

ВЕРИФІКАЦІЯ ІМОВІРНІСНОЇ МОДЕЛІ ДЕФОРМАЦІЇ ТРУБОПРОВОДУ В ОСОБЛИВИХ ҐРУНТОВИХ УМОВАХ

Пічугін С.Ф., Винников П.Ю.

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка
м. Полтава, Україна

АНОТАЦІЯ: Розглядається використання лінійної моделі деформації ґрунту до оцінки міцності та надійності трубопроводу під час локального замочування лесової просадочної товщі. Проведено верифікацію результатів моделювання з позицій жорсткості трубопроводу. Доведено релевантність гіпотези, що деформації трубопроводу еквівалентні деформаціям ґрунту основи.

АННОТАЦИЯ: Представлено использование линейной модели деформации грунта к оценке прочности и надежности трубопровода во время локального замачивания лёссовой просадочной толщи. Произведено верификацию результатов численного моделирования с позиций жёсткости трубопровода. Доказана релевантность гипотезы о равенстве деформаций трубопровода и грунта основания.

ABSTRACT: This paper discusses applying of the soil linear deformation behavior for pipeline strength and reliability estimation in the area of the loess collapsible soil local soaking. Modeling results verification were performed from position of pipeline stiffness. Hypothesis that pipeline deformations are equal to the deformations of the soil base is confirmed.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: жорсткість трубопроводу, лесова просадочна основа, поздовжні напруження.

ВСТУП

Визначення напружень, які викликані нерівномірними осіданнями ґрунту, достатньо суперечлива задача. Певні джерела відкидають важливість нерівномірних деформацій ґрунту у вертикальній площині «вниз», за

їхніми даними відповідні напруження фактично не впливають на міцність трубопроводу [1]. Оскільки різні дослідники розв'язують поставлену задачу різними способами, при цьому розглядаються абсолютно різні розрахункові схеми. Систематизуючи існуючий досвід, можливо виділити три основні розрахункові схеми взаємодії трубопроводу з оточуючим ґрунтом:

- трубопровід як балка на пружній Вінклерівській основі [1 – 4], зокрема і у імовірнісній постановці [5].

- аналіз граничних випадків, коли ґрунт під трубою відсутній повністю [6].

- аналіз НДС трубопроводу з урахуванням усіх фізичних та геометричних особливостей масиву ґрунту навколо трубопроводу, моделювання МСЕ [7].

Проблема визначення напружень у трубопроводі саме від просадочних деформацій є фактично недослідженою. Для коректної оцінки можливих напружень, що виникають у трубопроводі у наслідок нерівномірних просадочних деформацій основи доцільно використовувати сучасні програмні комплекси [7], але досить часто отримані результати важко оцінити. Головною проблемою є чітке розуміння роботи системи «лінійна частина магістрального трубопроводу (ЛЧМТ) – ґрунтова основа» [2, 3]. Зазвичай у розрахунках приймається гіпотеза, що деформації трубопроводу еквівалентні деформаціям ґрунту основи. Отже, тип контакту між ЛЧМТ та основою – Bonded (жорстко зв'язаний) [1, 5, 6].

Використовуючи розповсюджену модель балки на пружній основі, маємо дію ваги трубопроводу з засипкою, що викликає осідання основи. Але особливістю деформацій системи «ЛЧМТ – ґрунтова основа» при просадочних процесах є зменшення об'єму ґрунту внаслідок замкання [8], що призводить до деформації труби, тобто ґрунт «тягне» за собою трубу. Постає важливе питання про коректне врахування жорсткості трубопроводу при моделюванні. Дане зауваження особливо важливе для точкових джерел замочування та площадкових малої довжини $5...15 D_{ex}$, де жорсткість ЛЧМТ на багато порядків перевищує жорсткість масиву просадочного ґрунту.

Отже, **мета** - провести верифікацію гіпотези, що деформації трубопроводу еквівалентні деформаціям ґрунту основи. Перевірити тип контакту між трубою та ділянкою просідаючого ґрунту: Bonded, Frictional або Contact is absent. Та оцінити чи коректно чисельний комплекс Ansys враховує жорсткість ЛЧМТ.

Постановка задачі - шляхом порівняння результатів моделювання МСЕ суцільного масиву ґрунту без трубопроводу та з трубопроводом оцінити величини просідання, що виникають у наслідок дії для точкових джерел замочування та площадкових малої довжини $5...15 D_{ex}$.

