

## РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БАЛКОВИХ ПЕРЕХОДІВ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ЧИСЕЛЬНИМИ МЕТОДАМИ

© Білобран Б.С., Дзюбик А.Р., 2007

Описано комплексну методику розрахунку напружено-деформованого стану балкових безкомпенсаторних переходів магістральних трубопроводів на основі застосування МСЕ та відомих методів будівельної механіки. Отримано результати для пружного та жорсткого закріплення опор. Проаналізовано вплив вертикального переміщення проміжних опор на значення максимальних напружень та переміщень.

The complex method of calculation is given it is tense – the deformed state of transitions of beams of main pipelines on the basis of application of MCE and known methods of structural mechanics. Results are got for resiliently and hard fixing of supports. The cases of the vertical moving of intermediate supports are analyzed and it is got value of maximal tensions and moving.

**Постановка проблеми.** Під час проектування та спорудження надземних балкових переходів із проміжними опорами магістральних трубопроводів необхідно враховувати деякі фактори, що забезпечують їхні необхідні експлуатаційні властивості. Зокрема, це напружено-деформований стан, що є важливою складовою розрахунків на міцність та довговічність. У цьому випадку він залежить від двох основних чинників: внутрішнього тиску транспортованого продукту та зовнішніх навантажень і впливів, пов'язаних з їх роботою як стрижневої конструкції, яка взаємодіє з суміжними підземними ділянками та зазнає поздовжньо-поперечного згину. Це значно ускладнює розрахункові моделі, що спричиняє потребу застосування числових методів. Тому вдосконалення існуючих методів розрахунку є важливим як з погляду експлуатаційного контролю технічного стану магістральних трубопроводів, так і розроблення нових трас, конструювання балкових переходів та створення економічніших проектів.

**Аналіз останніх досягнень та публікацій.** Сьогодні для розв'язання таких завдань у трубопровідному транспорті застосовують різноманітні експериментальні та розрахункові методи. Однак застосування аналітичних підходів часто обмежене через статичну невизначеність завдання, складність врахування крайових умов та особливості геометрії трубопроводу [1], а експериментальні методи недостатньо інформативні через особливості методик та складність їх реалізації в польових умовах [2]. За допомогою числових методів це завдання розв'язане лише для випадку однопрогонового балкового переходу магістрального трубопроводу [3].

У зв'язку з цим важливим є комплексне застосування відомих в трубопровідному транспорті аналітичних підходів, методу скінченних елементів (МСЕ) та доступної експериментальної інформації. Саме ці питання розглянемо нижче на основі математичного моделювання безкомпенсаторних балкових переходів із проміжними опорами.

**Постановка задачі.** Метою статті є удосконалення та уточнення методики розрахунку напружень та деформацій, що виникають у матеріалі труб на балкових надземних переходах магістральних трубопроводів.

**Основний матеріал.** В основу математичної моделі покладено розрахункову схему, згідно з якою надземний трубопровід вважається багатопрогоновою балкою-оболонкою з недеформованим контуром поперечного перерізу, що знаходиться під дією внутрішнього тиску, поперечних зосереджених сил і розподіленого навантаження та осьової еквівалентної сили. Взаємодію труби з ґрунтом на прилеглих до надземного переходу ділянках подано за допомогою моделі ідеального пружнопластичного тіла. Для розкриття статичної невизначеності системи використано метод сил у поєднанні з методом скінченних елементів.

Дослідження виконували на прикладі двопрогонного балкового переходу магістрального трубопроводу завдовжки 46 м з однаковою довжиною прогонів. Зовнішній діаметр труб  $D=720$  мм, товщина стінки  $\delta=10$  мм. Механічні властивості відповідно до ГОСТ 19282-73 становлять:  $\sigma_B = 490$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 343$  МПа,  $\delta_5 = 21$  %. Значення густини матеріалу труби,  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>, модуль пружності  $E=206000$  МПа, коефіцієнт температурного розширення  $\alpha_t=1,2 \cdot 10^{-5}$  1/С та коефіцієнт Пуассона  $\nu=0,3$  вибирали відповідно до рекомендацій СНиП 2.05.06-85.

