

## УТОЧНЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ СИЛИ ТИСКУ НА КОНСОЛЬ БАЛКОВОГО ПЕРЕХОДУ КОМПЕНСАТОРОМ З КОЛІНОМ, ЗІГНУТИМ НА 90°

Л.С. Шлапак, Л.М. Гайдаш, М.Л. Гайдаш

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел.(0342) 506612,

e-mail: public@nuing.edu.ua

*Викладені уточнення до відомого методу розрахунку вертикальної сили тиску на кінець консолі балкового переходу компенсатором з коліном, зігнутим на 90°.*

Ключові слова: трубопровід, балковий перехід, компенсатор, вертикальна сила тиску.

*Изложены уточнения к известному методу расчета вертикальной силы давления на конец консоли балочного перехода компенсатором с коленом, изогнутым на 90°.*

Ключевые слова: трубопровод, балочный переход, компенсатор, вертикальная сила давления.

*Clarification to the method of calculation of vertical force of pressure on the end of transition compensate with a knee, arcuated on 90 degrees, is expounded.*

Keywords: pipeline, beam transition, compensate, vertical force of pressure.

**Постановка проблеми.** Під час спорудження магістральних трубопроводів із металевих труб, що проходять через природні та штучні перешкоди, часто застосовують надземні балкові переходи. Однією з проблем надземних трубопроводів є компенсація поздовжньої деформації, викликані підвищенням температури стінки труби і внутрішнього тиску. У сучасних діючих трубопроводах поздовжня деформація компенсується за рахунок пружних властивостей металу температурних компенсаторів. На особливу увагу заслуговують температурні компенсатори з одним коліном, зігнутим на 90°, що знайшли широке застосування у трубопровідних системах. Компенсаційна здатність такого компенсатора визначається за розрахунковою схемою консольної балки. Розрахунок зводиться до визначення максимального переміщення кінця консолі, допустимого для заданої її довжини, виходячи із того, щоб максимальні напруження в небезпечному перерізі задовольняли умову міцності.

Вертикальна сила тиску компенсатора  $F_k$ , на кінець консолі балкового переходу згідно існуючого методу розрахунку [1, 2] прирівнюється до ваги половини довжини компенсатора. Вважають, що іншу половину ваги компенсатора сприймає ґрунт.

$$F_k = \frac{q_t l_k}{2}, \quad (1)$$

де:  $l_k$  – довжина компенсатора;  $q_t$  – погонна вага компенсатора.

На наш погляд, простежується недостатньо вдалий підхід до визначення вертикальної сили тиску на кінець консолі, оскільки довжина температурного компенсатора відповідає лише надземній частині перехідної ланки, що сполучає балковий перехід з підземним трубопроводом.

Необхідно звернути увагу на те, що перехідна ланка після завершення монтажних робіт, за відсутності засипки і насипу, спирається на кінець консолі балкового переходу і на ґрунт дна траншеї, виконуючи роль компенсатора. Згідно згаданого вище методу, величина вертикальної сили тиску на кінець консолі у цьому випадку дорівнює вазі половини перехідної ланки. Після засипання і насипу сила тиску зростає за рахунок ваги насипу на підземній частині перехідної ланки, довжина якої залежить від кута нахилу до горизонту. Отже, у діючих балкових переходах величина реальної сили тиску на кінець консолі більша за розрахункову, закладену у проектну документацію. Внаслідок цього змінюються умови експлуатації і погіршується технічний стан балкового переходу значно раніше проектного строку, що призводить до передчасної втрати його експлуатаційної придатності.

Уточнення сили тиску на кінець консолі балкового переходу є важливою проблемою для забезпечення нормального технічного стану балкового переходу.

**Постановка задачі.** Суть сформульованої задачі полягає в уточненні вертикальної сили тиску на кінець консолі балкового переходу шляхом врахування ваги підземної частини перехідної ланки та ваги насипу на ній у залежності від кута нахилу до горизонту.

