У ґрунтах без особливих властивостей інженерно-геологічні вишукування проводять на метр нижче від проектної позначки підошви трубопроводу, але для посадочних ґрунтів слід визначити характеристики усіх шарів, здатних до просідання. Тому у даній задачі є сенс обмежити стисливу товщу покрівлю шару, де відсутні просадочні властивості (ІГЕ - 5, рис. 1, б).

На рис. 1, а зображено перетин трубопроводу з точковим джерелом замокання. Зона замокання розповсюджується згори до низу у вигляді конусу, кут нахилу утворюючої якого, у лесових суглинках складає $\beta=45^{\circ}-55^{\circ}$ [8]. Отже, можливо призначити довжину масиву, яку розглядають у розрахунках – 30 м. Моделювання показало, що близько 5 мкінцевої ділянки ґрунту у природному стані достатньо для фіксування трубопроводу і подальше збільшення довжини профілю не впливає на отримані результати. Ширину масиву ґрунту прийемо 3 м. На розглядуванурозрахункову область накладено в'язі, які моделюють вплив оточуючого ґрунту (рис. 1, в).

Таблиця 1. - Характеристики суглинків Чорнухінського лесового плато

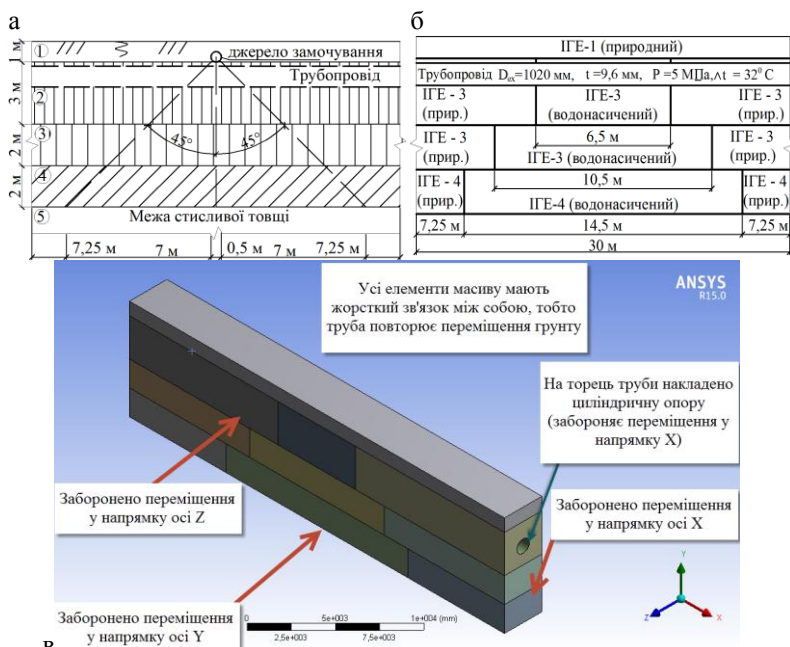
Характеристики ґрунту		ПГЕ - 1	ПГЕ - 2	ПГЕ - 3	ПГЕ - 4	ПГЕ - 5
Товщина шару, h , м		1,0	3,0	2,0	2,0	-
Щільність ґрунту, ρ , кг/м^3		1500	1500	1670	1740	1810
Щільність скелету ґрунту, ρ_d , кг/м^3		-	1310	1420	1470	1570
Щільність водонасиченого ґрунту, ρ_{sat} , кг/м^3		-	1770	1840	1870	-
Коефіцієнт пористості, e		-	1,05	0,89	0,84	0,69
Відносна просадочність, ε_{sb} , %, при тиску, p , МПа	0,05	-	1,4	0,5	0,3	-
	0,10	-	2,5	0,9	0,6	-
	0,20	-	4,4	1,5	1,0	-
	0,30	-	5,5	1,9	1,3	-
Модуль деформації ґрунту у природному стані, E_s , МПа		-	8	12	14	17
Коефіцієнт Пуассона, μ	у природному стані	-	0,37	0,36	0,35	-
	у водонасиченому стані,	-	0,45	0,41	0,4	-

Ґрунт моделюється у природньому та замоченому стані. Оскільки напруження під трубою приблизно дорівнюють напруженням від власної ваги ґрунту, то осідання на ділянках природного стану ґрунту мають наближатися до нуля. Однак, якщо задати діаграму залежності «тиск p – відносні деформації ε » у лінійній постановці із використанням лише модуля деформації E_s , елементи деформуватимуться під дією сили тяжіння, тому необхідно ввести параметр, який нівелює осідання від власної ваги ґрунту. Доцільно використати структурну міцність ґрунту p_{str} . Для ПГЕ - 2 у природному стані значення $p_{\text{str}} = 32$ кПа (рис. 2, 1), тому при зростанні навантаження можливо використовувати лінійну залежність між напруженнями у товщі ґрунту та осіданнями.