Розрахункова схема балкового переходу показана на рис. 1. Тут прийнято пружно закріплену на краях балку із проміжною опорою по середині. Крайні ґрунтові опори допускають вертикальні переміщення труби ( $\Delta_1$ ), а також кути повороту поперечних перерізів. Надземна ділянка трубопроводу знаходиться під дією рівномірно розподіленого навантаження  $q$  від ваги нафти (густина  $\rho_n = 895$  кг/м<sup>3</sup>) і матеріалу труб та осьової еквівалентної сили, яка враховує вплив внутрішнього тиску, і зміни температури. Осьова еквівалентна сила ( $S$ ) вважається сталою за довжиною та позитивною у разі стиску. Внаслідок цього виникають реакції ґрунтових опор на краях ( $R_1$ ) та проміжній опорі ( $R_0$ ), а також моменти відповідно  $M_1$  та  $M_0$  (рис. 1).

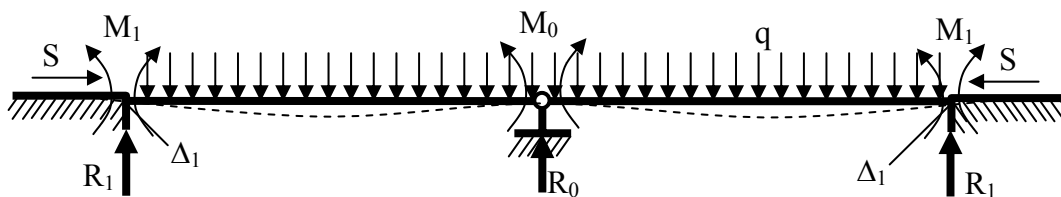


Рис. 1. Розрахункова схема балкового переходу

*Жорстка та пружна взаємодія з ґрунтом.* Характерною особливістю роботи надземного трубопроводного переходу, як балкової конструкції, є його взаємодія з прилеглими до нього підземними ділянками. Здебільшого надземні балкові переходи магістральних трубопроводів не мають жорсткого закріплення, а опираються на ґрунтову основу (дно траншеї). Відповідно до робіт [3, 4] при невеликих поперечних переміщеннях трубопроводу на суміжних з надземним переходом підземних ділянках їх можна вважати напівнескінченими балками на пружній основі.

Для розрахунків балку розбивають на одновимірні лінійні скінченні елементи трубчастого перерізу, що з'єднані між собою жорсткими вузлами. Розрахунки виконано у межах пружності на підставі закону Гука. Оскільки враховується ефект поздовжньо-поперечного згину, то переміщення та зусилля в балці визначаються ітераційним методом з використанням методу послідовних наближень.

У табл. 1 наведено результати обчислень основних параметрів, що характеризують напружено-деформований стан надземного трубопроводу для випадку відповідності висотного розташування проміжної опори рівню дна траншеї ( $\Delta_0 = 0$  мм) та коли  $S = 0$ .

Як бачимо, внаслідок пружної взаємодії ґрунту та труби спостерігається зменшення навантаження по краях труби та відповідне його зростання на центральну опору. Ця зміна пропорційна до зменшення коефіцієнта постелі ґрунту [5]. Аналогічно зростають переміщення крайніх опор та перерозподіл згинальних моментів. Такі самі результати отримано при розв'язанні тестової задачі [6] та на основі експериментальних вимірювань величини реакції проміжної опори в польових умовах.

