

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.014-023.737:624.21

Й. Й. ЛУЧКО¹, Ю. Є. КОВАЛЬЧУК², І. Б. КРАВЕЦЬ^{3*}

¹ Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 033 18 36, ел. пошта lychko.diit@mail.ru, ORCID 0000-0002-3675-0503

² Кафедра «Будівельне виробництво», Національний університет «Львівська політехніка» вул. Карпінського, 6, м. Львів, Україна, 79013, тел. +38 (067) 360 22 22, ел. пошта tzov.lviv.bud@gmail.com, ORCID 0000-0002-1151-5785

^{3*} Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 479 00 50, ел. пошта kravetsivan2017@gmail.com, ORCID 0000-0002-2239-849X

МЕТОДИ ОЦІНКИ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Мета. Метою роботи є проведення аналізу методів розрахунку та оцінки несучої здатності металевих гофрованих конструкцій (далі МГК) при взаємодії із ґрунтовою засипкою в результаті дії навантажень від рухомого складу залізниць чи автотранспорту. Обґрунтувати можливість застосування даних методів при розрахунку труб різного діаметру та різної конструктивної форми. **Методика.** Аналізуються методи розрахунку напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій труб малого діаметру (до 3 м.) при постійних навантаженнях та методи розрахунку МГК великого діаметру більше 6 м. **Результати.** Розрахункові моделі, що враховують просторову роботу конструкцій, є більш коректними ніж «плоскі» моделі і розрахункові схеми і тому при розрахунку МГК слід застосовувати саме тривимірні моделі розрахунку, які найбільш реально моделюють роботу металевих гофрованих конструкцій. **Наукова новизна.** Вперше проведено аналіз методик розрахунку та досвіду проектування гнучких металевих гофрованих конструкцій при взаємодії із ґрунтовою засипкою і при впливі навантажень від рухомого складу залізничного та автомобільного транспорту. **Практичне значення.** Отриманий аналіз методик оцінки несучої здатності металевих гофрованих конструкцій різної форми поперечного перетину, можуть бути використані інженерами мостовипробувальних станцій Укрзалізниці та Укравтодору та проектними організаціями, які займаються проектуванням та спорудженням МГК.

Ключові слова: металева гофрована конструкція; методики; аналіз; несуча здатність; згинальні моменти; поперечні сили

Вступ

Проблеми створення та вдосконалення методів розрахунку металевих гофрованих конструкцій (МГК) у ґрунтовому середовищі почали розвиватися паралельно з їх впровадженням у практику будівництва. При проектуванні металевих гофрованих конструкцій перед проектувальниками стоїть задача вибору аналітичної моделі оцінки несучої здатності МГК і крім того, враховуючи те, що проектувальники України не мають досвіду проектування металевих гофрованих споруд «конструкція-ґрунт» то дана робота є актуальною і своєчасною.

Мета

Метою роботи є проведення аналізу методів розрахунку та оцінки несучої здатності металевих гофрованих конструкцій при взаємодії із

ґрунтовою засипкою в результаті дії навантажень від рухомого складу залізниць чи автотранспорту. Обґрунтувати можливість застосування даних методів при розрахунку труб різного діаметру та різної конструкції.

Методика

На початковому етапі розвитку методів оцінки несучої здатності МГК (а це були труби невеликих діаметрів) «конструкція – ґрунт» використовувалися експериментальні методи і найпростіші розрахунки, в яких МГК завантажувалися постійним навантаженням, що виникало від дії тиску ґрунту.

У роботі [1] Ясевіч використав гіпотезу про рівномірний розподіл тисків на трубу з усіх боків, і отримав емпіричну формулу для розрахунку руйнуючого тиску на трубу:

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$$p = c \sqrt{\frac{W}{dl}}, \quad (1)$$

де c – емпіричний коефіцієнт, рівний 6; d – діаметр труби в м; l – довжина труби, м.

У працях [1, 2] можна виділити метод розрахунку металевих гофрованих конструкцій – метод Фельдта. Даний спосіб розрахунку міцності гофрованих труб ґрунтувався на формулі напруженого стану матеріалу, який знаходиться під дією стискаючої сили і згинального моменту:

$$\sigma = \frac{N}{F} + \frac{M}{W} \leq \sigma_{sp}. \quad (2)$$

Даний метод не враховує переміщення горизонтального перерізу труби.

За методикою Леві визначення зовнішніх впливів провадиться, як і у Фельдта, на вершині труби від однієї шпали із стоячою на ній віссю рухомого складу, а розподіл тиску в ґрунті приймається під кутом в 45° . Цей тиск потім умовно вважався рівномірно розподіленим на поверхню труби. Максимальне напруження за Леві розраховувалось за формулою:

$$\sigma = \frac{qr}{\omega} \leq \sigma_{sp}, \quad (3)$$

де r – радіус труби; q – інтенсивність рівномірно розподіленого навантаження; ω – площа перерізу кільця смужки труби.

При використанні даних методів, для практичного розрахунку металевих гофрованих конструкцій, був зроблений висновок про значне розходження розрахункових результатів, отриманих за вище описаними методами, з експериментальними даними і про необхідність подальшого розвитку методів розрахунку металевих гофрованих труб.

З середини 30-х років минулого століття на другому етапі розвитку методів розрахунку МГК, почали враховувати пружний відтиск ґрунту [3]. Було використано модель сипучого тіла для стану граничного рівноваги засипки для вертикального σ_z і горизонтального σ_x напружень у досліджуваному масиві ґрунту на глибині z від поверхні та отримано наступні формули для оцінки напруженого стану гофрованих конструкцій:

$$\sigma_z = \gamma z; \quad \sigma_x = \xi_a \gamma z, \quad (4)$$

де γ – об'ємна вага ґрунту; $\xi_a = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\Phi}{2}\right)$ – коефіцієнт активного бокового тиску ґрунту.