ОСНОВНІ МАТЕРІАЛИ І РЕЗУЛЬТАТИ

Розглянемо трубопровід у інженерно-геологічних умовах Кременчуцького лесового плато (рис. 1).



Рис. 1. Трубопровід у масиві лесового просадочного ґрунту

Профіль складено наступними інженерно-геологічними елементами: ІГЕ-1 – суглинок гумусований, темно брунатний, ІГЕ-2 – супісок лесований, світло коричневий, світло сірий, світло-жовтий, пилуватий, твердий, ІГЕ-3 – суглинок сірий, важкий, пилуватий, твердий. Фізико-механічні характеристики ґрунтів наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика суглинків Кременчуцького лесового плато

Характеристики ґрунту		ІГЕ - 1	ІГЕ - 2	ІГЕ - 3
Товщина шару, h, м		1,5	9,0	2,0
Щільність ґрунту, ρ , кг/м ³		1500	1495	1860
Щільність скелету ґрунту, ρ_d , кг/м ³		-	1410	-
Щільність водонасиченого ґрунту, ρ_{sat} , кг/м ³		1840	1840	-
Коефіцієнт пористості, e		-	0,90	0,7
Відносна просадочність, ε_{sl} , %, при тиску, p, МПа	0,05	-	0,3	-
	0,10	-	3,0	-
	0,20	-	6,0	-
	0,30	-	8,0	-
Модуль деформації ґрунту, E_s , МПа	у природному стані	6	12	14
	у водонасиченому стані		2	
Кут внутрішнього тертя, φ , 0	у природному стані	19	26	27
	у водонасиченому стані		21	
Питоме зчеплення, c, кПа	у природному стані	13	18	28
	у водонасиченому стані		9	
Коеф. Пуассона ґрунта, μ	у природному стані	0,31	0,33	0,36
	у водонасиченому стані		0,35	

На першому етапі зону замочування призначимо таким чином, щоб її ширина була значно більша за висоту просадочної товщі $B_w = 50$ м, щоб процес просідання розвивався у повній мірі [8]. Крім того, жорсткість труби на такій значній довжині замочування не впливатиме на величину просідання.

Згідно інженерної методики, величину просідання від власної ваги ґрунту визначають за формулою [8]:

$$S_{slg} = \sum_{n=1}^n \varepsilon_{sl,i} h_i k_{sl,i}, \quad (1)$$

де $\varepsilon_{sl,i}$ – відносна просадочність i -го шару ґрунту від дії середнього тиску від власної ваги зволоженого ґрунту;

h_i – товщина i -го шару ґрунту;

k_{sl} – коефіцієнт, який для лесового нашарування товщиною $H_{sl} \leq 15$ м дорівнює одиниці, для $H_{sl} \geq 20$ м $k_{sl} = 1,25$;

n – кількість шарів лесового ґрунту.

Початковий тиск просадочності для ІГЕ-2 – $p_{sl} = 63$ кПа, глибина товщі, що просідає – 7 м, тиск на межі просадочної товщі $\sigma_{zg,eq} = 190$ кПа, середній тиск у межах товщі – $\sigma_{med} = 128$ кПа, згідно діаграми залежності «тиск p – відносна просадочність ε_{sl} » значення $\varepsilon_{sl} = 3,8\%$. У розглядуваних ґрунтових умовах величина просідання ґрунту складає $S_{slg} = 266$ мм.