Таблиця 1

Зусилля та переміщення у надземному трубопроводі для різних властивостей ґрунтів ( $S = 0$ )

Коефіцієнт постелі ґрунту, $(k_0)$ , МН/м <sup>3</sup>	Реакції, КН		Момент, КН·м		Прогин на краю ґрунту ( $\Delta_1$ ), мм
	на краю ґрунту ( $R_1$ )	на проміжній опорі ( $R_0$ )	на краю ґрунту ( $M_1$ )	на проміжній опорі ( $M_0$ )	
1	43,8	151,4	- 5,7	- 372,9	- 19,6
5	48,9	141,2	- 71,7	- 321,9	- 8,63
10	50,6	137,9	- 94,8	- 306,0	- 6,02
20	52,4	134,1	- 120,7	- 289,3	- 3,73
50	53,6	131,8	- 137,2	- 279,2	- 2,59
100	54,6	129,9	- 151,3	- 270,8	- 1,8
200	55,4	128,2	- 163,4	- 263,9	- 1,26
$\infty$	59,75	119,5	- 229,0	- 229,0	0,0

Вертикальні переміщення проміжної опори. Аналіз наведених у табл. 1 результатів показує, що за рахунок регулювання висотного розташування проміжних опор можна досягнути мінімальних згинальних моментів у трубопроводі, а отже, найбільших поздовжніх напружень у небезпечних перерізах надземної частини та прилеглих підземних ділянок.

Для цього було виконано відповідні числові дослідження (табл. 2), що ґрунтуються на умові рівності найбільших значень згинальних моментів на надземній частині (над проміжною опорою) –  $M_0$  та суміжних підземних ділянках ( $M_{1 \max}$ ) на деякій відстані ( $x_0$ ).

Встановлено, що зміщення проміжної опори ( $\Delta_0$ ) вниз призводить до перерозподілу згинальних моментів у вказаних перерізах:  $M_0$  – зменшується, а  $M_{1 \max}$  – збільшується. Величині зміщення  $\Delta_0$  у табл. 2 відповідає мінімальне значення найбільшого згинального моменту в трубопроводі. Таке положення проміжної опори можна вважати оптимальним, оскільки йому відповідатиме найменше значення напружень згину, від яких значною мірою залежить запас міцності надземних балкових переходів.

Таблиця 2

Результати розрахунку надземного переходу для раціонального положення проміжної опори ( $S = 0$ )

$k_0$ , МН/м <sup>3</sup>	$\Delta_0$ , мм	$R_0$ , КН	$M_0$ , КН·м	$R_1$ , КН	$M_1$ , КН·м	$x_0$ , м	$M_{1 \max}$ , КН·м	$\sigma$ , МПа
1	-91,0	126,9	-192,8	56,1	-108,0	3,52	-192,7	-49,3
5	-52,2	123,4	-200,4	57,8	-155,4	1,76	-200,4	-51,3
10	-41,8	122,4	-203,6	58,3	-169,7	1,29	-203,6	-52,1
20	-31,5	121,5	-207,5	58,8	-184,6	0,85	-207,5	-53,1
50	-25,7	120,9	-210,2	59,0	-193,4	0,62	-210,2	-53,8
100	-21,0	120,6	-212,7	59,2	-200,3	0,45	-212,6	-54,4
200	-17,2	120,3	-214,8	59,4	-205,8	0,32	-214,8	-54,9
$\infty$	0	119,5	-229,0	59,7	-229,0	0	-229,0	-58,6

Аналіз табл. 1, 2 свідчить, що для ґрунтів середньої щільності ( $k_0 = 5 - 20$  МН/м<sup>3</sup>) за рахунок висотного регулювання проміжної опори можна досягнути зменшення на 15–20 % нею навантаження, яке нею сприймається. При цьому істотніше відбувається зменшення максимального згинального моменту, що виникає над проміжною опорою, яке для таких ґрунтів становить 40–60 %.

Епюра згинальних моментів в балковому переході для ґрунту з коефіцієнтом постелі  $k_0 = 10$  МН/м<sup>3</sup> показана на рис. 2. Тут, в силу симетрії конструкції, показано лише її половину.