У роботах [4, 5] зроблено висновок, що тиск не дорівнює вазі ґрунту над трубою, і це може бути враховано введенням відповідного коефіцієнта концентрації тиску ґрунту C і формула (4) набуде вигляду

$$\sigma_z = C \gamma z. \quad (5)$$

Герцог А. А. у своїх працях відзначає, що вертикальний тиск на гофровані металеві труби діаметром від 0,61 до 1,22 м при висоті засипки 10,5 м над верхом конструкції становить більше 50 % від ваги стовпа ґрунту над спорудою, а для залізобетонних труб у тих же умовах – до 150 %.

Методика Marstona-Spanglera, що відома з 1941р., була запропонована для конструкцій кругового перерізу малого діаметру і в подальшому вдосконалена Ярошенком В. А. у праці [6]. Вона ґрунтується на припущенні, що верхня і нижня частина конструкції зазнають дії рівномірного вертикального тиску засипки (ґрунту), а бічні поверхні зазнають дії горизонтального тиску засипки, яка змінюється за параболічним законом. Основним чинником деформації конструкції є згинальні моменти.

У роботі [5] встановлено, що для жорстких конструкцій, поперечні деформації яких незначні, величина коефіцієнта концентрації вертикального тиску C більша одиниці і за певних умов може досягнути 2, а для гнучких споруд, і в тому числі гофрованих, вона менше одиниці.

У роботі [7] М. Шпенглер у 1941 р. пропонує для металевих трубопроводів у якості максимально допустимої величини приймати зменшення діаметра на 5 %. що дає коефіцієнт запасу, рівний приблизно чотирьом. Побудована на основі чисельних натурних експериментів, які виконувались в 30-х роках минулого століття деканом Університету штату Айова США Ансоном Марстоном (Anson Marston) модель часто називається «теорія Марстона-Шпенглера», або «формула Айова».

Максимальна ордината горизонтального тиску ґрунту визначається залежністю:

$$p_x = \frac{\Delta x \cdot E'}{2r}, \quad (6)$$

де Δx – горизонтальна лінійна деформація кільця; E' – модуль горизонтальної деформації ґрунту (модуль пасивної деформації ґрунту).

Горизонтальна деформація труби Δx визначається за формулою:

$$\Delta x = K_1 \frac{K_B P_c r^3}{E_p I_p + 0,061 E r^3}, \quad (7)$$

де K_1 – емпіричний коефіцієнт, що враховує появу додаткових радіальних деформацій, викликаних довготривалими процесами в ґрунті засипки; K_B – коефіцієнт умов обпирання труби на фундамент; P_c – вертикальне навантаження від ґрунту та тимчасового навантаження на одиницю довжини труби; r – середній радіус труби; E_p – модуль пружності матеріалу труби; I_p – момент інерції перерізу труби на одиницю довжини труби; E' – модуль горизонтальної деформації ґрунту засипки.

Коефіцієнт умов роботи труби на фундаменті K_B у формулі (7) залежить від кута постелі труби α . Він змінюється у межах [0,083...0,110]. Для випадку фундаменту, що не змінює свою щільність у процесі експлуатації, приймають $K_B = 0,1$.

Вертикальне навантаження від ґрунту та тимчасового навантаження на одиницю довжини труби становить:

$$P_c = 2r(p_v + p_g), \quad (8)$$

де p_v – вертикальне тимчасове рівномірно-розподілене на довжині $2r$ навантаження від рухомого транспорту; p_g – вертикальне рівномірно-розподілене на довжині $2r$ навантаження від власної ваги ґрунту.

Коефіцієнт, що враховує появу додаткових радіальних деформацій викликаних довготривалими процесами в ґрунті засипки K_1 приймається рівним 1,5. У сучасних спорудах, де засипку виконують ґрунтом спеціально підібраного гранулометричного складу приймають $K_1 = 1,0$.

Стискаюче вертикальне зусилля у перерізі кільця площиною xOy на одиницю довжини труби дорівнює половині навантаження від ґрунту та тимчасового навантаження

$$N = r(p_v + p_g). \quad (9)$$

Коефіцієнт надійності стиснених перерізів не вводиться. Проте виконується контроль величини напружень розтягу в крайніх волокнах перерізів. Моменти в перерізах мають значення:

$$M = 0,08 p r^2, \quad (10)$$

де $p = (p_v + p_g)$ – повне рівномірно-розподілене вертикальне навантаження на довжині $2r$.

Для жорстких труб теорія тиску А. Марстона була надалі розвинена в роботах Г. К. Клейна [3], Н. М. Виногорова [14], В. А. Ярошенка [6] та ін.

Методика Клейна ґрунтується на припущенні, що в процесі деформування труба зазнає опору ґрунту, внаслідок чого відбувається деяке зменшення напружень у матеріалі труби. У розрахунках дане припущення відображено введенням коефіцієнта зменшення згинальних моментів. Що стосується тисків на гнучкі труби, то рекомендації на цей рахунок, як правило, передбачали коефіцієнт C рівним 1,0 [8].

У якості розрахункової моделі ґрунту для оцінки взаємодії МГК із засипкою найбільш поширеними були моделі Вінклера і модель пружної півплощини.