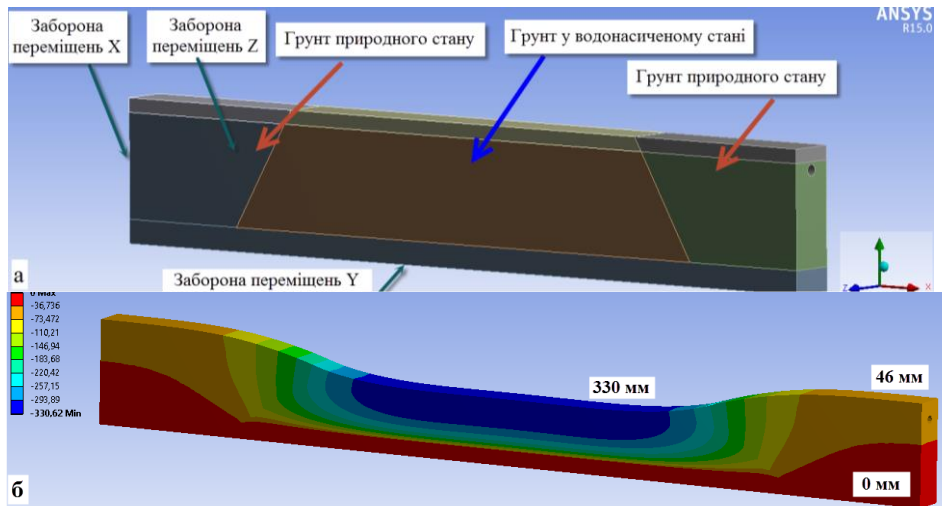


Рис. 2. Порівняння просадочних деформацій при використанні лінійної моделі та моделі Мора-Кулона: а – розрахункова схема; б – величини нерівномірних деформацій за обома моделями

Моделювання МСЕ виконуватимемо за лінійною моделлю ґрунту – використання модулів деформації ґрунту у природному та водонасиченому стані, та моделлю з критерієм міцності Мора-Кулона. У лесових ґрунтах визначальною властивістю є величина просідання. Отже, для лесових ґрунтів показники міцності та стисливості мають дещо інше значення, ніж для інших. Доведенням теоретичних тверджень [8] про можливість використання лінійної моделі у інтервалах тиску від власної ваги ґрунту є результати моделювання (рис. 2).

Величини просідання для розглядуваних інженерно-геологічних умов за обома моделями склали $\Delta S = 330 - 46 = 284$ мм. Величина просідання, яке визначене за інженерною методикою $S_{slg} = 266$ мм, згідно порівняння результатів моделювання та інженерного розрахунку, навіть для просадочної товщі у 9 м із слабким ґрунтом, відносна різниця складала усього 4,8% у більшу сторону, що йде у запас розрахунку. Це доводить коректність використання лінійної моделі деформації лесового ґрунту до моделювання просадочних явищ від власної ваги ґрунту.

Для виведення максимально універсальної розрахункової схеми для різних випадків прояву просадочних явищ у програмному комплексі Ansys було нараховано 120 прикладів замочування основи з точкових та площадкових джерел різної довжини (рис. 3). У дослідженні, трубопровід прийнято діаметром $D_{ex} = 1000$ мм, варіювалися чотири основних параметри: довжина ділянки замочування зверху $B_w = 1, 5, 10, 20, 50$ м; кут нахилу розповсюдження вологи у масиві ґрунту $\beta = 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$; товщина стінки трубопроводу $t = 10, 15, 20$ мм; тип контакту між трубою та ділянкою замочування: Bonded, Frictional, Contact is absent.

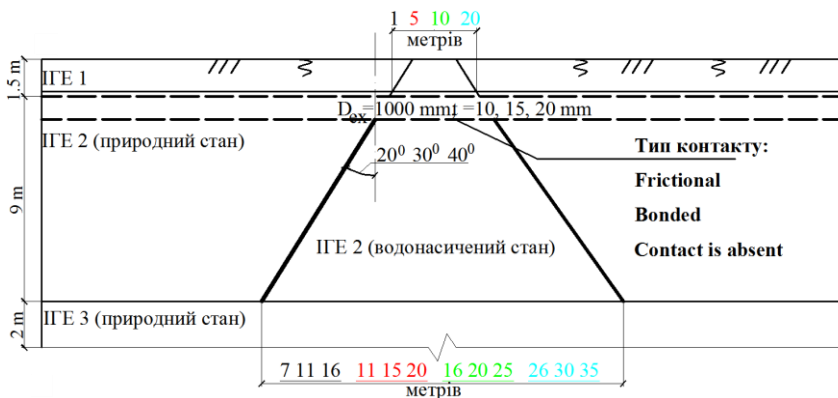


Рис. 3. Розрахункова схема моделювання для Ansys

Результати моделювання для найбільш характерних ділянок замочування ґрунту зведено до табл. 2.