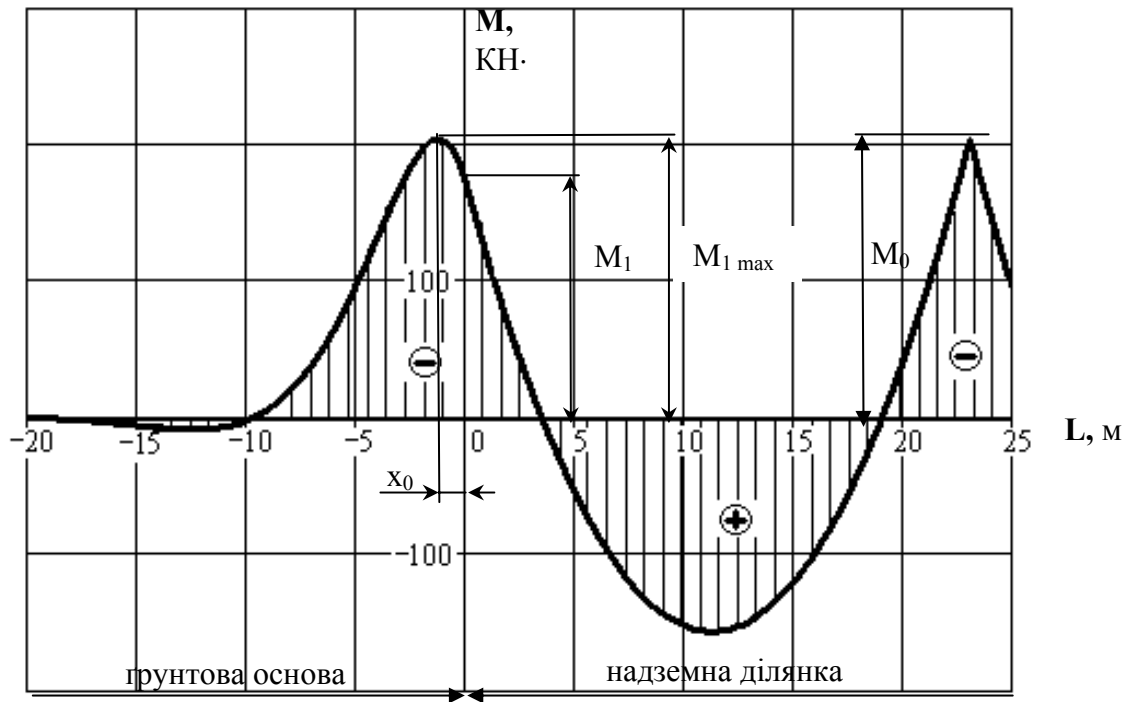


Рис. 2 Епюра згинальних моментів балкового переходу

Як бачимо, епюра згинальних моментів на підземній ділянці розрахункової схеми має хвилястий характер, що згасає з віддаленням від краю ґрунту. Найбільший згинальний момент виникає на першій півхвилі ( $M_{1 \max} = -203,6$  КН·м) на деякій відстані від краю ґрунту ( $x_0 = 9,5$  м). На другій півхвилі, величина максимального моменту не перевищує 10 КН·м.

*Вплив осової стискальної сили.* Як відомо [4], у трубопроводі, що знаходиться під внутрішнім тиском ( $p$ ), та за наявності позитивного температурного перепаду ( $\Delta t$ ) у його поперечних перерізах виникає поздовжня стискальна сила. Вона діє сумісно з поперечним ваговим навантаженням та зумовлює поздовжньо-поперечний згин надземного трубопроводу.

У зв'язку з цим було виконано числові дослідження впливу осової еквівалентної сили ( $S$ ) на раціональне висотне розташування проміжної опори та на напружено-деформований стан балкового переходу.

У табл. 3 наведено результати розрахунків за умови  $M_0 = M_{1 \max}$ , коли  $p = 5$  МПа, а  $\Delta t = 30$  °С. Тут показано реакції опор ( $R_0, R_1$ ), опорні моменти ( $M_0, M_1$ ), поздовжня стискальна сила ( $S$ ) та найбільші сумарні поздовжні стискальні напруження ( $\sigma_\Sigma$ ), які діють у трубопроводі.