Модель основи Вінклера ($p = kw$) піддавалася критиці оскільки коефіцієнт опору k є невизначеною величиною і не може бути виражений через основні характеристики ґрунтів – модуль деформації E_0 і коефіцієнт Пуассона ν_0 . Проте у зв'язку з простим вираженням залежності $p = kw$, багато авторів [9, 10] висловлюються за збереження в розрахунках цієї залежності, але при більш обґрунтованому визначенні коефіцієнта k .

Широкого застосування отримала розрахункова модель пружної півплощини. У якій зв'язок між переміщеннями середовища в точці з координатами (x, y) і реактивним тиском p приймається у вигляді рівняння:

$$w = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(\zeta, \eta) K(x - \zeta; y - \eta) d\zeta d\eta. \quad (11)$$

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

У роботі [11] О. Є. Бугаєвою отримано прості розрахункові формули для зусиль в трубі від вертикального рівномірно розподіленого навантаження у найбільш небезпечному перерізі труби становить:

$$\begin{aligned} M_{00} &= 0,25qr^2(1-0,056n); \\ N_{00} &= 0,042qrn \end{aligned} \quad (12)$$

де $n = \frac{1}{0,06416 + \left(\frac{EI}{kr^4}\right)}$; k – коефіцієнт опору

грунту радіальним переміщенням стінки труби; r – середній радіус поперечного перерізу труби; EI – циліндрична жорсткість; q – інтенсивність рівномірного вертикального тиску на рівні у склепінні труби.

Основним недоліком даного методу є припущення про форму пружної лінії кільця, яка не залежить від характеристик ґрунту і самої конструкції.

Для уточнення лінії деформації труби Р. Прево [12] рекомендує розраховувати МГК у два етапи. На першому етапі пропонується розраховувати кільце без урахування пружного відпору ґрунту («вільне кільце») на вертикальне зрівноважене навантаження зверху і знизу труби. На другому етапі проводиться розрахунок кільця на навантаження від пружного відтиску ґрунту засипки.

Одним з методів, у якому пружна лінія деформації конструкції не задається, а виходить, як результат розрахунку є метод Метропроекту. При розрахунку за цим методом, розробленим Б. П. Бодровим і Б. Ф. Матері [13], кругова вісь підземного кільця замінюється 16-кутником, суцільним навантаженням зосередженими силами, прикладеними у вершинах багатокутника, а реакції основи – пружними опорами у всіх вершинах багатокутника, за винятком трьох верхніх, розташованих у безопорній зоні, що відповідає призначенню нульових точок для переміщень на границях першого квадранта під кутом $\pm 45^\circ$.

Наближеність методу Метропроекта полягає у заміні безперервної кривої контуру кільця ламаною полігональною лінією, в заміні неперервних реакцій – зосередженими, а крім того в прийнятті жорсткості радіальних в'язів однако-вими по контуру труби.

У 1936 р. опублікована робота Д. В. Вайнберга [14], в якій арка розглядається, як плоский стержень малої кривизни. Автор отримав наступне диференціальне рівняння (у дотичних переміщеннях):

$$\frac{d^6 u}{d\varphi^6} + 2\frac{d^4 u}{d\varphi^4} + \mu^2 \frac{d^2 u}{d\varphi^2} = 0. \quad (13)$$

У другій роботі Д. В. Вайнберг [15] розглянув кругову арку на пружній основі, яка чинить опір не тільки радіальним переміщення бруса ω , але і дотичним u . Відповідне рівняння має вигляд

$$\frac{d^6 u}{d\varphi^6} + a_4 \frac{d^4 u}{d\varphi^4} + \mu^2 \frac{d^2 u}{d\varphi^2} - a_6 u = 0. \quad (14)$$

У роботі Б. Г. Гальоркіна [16] розглядалася осесиметрична задача Ляме для труби, підданої дії внутрішнього тиску, температури та закладеної у вінклерівське пружне середовище. Одержано залежність між коефіцієнтом постелі k і модулем деформації середовища E_0 :

$$k = \frac{E_0}{(1 + \mu_0)r}, \quad (15)$$

де μ_0 – коефіцієнт Пуассона пружного середовища.

У 1952 р. з'явилася робота Л. М. Ємельянова [17], у якій ґрунт, навколо труби, розглядався, як вінклерівське пружне середовище з двома характеристиками. Було складено диференціальне рівняння шостого порядку типу виразу (14), але з правою частиною, що враховує зовнішнє навантаження. Інтенсивність навантаження p і p_1 і радіальне переміщення стінки труби і представлені у вигляді тригонометричних рядів; у рядах отримані і розрахункові формули. Вирішено ряд прикладів, що представляють практичний інтерес. Наприклад, при дії навантаження величина згинального моменту є рівною:

$$M = qr \left[\frac{9 \cos 2\varphi}{8(9 + \mu^2)} - \frac{6}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\varphi \right], \quad (16)$$

$$\text{де } a_n = \frac{(n^2 - 1) \sin 0,5\pi n}{n(n^2 - 4) \left[(n^2 - 1)^2 + \mu^2 \right]};$$

$$\mu^2 = 1 + \frac{kr^4}{EI}. \quad (17)$$

Для завантаження кільця розрахункова формула для найбільшого моменту визначається за формулою:

$$M = 0,25qr^2\xi_0, \quad (18)$$

де

$$\xi_0 = \frac{1}{0,889 + 0,111\mu^2}. \quad (19)$$

У роботі [18] Л. М. Ємельянов відмовився від гіпотези «коефіцієнта постелі» і розглядав ґрунт, як лінійно-деформативне пружне середовище.