Висвітлення основного матеріалу. Для розв'язання проблеми розроблено схему (рис. 1), елементами якої є консоль, перехідна ланка та прямокутна система координат з осями  $x$ ,  $y$  і  $z$ . Перехідна ланка з коліном, зігнутими на 90°, нахилена до горизонту під плоским кутом  $\alpha$  двогранного кута, утвореного пів прямими  $oa$  і  $sa$ , розташованими на гранях  $N$  і  $M$  двогранного кута [3]. Вихідні дані: довжина компенсатора  $l_k = 30$  м (прийнята із умови розрахунку на температурний вплив) [1]; глибина тра-

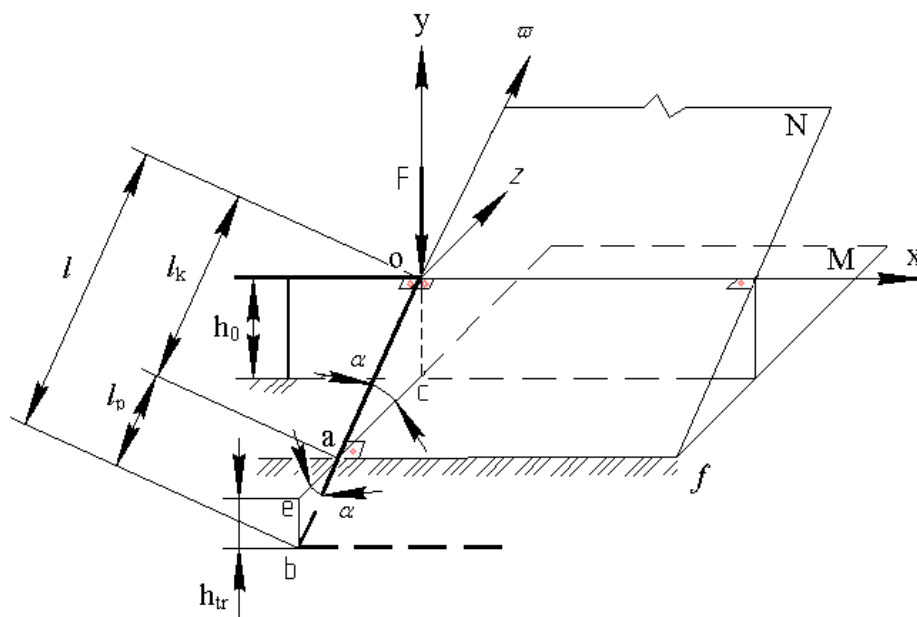


Рисунок 1 – Схема перехідної ланки з консоллю

ншеї  $h_{tr}$  підземного трубопроводу діаметром 1420 мм, згідно з нормами [2] у разі заглиблення останнього на 1 м прийнята 2,42 м. Величина  $h_0$  дорівнює різниці позначок низу труби торця консолі та місця, що прилягає до виходу перехідної ланки на поверхню землі. Вісь  $oo$  розміщена на грані  $N$  двохгранного кута. Вісь  $ox$  збігається з віссю балкового переходу  $x$ , а вісь перехідної ланки  $o\omega$  – з віссю  $oo$ .

За відсутності засипки і насипу технічний стан перехідної ланки  $ob$  як температурного компенсатора характеризується частковим відхиленням від проектних вимог і чинних норм до компенсаторів з коліном, зігнутим на  $90^\circ$ , що в даних конкретних умовах не порушує вимог експлуатації і не перешкоджає нормальному функціонуванню системи.

Згідно з вказаним методом розрахунку [1], вертикальна сила тиску на кінець консолі балкового переходу повинна дорівнювати вазі половини довжини перехідної ланки

$$F_l = \frac{q_t l}{2}, \quad (2)$$

де:  $q_t$  – вага погонного метра перехідної ланки;  $l$  – довжина перехідної ланки.