Таблиця 2

Порівняння величин просідання у масиві ґрунту з трубопроводом та без, для різних типів контакту та товщини стінки

Довжина замоченої ділянки, L, м	Товщина стінки труби, t, мм	Вимірювана величина	Моделювання МСЕ			Труба відсутня
			Bonded	Frictional	Contact is absent	
Точкове джерело 1-16 м	10	$S_{slg}, (S_{sl}^{pipe}),$ мм	105 (96)	110 (96)	107(95)	155
		$\sigma_{dif}^{max(min)},$ МПа	+184 -240	+161 -225	+170 -237	-
	20	$S_{slg},$ мм	98 (87)	103 (83)	99 (87)	
		$\sigma_{dif}^{max(min)},$ МПа	+144 -174	+126 -160	+135 -170	
	10	$S_{slg}, (S_{sl}^{pipe}),$ мм	160 (148)	173 (143)	192 (133)	210
		$\sigma_{dif}^{max(min)},$ МПа	+257 -331	+217 -305	+187 -246	
Площадкове джерело 5-20 м	15	$S_{slg}, (S_{sl}^{pipe}),$ мм	152 (138)	167 (132)	188 (125)	
		$\sigma_{dif}^{max(min)},$ МПа	+220 -272	+190 -241	+165 -208	-
	20	$S_{slg}, (S_{sl}^{pipe}),$ мм	147 (130)	164 (125)	185 (125)	
		$\sigma_{dif}^{max(min)},$ МПа	+195 -236	+168 -206	+151 -183	
	10	$S_{slg}, (S_{sl}^{pipe}),$ мм	215 (208)	225 (198)	272 (161)	267
		$\sigma_{dif}^{max(min)},$ МПа	+295 -356	+262 -328	+155 -207	-
Площадкове джерело 10-25 м	20	$S_{slg}, (S_{sl}^{pipe}),$ мм	198 (186)	215 (174)	276 (145)	
		$\sigma_{dif}^{max(min)},$ МПа	+228 -265	+196 -228	+128 -156	
	10	$S_{slg}, (S_{sl}^{pipe}),$ мм	285 (284)	285 (421)	290 (422)	284
		$\sigma_{dif}^{max(min)},$ МПа	+169 -195	+142 -147	+155 -143	-
	20	$S_{slg}, (S_{sl}^{pipe}),$ мм	292 (288)	285 (296)	285 (411)	
		$\sigma_{dif}^{max(min)},$ МПа	+129 -145	+121 -121	+128 -127	
Площадкове джерело 50-65 м	10	$S_{slg}, (S_{sl}^{pipe}),$ мм	285 (284)	285 (421)	290 (422)	284
		$\sigma_{dif}^{max(min)},$ МПа	+169 -195	+142 -147	+155 -143	-
	20	$S_{slg}, (S_{sl}^{pipe}),$ мм	292 (288)	285 (296)	285 (411)	
		$\sigma_{dif}^{max(min)},$ МПа	+129 -145	+121 -121	+128 -127	

S_{slg} , - величина просідання ґрунту від його власної ваги, S_{sl}^{pipe} – нерівномірні деформації трубопроводу, $\sigma_{dif}^{max(min)}$ – максимальні та мінімальні поздовжні напруження у стінках трубопроводу від впливу нерівномірних деформацій основи. Слід відзначити, що останні мають дуже високі значення і подекуди перевищують величини кільцевих напружень, від внутрішнього робочого тиску. З аналізу результатів можливо зробити висновок, що найбільш небезпечний випадок замочування для ділянки $B_w = 10$ м ($10 D_{ex}$), $\beta = 40^\circ$, отже дану схему замочування доцільно використовувати у майбутньому.

Максимальні деформації проявляються при досягненні довжини замоченої зони B_w висоти просадочної товщі H_{sl} , для нашої схеми 10 м, коли труба відсутня, то для $B_w = 10$ м – просідання 267 мм, що складає 94 % від максимального, для моделювання, 284 мм. З ділянки 20 м, величина просідання майже не змінюється. Отриманий графік залежності величини просідання S_{slg} від довжини ділянки замочування B_w (рис. 4 – 1) досить близький до теоретичного [8], отже його можна прийняти за еталонний. При наявності трубопроводу, величина просідання значно зменшується, так для ділянки замочування $B_w = 10$ м – $S_{slg} = 210$ мм, або 74% від максимального, що свідчить про те, що жорсткість трубопроводу суттєво знижує величину просідання (рис. 4 – 2). Даний ефект характерний для точкових джерел замочування та площадкових, малої ширини $B_w \leq 1 - 1,5 H_{sl}$ ($10 D_{ex}$), адже при зростанні $B_w > 2 H_{sl}$ ($20 D_{ex}$) ефект зникає. Товщина стінки впливає на величину просідання S_{slg} у межах 1-2% (рис. 4 – 3, 4).