У роботі [19] порівнювалися результати розрахунку тонкостінної труби на опорах по теорії пружних оболонок (В. З. Власова) і з елементарним рішенням опору матеріалів. У кінці роботи висловлені міркування про розрахунок циліндричної оболонки, частково, або повністю укладеної в пружне середовище. Однак у роботах [19, 20] верхня безвідпирна зона труби не враховувалась.

Згідно із роботою [3] до розрахунку підземних трубопроводів, як просторових оболонок, необхідно вдаватися лише у випадках, коли вони мають кільця жорсткі, або коли вони лежать на окремих опорах. Підземний трубопровід, лежить на ґрунтовій підставі і працюючий в умовах плоскої деформації, розраховується на поперечні навантаження, як кільце одиничної ширини.

Не маючи можливості описати інші численні роботи, відзначимо, що розрахунками гнучкого кільця, пов'язаного з пружним відтиском в умовах плоскої задачі займалися І. А. Баславський [21], Г. К. Клейн [22], Н. Н. Шапошников [23] та ін.

У світовій практиці розрахунку будівельних конструкцій для оцінки їх несучої здатності використовується метод граничних станів [24]. Відповідно до якого розрахунок конструкції проводиться по міцності, витривалості та тріщиностійкості (перший граничний стан) і надмірним деформаціям (другий граничний стан). Проте для МГК в ґрунті склалися невизначеності при побудові розрахункової схеми і визначенні внутрішніх зусиль, що ускладнює послідовне використання методу граничних станів.

Ґрунтовний огляд зарубіжної літератури по підземних трубопроводах до 1960 р. зроблено в книзі Р. Прево [12]. В огляді наголошується відсутність достатньо точних і науково обґрунтованих методів розрахунку. Розрахунки труб засновані на напівемпіричних формулах, запропонованих різними авторами. Аналітична методика теорії пружності наведена у роботах Burns і Richard (1964), Hoeg (1966), Krizek (1971), Peck (1972). Розроблена на основі співвідношень задач плоскої теорії пружності. Покладено припущення лінійно-пружних однорідних, ізотропних матеріалів конструкції та ґрунту. Застосована для випадків високого шару засипки над конструкцією.

Описані методики відносяться до так званих традиційних («старих»). З 90-х років минулого століття розроблена низка сучасних методик дослідження сумісної взаємодії податливих металевих конструкцій з навколишнім ґрунтом.

Теорія обтискання кільця (White і Layer – 1960) передбачала після проведення доброго ущільнення засипки і достатньо великої висоти шару ґрунту над конструкцією трубу можна моделювати, як тонке кільце під дією обтискання. Теорія ґрунтується на тому, що нерівномірний тиск має незначний вплив на величину і розклад осевих сил (Marston, Spangler). Зазначений факт справджується для випадку, коли висота шару засипки над конструкцією більша за 1/8 поперечного розміру труби. Теорія враховує випадок труб некругового перерізу і ущільнення ґрунту під час проведення засипки. Впливом згинальних моментів нехтується.

З середини 70-х років минулого століття почали розвиватися методи, враховуючі нелінійну роботу ґрунту МГК і відсік ґрунту. При цьому використовуються потужні обчислювальні комплекси, що базуються на методі кінцевих елементів (Kosmos, Ansys, Plaxis та ін), а ґрунт моделюється пружним або пружно-пластичним середовищем. Передбачається, що точність розрахунків забезпечується дрібною сіткою розбивки ґрунтової області на кінцеві елементи. Однак результати розрахунків у багатьох випадках сильно відрізняються від натурних даних. Це пов'язано з тим, що в розрахунках моделі ґрунту не враховуються його важливих властивостей, таких як зростання модуля пружності ґрунту з глибиною, при статичних і динамічних навантаженнях.

Результати

Узагальнивши в 1968-1970 рр. вітчизняний і зарубіжний досвід застосування гофрованого металу для будівництва малих штучних споруд, особливо водопропускних труб, був розроблений метод розрахунку гнучких сталевих труб по граничній статичній рівновазі, який закладений в основу Технічних вказівок по проектуванню, виготовленню і спорудженню металевих гофрованих водопропускних труб (ВСН 176-78) на залізничних і автомобільних дорогах [25]. Даний метод реалізує ідею деформаційного критерію руйнування, який виражається умовою

$$\frac{dq}{df} = 0, \quad (20)$$

де $f = \Delta D$ – зменшення вертикального діаметра труби від діючої на неї вертикального навантаження q .

Гіпотези закладені в основу моделі сформулюються таким чином: вертикальне навантаження по верху труби є рівномірно розподіленим на ширині $D = 2r$ (рис. 1); пасивний опір ґрунту розподіленого по частині деформованого контуру труби; у граничному стані в оболонці труби утворюються пластичні шарніри.

Умовою міцності за першим граничним станом системи «конструкція-ґрунт» є задоволення нерівності

$$q = q_p, \quad (21)$$

де q – розрахункова інтенсивність вертикального тиску ґрунту на трубу від постійних і тимчасових навантажень; q_p – розрахункова інтенсивність пасивного опору ґрунту (несуча здатність труби) за умови статичної рівноваги системи «конструкція – ґрунт».