Перехідна ланка  $l$  складається із двох частин – надземної  $l_k$  і підземної  $l_p$ . Надземна частина дорівнює довжині компенсатора з коліном, зігнутим на  $90^\circ$  [1], а довжина підземної частини  $l_p$  залежить від глибини траншеї  $h_{tr}$  і плоского кута  $\alpha$  двогранного кута, що в процесі дослідження змінювався в діапазоні від  $0^\circ$  до  $90^\circ$

$$l_p = \frac{h_{tr}}{\sin \alpha}. \quad (3)$$

Плоский кут  $\alpha$  двогранного кута зумовлений величиною  $h_0$  і довжиною компенсатора  $l_k$

$$\frac{h_0}{l_k} = \sin \alpha. \quad (4)$$

Для зручності використання формули (2) довжину перехідної ланки  $l$  замінили сумою довжин компенсатора і підземної частини ( $l_k + l_p$ ). В першому випадку за дужки винесли величину  $l_k$ , а у другому – величину  $l_p$ , отримали

$$F_l = \frac{q_t (1 + \frac{l_p}{l_k}) l_k}{2}, \quad (5)$$

$$F_l = \frac{q_t (\frac{l_k}{l_p} + 1) l_p}{2} = \frac{q_t \beta l_p}{2}, \quad (6)$$

де  $\frac{l_k}{l_p} + 1 = \beta$ .

Розділивши формулу (5) на (1), отримали співвідношення (7) між вертикальною силою тиску на кінець консолі балкового переходу, викликаною вагою перехідної ланки, і вертикальною силою тиску від дії компенсатора

$$\frac{F_l}{F_k} = 1 + \frac{l_p}{l_k} \quad (7)$$

Із графіка (рис. 2) видно, що співвідношення  $F_l/F_k$ , в діапазоні кута нахилу перехідної ланки до горизонту від  $0^\circ$  до  $90^\circ$  більше одиниці. Отже, в діючих трубопроводах, реальна вертикальна сила тиску є більшою від проектної, розрахованої за формулою (1). Це свідчить про те, що реальний напружено-деформований стан у діючих балкових переходах не відповідає проектному.

Залежність співвідношення  $l_p/h_{tr}$  від плоского кута нахилу  $\alpha$  двогранного кута перехідної ланки до горизонту характеризується графіком (рис. 3). Зі збільшенням кута нахилу за незмінної глибини траншеї величина співвідношення  $l_p/h_{tr}$  зменшується внаслідок зміни довжини

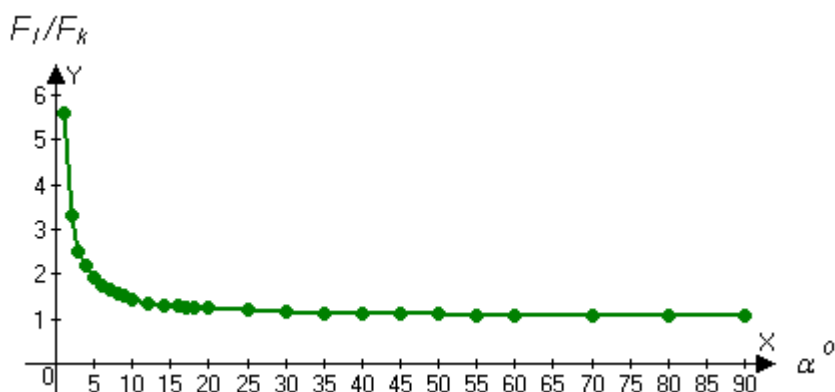


Рисунок 2 – Залежність відношення  $F_l / F_k$  від кута нахилу перехідної ланки до горизонту

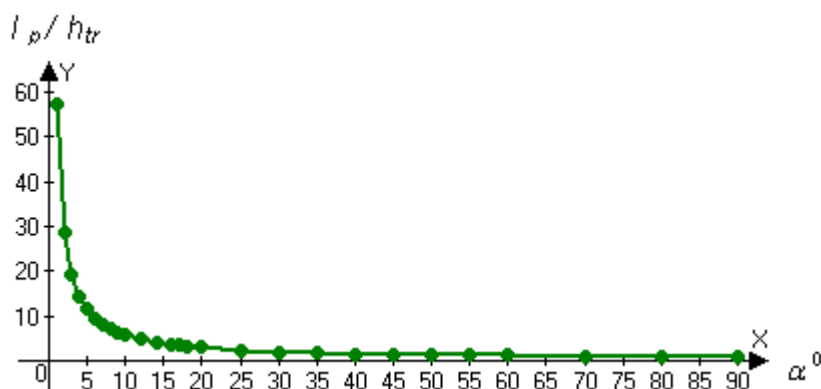


Рисунок 3 – Залежність відношення  $l_p / h_{tr}$  від плоского кута  $\alpha$  двогранного кута