Порівнюючи наведені у табл. 2 і 3 розрахункові дані, бачимо, що наявність внутрішнього тиску та температурного перепаду призводить до зростання навантажень на трубопровід.

Таблиця 3

**Зусилля та напруження у балковому переході під час експлуатації**

$k_0$ , МН/м <sup>3</sup>	$\Delta_0$ , мм	$R_0$ , КН	$M_0$ , КН·м	$R_1$ , КН	$M_1$ , КН·м	$x_0$ , м	$S$ , МН	$\sigma_\Sigma$ , МПа
1	-103,2	139,8	-226,0	49,7	-162,9	2,89	2,41	-78,5
5	-59,2	132,4	-231,4	53,4	-195,7	1,49	2,42	-80,4
10	-47,1	130,0	-233,2	54,6	-205,8	1,11	2,43	-81,0
20	-35,3	127,6	-235,4	55,8	-216,5	0,74	2,43	-81,6
50	-28,5	126,1	-236,9	56,5	-222,6	0,54	2,43	-82,1
100	-23,3	124,9	-238,2	57,1	-227,7	0,40	2,43	-82,5
200	-19,0	124,0	-239,4	57,6	-231,5	0,29	2,43	-82,8
$\infty$	0,0	119,6	-247,8	59,8	-247,8	0	2,43	-85,0

Так за раціонального положення проміжної опори для ґрунтів середньої щільності поздовжня стискальна сила призводить до збільшення максимального згинального моменту до 15 %. При цьому величина опускання проміжної опори зростає на 10–12 %, а небезпечний переріз на підземній ділянці, де виникає найбільший згинальний момент, зміщується в бік краю ґрунту.

Як зазначалося вище, використана математична модель дає змогу враховувати геометричну нелінійність трубопроводу та відповідно вплив його деформативності (прогинів) на величину зовнішньої осьової еквівалентної сили. Зокрема для ґрунтів малої щільності ( $k_0 = 1$ ) вона дещо зменшується.

**Висновки.** Проведені дослідження показали, що під час визначення напружено-деформованого стану балкових переходів трубопроводів із проміжними опорами необхідно враховувати пружну взаємодію ґрунту і труби та висотне розташування цих опор. Зокрема, для ґрунтів середньої щільності спостерігається зменшення навантаження на краях надземної ділянки (до 35 %) та відповідне його зростання на центральну опору (до 25 %). З'ясовано, що для ґрунтів середньої щільності ( $k_0 = 5\text{--}20 \text{ МН/м}^3$ ) за рахунок висотного регулювання проміжної опори можна досягнути зменшення на величину до 20 % навантаження, що сприймається нею. При цьому максимальний згинальний момент над проміжною опорою зменшується на величину до 40–60 %. Що стосується осьової стискальної сили, то вона призводить до збільшення згинальних моментів та реакцій опор, а також величини раціонального опускання проміжної опори.

1. Перун И. В. *Магистральные трубопроводы в горных условиях*. – М.: Недра, 1987. – 175 с.
2. *Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справочное пособие* / Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, П.И. Полухин, Н.А. Чиченев. – К.: Наук. думка, 1981. – 584 с.
3. Білобран Б.С., Лучко Й.Й. *Розрахунок однопрогонового балкового трубопроводу з допомогою чисельних методів // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій: Зб. наук. пр.: В.4. – Львів: Каменяр, 2002. – С. 12–20.*
4. Айнбіндер А.Б., Камерштейн А.Г. *Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. Справочное пособие*. – М.: Недра, 1982. – 341 с.
5. Царинник О.Ю. *Металеві конструкції. Спецкурс: Навч. посібник*. – Львів: Вид-во “Бескид Бід”, 2004. – 304 с.
6. Білобран Б.С., Василюк В.М. *Контроль напруженого стану потенційно-небезпечних ділянок магистральних нафтопроводів // Матеріали 6-ї Міжнар. конф. “Нафта і газ України-2000”. – Івано-Франківськ, 2000. – Т. 3. – С. 59–60.*