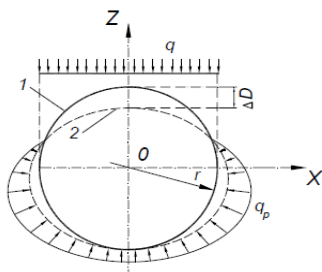


Рис. 1. Модель ВСН 176-78:

1 – недеформований контур труби; 2 – деформований контур труби

Розрахункова інтенсивність – несуча здатність труби визначається залежністю:

$$q_p = K_{ys} \cdot q_{1,p}, \quad (22)$$

де K_{ys} – коефіцієнт збільшення несучої здатності труби за рахунок пружного пасивного опору ґрунту:

$$K_{ys} = 1 + \frac{12,1 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{G}}, \quad (23)$$

де $q_{1,p}$ – розрахункова несуча здатність труби заданої марки сталі в умовах без ґрунту засипки:

$$q_{1,p} = 0,032 \cdot 10^{16} \frac{W^2}{D^2}, \quad (24)$$

де W – момент опору поздовжнього (на одиницю довжини труби) перерізу оболонки; D – діаметр труби по середній лінії гофрів; G – узагальнений показник жорсткості системи «конструкція – ґрунт»:

$$G = \frac{W}{D^2 E_{gr}}, \quad (25)$$

де E_{gr} – компресійний модуль деформації ґрунту засипки.

Граничне горизонтальне збільшення діаметра труби, що відповідає статичній рівновазі системи визначається залежністю аналогічній (14), отриманої для випадку епюри q_p (див. рис. 1).

$$\Delta D' = \frac{1,1 q_p D^3}{0,96 EI + 0,0052 E_p D^3}, \quad (26)$$

де E – модуль пружності сталі; I – момент інерції поздовжнього перерізу на одиницю довжини труби; q_p – характеристичне значення інтенсивності пасивного опору ґрунту за умови статичної рівноваги системи «конструкція – ґрунт».

Розрахунок труби на загальну стійкість за критерієм (11) зводиться до перевірки стисненого перерізу на дію розрахункової стискальної сили, з урахуванням коефіцієнта зниження несучої здатності з метою запобігання втрати стійкості оболонки труби. При цьому прийма-

ється, що оболонка є під дією рівномірно-розподіленого навантаження по контуру труби. Значення цього навантаження приймається рівним розрахунковій інтенсивності вертикального тиску ґрунту на трубу від постійних і тимчасових навантажень q . Умова стійкості має вид:

$$\frac{N}{\varphi A} \leq 0,7R_0, \quad (27)$$

де A – площа поперечного перерізу оболонки на одиницю довжини труби; φ – коефіцієнт зниження несучої здатності; R_0 – розрахунковий опір сталі при дії осьових сил; N – розрахункова, нормальна до перерізу, центрально прикладена сила

$$N = \frac{qD}{2}, \quad (28)$$

де q – як і в нерівності (17), є розрахункова інтенсивність вертикального тиску ґрунту на трубу від постійних і тимчасових навантажень.

У нормативному документі ВСН 176-78 [25] наведено детально визначення коефіцієнта зниження несучої здатності φ .

Розрахунок МГК за міцністю виконується відповідно до ДБН В.2.3-14 [27] за формулою:

$$\frac{N}{A} \leq R_y m, \quad (29)$$

де N – нормальне (тангенціальне) зусилля в гофрованій конструкції від розрахункових навантажень, що припадають на довжину λ однієї гофри, H ; A – площа перерізу однієї хвилі гофри, см^2 ; R_y – розрахунковий опір сталі за границею текучості, прийнятий відповідно до ДБН В.2.3-14, Па; $m = 0,9$ – коефіцієнт умов роботи.

Нормальне (тангенціальне) зусилля N у споруді від розрахункових навантажень, що припадають на довжину λ однієї гофри визначається за формулою:

$$N = \frac{\gamma \cdot n \cdot \chi \left(h_{eq} + h + \frac{D}{2} \right) \cdot \lambda}{2 + \frac{E_0}{E} \cdot \frac{D}{\delta} \cdot (1 - \nu^2)} + \frac{\gamma_{sh} n_1 \delta \frac{D}{2} \lambda}{1 + \frac{\delta^2}{3D^2}}, \quad (30)$$

де γ – питома вага ґрунту засипки, Н/м^3 ; $n = 1,3$ і $n_1 = 1,1$ – коефіцієнти перевантаження згідно з ДБН В.2.3-14; h_{eq} – умовна висота насипу, еквівалентна дії тимчасового автомобільного навантаження:

$$h_{eq} = \frac{q}{\gamma \cdot (a_0 + h)}, \quad (31)$$

де a_0 – ширина смуги руху для навантаження НК-80 (НГ-60) згідно з ДБН В.2.3-14, м; h – відстань від верху дорожнього одягу до верху конструкції, м; q – еквівалентне навантаження, відповідно до ДБН В.2.3-14 в залежності від довжини і форми лінії впливу; D – діаметр гофрованої конструкції, м; E_0 – модуль деформації ґрунту засипки, Па; E – модуль пружності сталі, Па; δ – умовна товщина листа круглої гофрованої конструкції, яка має таку ж погонну згинальну жорсткість, що і гофрована, наприклад, для гофрів з $\lambda = 0,164$ м; $\nu = 0,25$ – коефіцієнт Пуассона матеріалу споруди; γ_{sh} – питома вага матеріалу МГК, Н/м^3 .

Методика взаємодії з ґрунтом (SCI Soil-Culvert Interaction, 1983). Методику запропонували Duncan і Drawsky [29]. Методика розроблена на підставі багаторічних досліджень інженерних споруд, проведених на моделях спостережень та виконаних числових розрахунків методом скінчених елементів. Враховано як вплив стискуючих сил, так і згинальних моментів на стінки конструкції та нелінійні напруження і деформації ґрунту. Показано, що підвищення жорсткості ґрунту (модуля деформації) зменшує вплив згинальних моментів на напружено-деформований стан конструкції. Тому у методиці враховано дві фази роботи конструкції: 1) фаза монтажу, коли засипка досягла верху труби; 2) кінцева фаза, коли засипка досягла проектної висоти. За критерій роботоспроможності взято недопущення початку пластичних деформацій в стінках труби. Це досягнуто введенням у розрахунки відповідного коефіцієнта запасу. Акцентовано увагу на ущільненні засипки.