підземної частини перехідної ланки. Для числових величин плоского кута  $\alpha$  двогранного кута від  $0^{\circ}$  до  $3^{\circ}$  спостерігається різкий спад співвідношення, що ускладнює практичне використання його у цій області. З подальшим зростанням кута нахилу спад співвідношення  $l_p/h_{tr}$  уповільнюється, і за кута  $\alpha=90^{\circ}$  дорівнює одиниці. Це свідчить, що довжина підземної частини перехідної ланки досягла глибини траншеї, а перехідна ланка зайняла вертикальне положення.

Після завершення монтажних робіт за відсутності засипки і насипу перехідна ланка під дією власної ваги згинається у вертикальній площині. Статичний аналіз перехідної ланки під час згину у вертикальній площині свідчить, що у разі знехтування гнучкістю коліна із площини згину розрахункова схема перехідної ланки відповідає розрахунковій схемі балки з жорстко закріпленими кінцями на опорах.

Зворотне засипання траншеї виконують зазвичай механізованим способом приблизно на всю висоту траншеї з одного проходу машини. Застосування трамбувальних плит для ущільнення засипки неможливе, оскільки це може призвести до пошкодження трубопроводу. У такому випадку відбувається природне ущільнення засипки і насипу під дією власної ваги. Осідання засипки і насипу за рахунок природного ущільнення складає для дрібних пісків і супіску 5-6%, для суглинків - 6-8% і для глин - 10% від висоти засипки і насипу [4].

Зазор між дном траншеї і трубопроводом в процесі засипання заповнюється сипкою засипкою, яка за рахунок приросту прогину перехідної ланки легко ущільнюється і осідає. Ущільнена сипка засипка чинить порівняно малий опір прогину перехідної ланки у порівнянні з опором ґрунту з непорушеною структурою дна траншеї. Процес засипання траншеї дає підставу припустити, що ущільнена сипка засипка траншеї не може створити належний опір, що зміг би вплинути на результат розрахунку вертикальної сили тиску перехідної ланки від насипу.

Після засипання траншеї і утворення насипу технічний стан надземної частини перехідної ланки відповідає проектним вимогам і чинним нормам, що пред'являються до компенсаторів з одним коліном, зігнутих на кут  $90^{\circ}$ .

Вертикальна сила тиску на кінець консолі, викликана вагою насипу на підземній частині перехідної ланки, обчислювалася за допомогою відомого рівняння для балки із [5], розрахункова схема якої зображена на рис. 4,а.

Опора В підтримує балку на кінці ділянки без навантаження  $q$ , як консоль балкового переходу підтримує перехідну ланку на кінці надземної частини, що є температурним компенсатором. Розрахункові схеми балки (рис. 4,а) і перехідної ланки у вертикальній площині (рис. 4,б) є аналогічними.

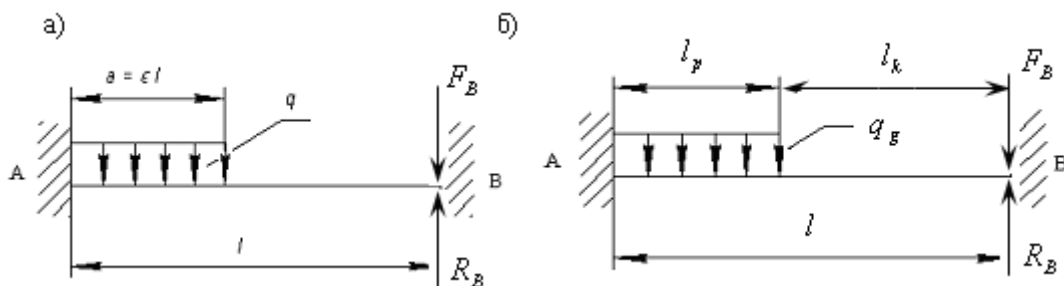


Рисунок 4 – Схеми балки із [5] (а) та перехідної ланки у вертикальній площині (б)