Більш точно деформаційні властивості просадочного ґрунту можливо описати за допомогою мультилінійної діаграми залежності «тиск p – відносні деформації ε_{sb} » (рис. 2, 3), яку отримують при випробуваннях ґрунту природної структури у приладі одноосьового стиску. На рис. 2 чітко видно, що деформативність замоченого ґрунту значно вища, ніж у ґрунту в природному стані.

Використання мультилінійної моделі не завжди можливе, тому доцільно використовувати білінійну (рис. 2, 2). Основні параметри цієї моделі: модуль деформації ґрунту у замоченому стані (табл. 1), тиск у

середині і-го шару ґрунту. Сучасні моделі ґрунту, зокрема Кулона-Мора, Soilhardeningmodel та ін. [9], додатково використовують характеристики міцності ґрунту – кут внутрішнього тертя φ та питоме зчеплення c . Хоча ґрунт деформується нелінійно, але у ньому відсутні зони пластичних деформацій, отже для даної конкретної задачі можливо не враховувати характеристиками міцності ґрунту.



в
Рис. 1 – Трубопровід у масиві лесового просадочного ґрунту
а – інженерно-геологічний розріз, б – поділ масиву ґрунту на структурні елементи; в – СЕ модель масиву в Ansys

Слід зазначити, що у даній постановці доцільно призначати товщину шару не більше 2 м, оскільки при більшій товщині результати розрахунку за білінійною та мультілінійною моделями суттєво відрізнятимуться. Дане обмеження корелюється з практикою відбору зразків просадочного ґрунту при інженерно-геологічних вишукуваннях.

У розрахунках прийнято гіпотезу, що деформації трубопроводу еквівалентні деформаціям ґрунту під трубою [5]. Геометричні характеристики обраної ділянки трубопроводу $D_{ex} = 1020$ мм, товщина стінки $t = 9,6$ мм. Внутрішній робочий тиск $P = 4,9$ МПа [10]. Особливої уваги

заслугує обґрунтування величини розрахункового температурного перепаду, ми пропонуємо її визначати як різницю середнього місячного максимуму температури поверхні ґрунту $t_{сер.макс. зр} = 42^{\circ}C$ [11] та середньої температури трубопроводу з урахуванням температури ґрунту та температури продукту, що транспортується $t_{тр} \approx 8-12^{\circ}C$, отже величина температурного перепаду $\Delta t = 32^{\circ}C$. Труби виготовлено зі сталі класу К55, $R_y = 410$ МПа [10].

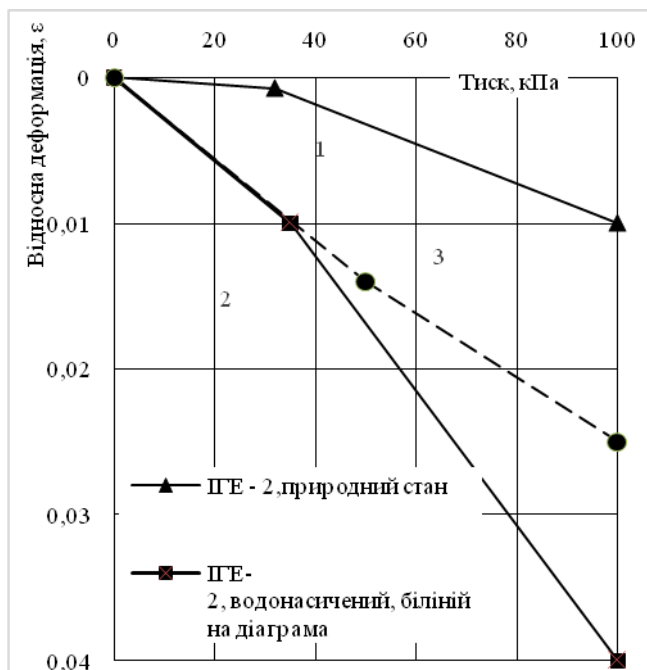


Рис. 2 – Діаграми залежності «тиск р – відносні деформації ε» для ПГЕ - 2 у природному (1) та замкломому стані (2, 3)

Величини деформацій, при розрахунках в Ansys, із використанням обох моделей лесового водонасиченого ґрунту однакові. Результати розрахунку (рис. 3): просідання ґрунту під трубою у середині досліджуваного масиву склали 29,8 мм, осідання трубопроводу, на ділянках, де основою є ґрунту природної структури, склали близько 1,8 мм, нерівномірність осідань 28 мм. Кільцеві напруження склали 268 МПа, що точно відповідає (1) поздовжні напруження склали 230 МПа. Користуючись (3), можливо легко визначити значення поздовжніх напру-

жень, які викликані нерівномірними деформаціями основи – $\sigma_I=69$ МПа.