Методика Vaslestada (1990 р.) запропонована для конструкцій великих поперечних перерізів. Враховує дію лише осьових сил, приймає

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ється, що значна частина навантажень сприймається ґрунтом. Досліджено несучу здатність стінок труби на стиск та деформацію верху конструкції під час укладання та ущільнення засипки та вплив тертя ґрунту на величину стискуючої сили [31]. Модель описує появу явища розпирання конструкції під дією верхнього шару ґрунту над трубою.

Наведемо, ще ряд методик, що використовуються для оцінки несучої здатності металевих гофрованих конструкцій. Методика OHBDC (Ontario Highway Bridge Design Code. Ця методика розроблена на основі американських (1992) норм проектування мостів. Ґрунтується на припущенні домінуючої ролі осьових сил у стінках труби. Розроблені розрахунки міцності стінок конструкції на стиск, міцність швів, монтажної жорсткості. Методика враховує випадок труб розімкнутого поперечного перерізу, явище розпирання конструкції, вплив ступеня ущільнення ґрунту на величину модуля його деформації. Враховано податливість конструкції.

Методика AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1996). Американська методика розроблена відповідно до норм проектування мостів американської спілки працівників автострад і транспорту [28]. Подібно до методики OHBDC нехтує впливом згинальних моментів і враховує лише осьові сили. Наведені розрахунки міцності швів, випучування (втрата стійкості) стінок конструкції, монтажної жорсткості, враховано можливість виникнення пластичних деформацій у стінках труби. Дає можливість досліджувати конструкції з перерізом типу рами. Враховані динамічні коефіцієнти для випадку змінних навантажень.

Методика CHBDC (Canadian Highway Bridge Design Code). Ця методика розроблена на основі Канадських (2000 р.) норм проектування мостів [30]. Ґрунтується на припущенні домінуючої ролі осьових сил в стінках труби. Розроблені розрахунки міцності стінок конструкції на стиск, міцність швів, монтажної жорсткості. Методика враховує випадок труб розімкнутого поперечного перерізу та явище розпирання конструкції і вплив ступеня ущільнення ґрунту на величину модуля його деформації. Враховано також податливість конструкції, що дозво-

ляє проектувати конструкції скриньового перерізу.

Одна з найновіших методик це методика Sundquista-Pettersona (2000 р.). [32]. Ґрунтується на основі описаних вище методик та досвіду, набутого з проведених експериментів по руйнуванню конструкцій, використовує аналітичні підходи теорії пружності і геотехніки. Застосована для випадків, коли найбільший поперечний розмір труби $B \geq 2$ м і висота шару ґрунту над верхом конструкції $H \geq 0,6$ м та $H/B \geq 0,125$ м. Для оцінки несучої здатності враховує осьову силу і згинальний момент, кут внутрішнього тертя засипки та динамічне навантаження від рухомого транспортного засобу. Характеризується достатньою універсальністю і враховує податливість конструкцій з гофрованих металевих листів.

Наукова новизна та практична значимість

Вперше проведено аналіз методик розрахунку та досвіду проектування гнучких металевих гофрованих конструкцій при взаємодії із ґрунтовою засипкою і при впливі навантажень від рухомого складу залізничного та автомобільного транспорту. Розрахункові моделі, що враховують просторову роботу конструкцій, є більш коректними ніж «плоскі» моделі та розрахункові схеми і тому при розрахунку МГК потрібно застосовувати саме тривимірні моделі розрахунку, які найбільш реально моделюють роботу металевих гофрованих конструкцій.

Отриманий аналіз методик оцінки несучої здатності металевих гофрованих конструкцій різної форми поперечного перерізу, можуть бути використані інженерами Мостовипробувальних станцій Укрзалізниці та Укравтодору та проектними організаціями, які займаються проектуванням та спорудженням МГК.

Висновки

1. Розрахункові моделі, що враховують просторову роботу конструкцій, є більш коректними ніж «плоскі» моделі та розрахункові схеми і тому при розрахунку МГК надійніше застосовувати саме тривимірні моделі розрахунку.

2. Як видно з проведеного аналізу, застосування методу сил до аочної моделі гофрованої металевої конструкції і скінчено елементної

моделі без урахування несиметричності поведінки гофрованої конструкції в процесі навантаження дає результати, які відрізняються від експериментальних даних, особливо при великих навантаженнях. Оскільки, у розрахункових моделях не закладалася можливість несиметричної поведінки, то вона не позначилася на результатах розрахунку.

3. При розрахунку гофрованої металевої конструкції необхідно приділяти увагу не тільки моделюванню поведінки самої гофрованої конструкції, але і правильному вибору роботи ґрунтової засипки з урахуванням її можливої неоднорідності і включення в роботу, як додаткового несучого шару.