Вертикальна сила тиску балки  $F_B$  на опору дорівнює її реакції  $R_B$ , яка визначається із рівняння (8)

$$F_B = R_B = \frac{qa^2}{2l} - ql(k_1 - k_2). \quad (8)$$

Для визначення сили тиску на кінець консолі балкового переходу за формулою (8) була проведена заміна вихідних даних. Так, вертикальну силу тиску балки на опору  $F_B$  замінили на силу тиску перехідної ланки на консоль  $F_g$ . Ділянку балки  $a$  з рівномірно розподіленим навантаженням замінили на підземну частину перехідної ланки  $-l_p$  з розподіленим на ній навантаженням  $q_g$ , створеним шаром насипу, рівним заглибленню трубопроводу. Навантаження  $q_g$  визначали за нормативними вимогами [2] та методами, рекомендованими [4,6,7]. Довжину балки в провітрі  $l$  прирівняли до довжини перехідної ланки  $l$ , яку представили сумою довжин компенсатора і підземної частини ( $l_k + l_p$ ). У результаті заміни отримали формулу

$$F_g = \frac{q_g l_p^2}{2(l_k + l_p)} - q_g(l_k + l_p)(k_1 - k_2). \quad (9)$$

Після математичних спрощень і заміни суми  $(l_k/l_p + 1)$  на  $\beta$ , формула (9) набула нового формату

$$F_g = \left[ \frac{1}{2\beta} - \beta(k_1 - k_2) \right] q_g l_p, \quad (10)$$

де:  $q_g$  – вага погонного метру шару насипу;  $l_p$  – довжина підземної частини перехідної ланки.

Коефіцієнти  $k_1$  і  $k_2$  обчислювали за формулами, взятими із [5].

$$k_1 = \frac{\epsilon^2(3 - 4\epsilon + 1,5\epsilon^2)}{6}; \quad (11)$$

$$k_2 = \frac{\epsilon^2(\epsilon - 0,75\epsilon^2)}{3}. \quad (12)$$

В балці (рис. 4,а) співвідношення  $\frac{a}{l} = \epsilon$ , тоді для перехідної ланки це співвідношення буде дорівнювати

$$\epsilon = \frac{l_p}{l_p + l_k} = \frac{l_p}{(1 + \frac{l_k}{l_p})l_p} = \frac{1}{(1 + \frac{l_k}{l_p})\beta} = \frac{1}{\beta}. \quad (13)$$

Замінивши у формулах (11) і (12) величину  $\epsilon$  на  $\frac{1}{\beta}$  і виконавши математичні перетворення отримали різницю коефіцієнтів

$$k_1 - k_2 = \frac{1}{\beta^2} - \frac{1}{\beta^3} + \frac{0,5}{\beta^4}.$$

Підставивши вираз  $(k_1 - k_2)$  у формулу (10) і здійснивши математичні спрощення отримали формулу (14), яка визначає силу тиску на кінець консолі від насипу на підземній частині перехідної ланки

$$F_g = \left( \frac{1}{\beta^2} - \frac{1}{2\beta^3} \right) q_g l_p. \quad (14)$$

Сумарна вертикальна сила тиску  $F$  дорівнює сумі сил тиску від ваги половини перехідної ланки за формулою (6) та сили тиску від насипу за формулою (14)

$$F = \frac{q_l \beta l_p}{2} + \left( \frac{1}{\beta^2} - \frac{1}{2\beta^3} \right) q_g l_p. \quad (15)$$

Поділивши (15) на (6) і виконавши математичні спрощення отримали співвідношення

$$\frac{F}{F_l} = 1 + \left( \frac{2}{\beta^3} - \frac{1}{\beta^4} \right) \frac{q_g}{q_l}, \quad (16)$$

що визначає вплив насипу на сумарну вертикальну силу тиску на кінець консолі балкового переходу (рис. 5).