Слід зазначити, що величина просадочної товщі, а також механічні властивості просадочного ґрунту можуть суттєво відрізнитися, відповідно отримані результати слід вважати оцінками для конкретних ґрунтових умов.

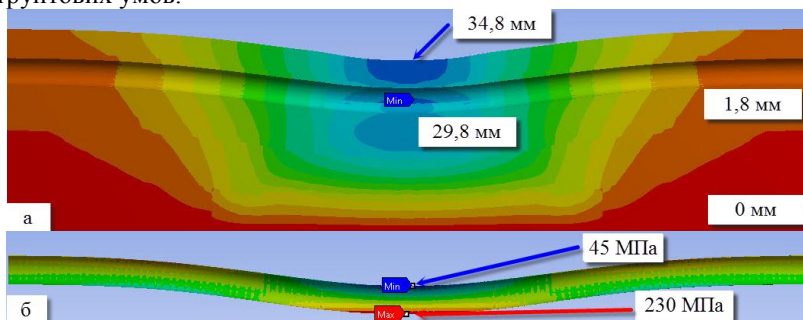


Рис. 3 – Результати моделювання, а – осідання ділянки трубопроводу у масиві просадочного ґрунту з локальним замочуванням; б – поздовжні напруження у трубопроводі

Отже, за проведеними дослідженнями можна зробити такі **висновки**. При визначенні деформацій трубопроводу у просадочних ґрунтах необхідно брати до розгляду усю просадочну товщу. Білінійна модель лесового просадочного суглинку у природному стані, із врахуванням структурної міцності, дозволяє виключити з розрахунків осідання ґрунту від власної ваги.

Білінійна модель лесового просадочного суглинку у водонасиченому стані дозволяє спростити розрахунки порівняно з мультилінійною моделлю, без втрати точності.

Для розглянутого прикладу локального замочування ділянки основи трубопроводу нерівномірні осідання склали 28 мм, що менше за допустимі – 100 мм [3], значення поздовжніх напружень, викликаних нерівномірними деформаціями основи, $\sigma_I=69$ МПа, що свідчить про значний вплив нерівномірних деформацій на міцність та надійність трубопроводу навіть при незначних просіданнях основи.

Summary

This paper discusses features of the soil bilinear and multilinear deformation models applying in the loessial collapsible strata. Soil is considered in dry and water saturated condition. Respective hoop and longitudinal stresses are obtained.

Література

1. YongBaiPipelinesandrisers / YongBai. – USA, Oxford: Elsevier, 2001. – 495 P. **2.** СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 52 с. **3.** EN 1993-4-3 (2007) (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 4-3: Pipelines [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. – 44 p. **4.** Орыняк И.В. Проблема больших перемещений подземных трубопроводов. Сообщение 1. Разработка численной процедуры / И.В. Орыняк, А.В. Богдан // Зб. наук. пр. Інститут проблем прочності ім. Г.С.Писаренко НАН України: Проблеми прочності. – №3. – 2007. С. 51 – 74. **5.** Расчет и обеспечение прочности трубопроводов в сложных инженерно-геологических условиях. Т. 1 / А.М. Шаммазов, Р.М. Зарипов, В.А. Чичелов и др. – М.: Интер, 2005. – 706 с.: илл. 191 ISBN 5-98761-006-0 **6.** Пічугін С.Ф. Розрахунок рівня надійності лінійної частини підземних магістральних трубопроводів / С.Ф. Пічугін, П.Ю. Винников // Зб. наук. праць (галузеве машинобуд., буд-во) / Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. Вип. 1 (40). – Полтава: ПНТУ, 2014. – С. 109 – 119. **7.** Жук В.В. Методика моделювання спільної роботи каркасної будівлі з лесовою просідаючою основою / В.В. Жук, В.О. Сахаров, М.В. Корнієнко // Основи і фундаменти: Міжв. наук.-техн. зб.– К.: КНУБА – 2006. – Вип. 30. – С. 39 - 46 **8.** Крутов В.И. Проектирование и устройство оснований и фундаментов на просадочных грунтах / В.И. Крутов, А.С.Ковалев, В.А. Ковалев. – М.: Издаиельство АСВ, 2013. – 544 с. **9.** Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти: Підручник / М.Л. Зоценко та ін. – Полтава: ПНТУ, 2004. – 568 с. **10.** Кінаш Р.І. Температурний режим повітря і ґрунту в Україні / Р.І. Кінаш, О.М. Бурнаєв. – Львів: Видавництво науково-технічної літератури, 2001. – 800с. **11.** Pichugin, S. Methodforreliabilityestimationofthemainpipelinesteelworkstructure / S. Pichugin, O. Zuma // Металеві конструкції. – Том 20. – № 2. – Макіївка, 2014. – С. 77 – 87.