4. Проведений вище аналіз дозволяє констатувати, що при аналізі поведінки таких складних конструкцій, як гофрована оболонка при взаємодії з ґрунтом, проведення експериментальних досліджень є необхідним елементом дослідження, так як побудова і використання розрахункових моделей без урахування ефектів, що з'являються в процесі експерименту, може призвести до не завжди правильних результатів про несучу здатність і взагалі про поведінку гофрованих конструкцій, із взаємодіючим ґрунтом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Герцог, А. А. Гофрированные трубы на автомобильных дорогах [Текст] / А. А. Герцог. – Москва : Гушосдор, 1939. – 112 с.
- Гнедовский, В. Н. Трубы под железнодорожными насыпями [Текст] / В. Н. Гнедовский. – Москва : Трансжелдориздат, 1938. – 267 с.
- Клейн, Г. К. Расчет подземных трубопроводов [Текст] / Г. К. Клейн. – Москва : Стройиздат, 1969. – 240 с.
- Виноградов, С. В. Натурные испытания на прочность и устойчивость подземных стальных тонкостенных труб большого диаметра [Текст] / С. В. Виноградов, Ю. М. Кружалов. – Москва : Отдел научно-технической информации. – 1959. – 48 с.
- Янковский, О. А. Экспериментальные исследования водопропускных труб из гофрированного металла на опытных объектах и в лабораторных условиях с разработкой предложений по конструкциям и условиям сооружения серии опытных металлических труб в разных районах страны для включения в план строительства на 1971-1972 гг. [Текст] / О. А. Янковский // Строительство железных дорог // Реф. сборник. Трансп. стр.-во. – № 1. – Москва, 1972. – С. 14.
- Ярошенко, В. А. Водопропускные трубы под железнодорожными насыпями [Текст] / В. А. Ярошенко // Труды ЦНИИС. – Москва : Трансжелдориздат, 1952. – Вып. 5. – 231 с.
- Корецкий, А. С. Анализ моделей розрахунку труб системи «конструкція-ґрунт» [Текст] / А. С. Корецкий, А. І. Лянтух-Лященко, К. В. Медведєв. – 2010. – С. 131-137.
- Виноградов, С. В. Расчет подземных трубопроводов на внешние нагрузки [Текст] / С. В. Виноградов – Москва : Стройиздат, 1980. – 135 с.
- Колоколов, Н. М., Металлические гофрированные трубы под насыпями [Текст] / Н. М. Колоколов, О. А. Янковский, К. Б. Щербина, С. Э. Черняховская, под общ. ред. Н. М. Колоколова. – Москва : Транспорт, 1973. – 120 с.
- Бугаева, О. Е. Проектирование обделок транспортных тоннелей [Текст] / О. Е. Бугаева. – Ленинград, 1966. – 75 с.
- Прево, Р. Расчет на прочность трубопроводов, заложенных в ґрунт [Текст] / Р. Прево. – Москва, 1964. – 123 с.
- Бодров, Б. П. Кольцо в упругой среде [Текст] / Б. П. Бодров, Б. Ф. Матэри // Бюллетень Метропроекта. – 1939. – № 24. – 92 с.
- Вайнберг, Д. В. Арки на сплошном упругом основании [Текст] / Д. В. Вайнберг // Труды Сб. тр. Киевского строительного института. – Киев, 1936. – Вып. 3.
- Вайнберг, Д. В. Кривой брус в упругой среде [Текст] / Д. В. Вайнберг // Прикладная математика и механика. – 1939. – Т. 3. – Вып. 4.
- Галеркин, Б. Г. Напряженное состояние цилиндрической трубы в упругой среде [Текст]: Собрание сочинений / Б. Г. Галеркин. – Москва : АН СССР, 1952. – Т. 1.
- Емельянов, Л. М. О расчете подземных гибких труб [Текст] / Л. М. Емельянов // Строительная механика и расчет сооружений. – 1961. – JV2 1. – С. 1-7.
- Емельянов, Л. Н. О расчете тонкостенных труб, заложенных в землю [Текст] / Л. М. Емельянов // Гидротехника и мелиорация. – 1952. – JV210. – С. 18-39.
- Леонтьев, Н. Н. Практический расчет тонкостенной трубы на упругом основании [Текст] / Н. Н. Леонтьев // Сб. трудов Московского инженерно-строительного института. – 1957.
- Баженов, В. А. Изгиб цилиндрических оболочек в упругой среде [Текст] / В. А. Баженов. – Львов, 1975.
- Баславский, И. А. Устойчивость подземных труб. Гидротехническое строительство. [Текст] / И. А. Баславский. – 1964. – № 24.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

21. Клейн, Г. К. Расчет труб, уложенных в земле [Текст] / Г. К. Клейн. – Москва : Госстройиздат, 1957. – 195 с.
22. Шапошников, Н. Н. Расчет круговых тоннельных обделок на упругом основании, характеризуемом двумя коэффициентами постели [Текст] / Н. Н. Шапошников. – Труды МИИТ, 1961. – Вып. 131.
23. Брик, А. Л. Морозостойкие защитные покрытия металлических гофрированных водопропускных труб [Текст]: исп. в строительстве / А. Л. Брик, В. П. Кузьмин, Г. С. Карапетова, А. В. Ненашев // Вопросы проектирования и эксплуатации искусственных сооружений. – Ленинград 1983. – С. 78–84.
24. ВСН 176-78. Инструкция по проектированию и постройке металлических гофрированных водопропускных труб [Текст]. – Введ. 1978-08-15. – Москва : Оргтрансстрой, 1979. – 131 с.
25. Фрезе, М. В. Взаимодействие металлических гофрированных конструкций с грунтовой средой [Текст] : дисс. канд. тех. наук / М. В. Фрезе. – Санкт-Петербург, 2006. – 162 с.
26. Посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007 Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування [Текст] : рекомендовано науково-технічною радою ДерждорНДІ від 17 листопада 2006 р. № 14 – Київ, 2007. – 122 с.
27. AASHTO: Standart Specifications for Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 N. Capitol St., N. W., Ste. 249, Washington, D. C., 2001.
28. Duncan J. M., Drawsky R. H. Design Procedures for Flexible Metal Culvert Structures, Reports No. UCB/GT/83-02, Department of Civil Eng., University of California, Berkeley 1983.
29. Handbook of steel drainage and highway construction products, American Iron and Steel Institute, 2ed edition, Canada, June 2002.
30. Vaslestad J. Long-term behaviour of flexible large-span culverts, Norwegian Public Road Administration – Publication No. 74, Oslo, 1994. 38 p.
31. Waster M. RORBROAR. Verifiering av nyutvecklat dimensioneringsprogram samt vidareutveckling for jernvagstrafik. Orebro University, Sweden, 2008. – 143 p.