Із графіка видно, що співвідношення  $F/F_l$  за кута нахилу до горизонту  $35^\circ$  дорівнює 1,0095, тобто приріст дорівнює 0,95%, що менше 1%. Отже, другий доданок справа у формулі (16) під час розрахунку сили тиску від ваги насипу можна не враховувати, внаслідок чого загальна вертикальна сила тиску на кінець консолі дорівнюватиме вазі половини перехідної ланки. Зі збільшенням кута нахилу до горизонту довжина перехідної ланки зменшується за рахунок її підземної частини, що обумовлює зменшення сили тиску на консоль.

**Висновки.** Отримані результати свідчать, що вертикальна сила тиску на кінець консолі балкового переходу компенсатором з коліном, зігнутих на  $90^\circ$ , дорівнює сумі сил тиску від ваги половини перехідної ланки та сили тиску від ваги насипу на її підземній частині в діапазоні від  $0^\circ$  до  $35^\circ$ . За більших кутів нахилу сила

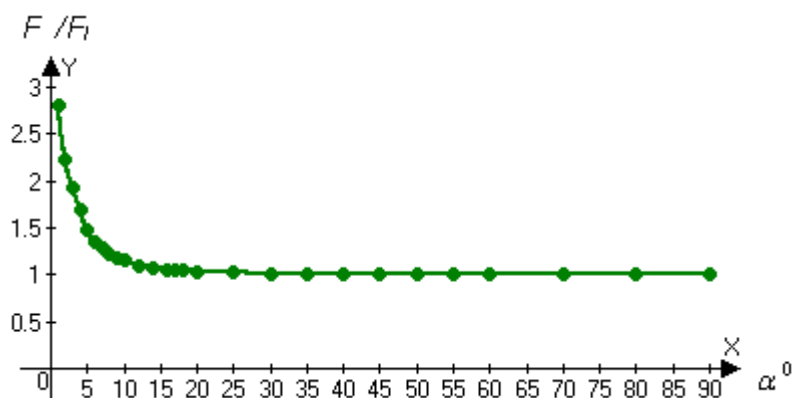


Рисунок 5 – Залежність відношення  $F/F_1$  від плоского кута  $\alpha$

тиску від ваги насипу має приріст менше 1%, тому нею можна знехтувати. В цьому випадку сила тиску на кінець консолі буде обумовлена лише довжиною перехідної ланки, яка зменшується за рахунок підземної частини. Ці уточнення дають можливість отримати розрахунковий напружено-деформований стан балкових переходів, що відповідає реальному.

Отримані результати мають теоретичне та практичне значення на стадії розробки проектної документації на будівництво балкових переходів та на відновлення їх технічного стану у ході експлуатації.

### Література

- 1 Петров П.П. Надземная прокладка трубопроводов / Петров П.П., Спиридонов В.В. – М.: Недра, 1965. – 443 с.
- 2 СНиП 2.05.06. – 85 Магистральные трубопроводы. Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СРСР. – 1985. – 51с.
- 3 Погорелов А.В. Элементарная геометрия / Погорелов А.В. – М.: Изд. НАУКА, 1974. – 208 с.
- 4 Клейн Г.К. Расчет подземных трубопроводов / Клейн Г.К. – М.:Изд. лит. по строит., 1969. – 240 с.
- 5 Справочник проектировщика. Расчетно-теоретический. – Т.1. – М.: Стройиздат, 1972. – 599 с.
- 6 Цытович Н.А. Механика грунтов / Цытович Н.А. – М.: Высшая школа, 1979. – 272 с.
- 7 Бородавкин П.П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве / Бородавкин П.П. – М.: Недра, 1986. – 224 с.

Стаття поступила в редакційну колегію  
08.06.10  
Рекомендована до друку професором  
**В. Я. Грудзом**