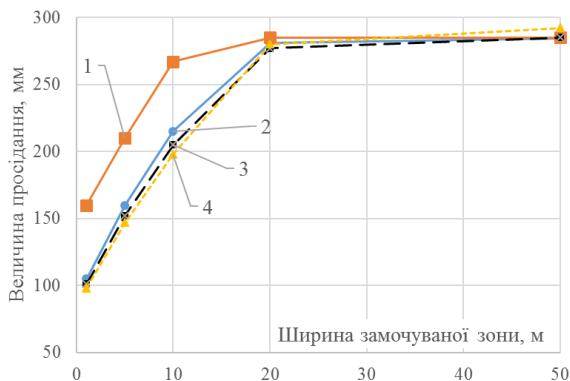


Рис. 4. Залежність величини просідання S_{slg} від довжини ділянки замочування B_w : 1 – масив ґрунту без трубопроводу; 2-4 – контакт ґрунту з трубопроводом (Bonded), товщина стінки відповідно 10 мм, 15 мм та 20 мм

З отриманих результатів (табл. 2) випливає, що найбільш коректний контакт Bonded. При його використанні по-перше локально зменшуються

величини просідання ґрунту, по-друге при збільшенні довжини ділянки замочування, якщо використовувати інакші типи контактів, деформація трубопроводу S_{st}^{pipe} приймає абсолютно некоректні значення, тобто моделюється так, ніби ґрунт під трубою взагалі відсутній і вона просто провисає, при цьому труба сприймає навантаження від вище розташованих шарів.

ВИСНОВОК

Жорсткість трубопроводу коректно враховується моделюванням у Ansys при використанні контакту Bonded. Доведена коректність гіпотези про еквівалентність між просіданнями ґрунту основи та деформаціями трубопроводу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость / А.Б. Айнбиндер. – М.: Недра, 1991. – 284 с.
2. 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.
3. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 52 с.
4. Трегуб А.С. Экспериментальные исследования подземных трубопроводов на подрабатываемых территориях / А.С. Трегуб // Світ Геотехніки – 2004 р. – № 2. – С. 15–20.
5. Pichugin S. Calculation of the reliability of steel underground pipelines / S. Pichugin, A. Makhin'ko // Strength of Materials. Vol. 41. – Number 5. – Springer Science, 2009. – P. 541–547.
6. Расчет магистральных газопроводов в карстовых зонах / [А.М. Шаммазов, В.А. Чичелов, Р.М. Зарипов, Г.Е. Коробков]. – Уфа: Гилем, 1990. – 213с.
7. Селезнев В.Е. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов. Изд. 2-е, перераб. и доп. / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, С.Н. Прялов. – М.: МАКС Пресс, 2009. – 436 с.
8. Крутов В.И. Проектирование и устройство оснований и фундаментов на просадочных грунтах / В.И. Крутов, А.С. Ковалев, В.А. Ковалев. – М.: АСВ, 2013. – 544 с.

REFERENCES

1. Ainbinder A. Main pipelines design on strength and stability / A. Ainbinder. – Moscow: Nedra, 1991. – 294 p.

2. 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.
3. SNiP 2.05.06-85. 1988. Main pipelines.– Moscow: Gosstroy USSR, 1988 – 52 p.
4. Tregub A. Experimental investigations of the pipeline in the mining areas / A. Tregub // *Geotechnics world* – 2004. - №2. – P. 15-20.
5. Pichugin S. Calculation of the reliability of steel underground pipelines / S. Pichugin, A. Makhin'ko // *Strength of Materials*. Vol. 41. – Number 5. – Springer Science, 2009. – P. 541 – 547.
6. Main pipelines design in the area of karst cavities / A. Shammazov, V. Chichelov, R. Zaripov, G. Korobkov – Ufa: Gilem, 1990. – 213 p.
7. Seleznov V. General thesis of the main pipelines numerical modelling/ Second edition, Revised. and added / V. Seleznov, V. Aleoshin, S. Prialov. – Moscow: Max Press, 2009. – 436 p.: ISBN 978-5-317-02950-0
8. Krutov V. Soil base and foundation design and arrangement in the loessial collapsible soils / V. Krutov, A. Kovalev, V. Kovalev. – Moscow: ACB, 2013. – 514 p.

Стаття надійшла до редакції 09.08.2016 р.