И. И. ЛУЧКО¹, Ю. Е. КОВАЛЬЧУК², И. Б. КРАВЕЦ^{3*}

¹ Кафедра «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (097) 033 18 36, эл. почта lychko.diit@mail.ru, ORCID 0000-0002-3675-0503

² Кафедра «Строительное производство», Национальный университет «Львовская политехника» ул. Карпинского, 6, г. Львов, Украина, 79013, тел. +38 (067) 360 22 22, эл. почта tzov.lviv.bud@gmail.com, ORCID 0000-0002-1151-5785

^{3*} Кафедра «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (097) 479 00 50, эл. почта kravetsivan2017@gmail.com

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Цель. Целью работы является проведение анализа методов расчета и оценки несущей способности металлических гофрированных конструкций (далее МГК) при взаимодействии с грунтовой засыпкой в результате действия нагрузок от подвижного состава железных дорог или автотранспорта. Обосновать возможность применения данных методов при расчете труб различного диаметра и различной конструктивной формы. **Методика.** Анализируются методы расчета напряженно-деформированного состояния металлических гофрированных конструкций труб малого диаметра (до 3 м.) При постоянных нагрузках и методы расчета МГК большого диаметра более 6 м. **Результаты.** Расчетные модели, учитывающие пространственную работу конструкций, более корректными чем «плоские» модели и расчетные схемы и поэтому при расчете МГК следует применять именно трехмерные модели расчета, наиболее реально моделируют работу металлических гофрированных конструкций. **Научная новизна.** Впервые проведен анализ методик расчета и опыта проектирования гибких металлических гофрированных конструкций при взаимодействии с грунтовой засыпкой и при воздействии нагрузок от подвижного состава железнодорожного и автомобильного транспорта. **Практическое значение.** Полученный анализ методик оценки несущей способности металлических гофрированных конструкций различной формы поперечного сечения, могут быть использованы инженерами Мостоиспытательных станций Укрзалізнички и Укравтодора и проектными организациями, которые занимаются проектированием и сооружением МГК.

Ключевые слова: металлическая гофрированная конструкция; методики; анализ; несущая способность; изгибающие моменты; поперечные силы

J. LUCHKO¹, Y. KOVALCHUK², I. KRAVETS^{3*}

¹ Department «Bridges and Tunnels» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2 Lazaryan Str., Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 033 18 36, e-mail lychko.diit@mail.ru
ORCID 0000-0002-3675-0503

² Dept. of Construction industry, National University Lviv Polytechnic 12 S. Bandera str., Lviv, Ukraine, tel. +38 (067) 360 22 22, e-mail tzov.lviv.bud@gmail.com, ORCID 0000-0002-1151-5785

³ Department «Bridges and Tunnels» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2 Lazaryan Str., Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 479 00 50, e-mail kravetsivan2017@gmail.com

METHODS OF ASSESSING THE BEARING CAPACITY OF CORRUGATED METAL STRUCTURES

Purpose. The aim of the research is to analyze the methods of calculating and evaluation of the bearing capacity of corrugated metal structures (the CMS) in cooperation with soil backfill as a result of stress from rolling stock or vehicles. To prove the applicability of these methods for the calculation of pipes of different diameters and different structural forms. **Methodology.** The methods of calculating the deflected mode of corrugated metal pipes of small diameter (up to 3 m.) at constant load, and calculation methods CMS of large diameter more than 6 m are analyzed. **Findings.** The calculated models that take into account the spatial work of structures is more correct than "flat" models and calculated scheme, and therefore the calculation of the CMS is to apply three-dimensional calculation model which model the most realistic work of corrugated metal structures. **Originality.** For the first time the methods of calculation and experience designing of flexible corrugated metal structures at interaction of soil backfill and under the influence of the stress from the rolling stock and road transport are analyzed. **Practical value.** The obtained analysis of the evaluation methodologies of the bearing capacity of corrugated metal structures of different shape section can be used by engineers in bridge probationary stations Ukrainian Railroad (UR) and Ukravtodor and project organizations involved in the design and construction of the CMS.

Keywords: corrugated metal structure; methodology; analysis; bearing capacity; bending moments; shear forces

REFERENCES

1. Gertsog A.A. *Gofrirovannyye truby na avtomobilnykh dorogakh* [Corrugated pipes on the roads]. Moscow, Gushosdor Publ., 1939. 112 p.
2. Gnedovskiy V.N. *Truby pod zheleznodorozhnymi nasypami* [Pipes under the railway embankments]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1938. 267 p.
3. Kleyn, G. K. *Raschet podzemnykh truboprovodov* [Calculation of underground pipelines]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1969. 240 p.
4. Vinogradov S. V., Kruzhalov Yu. M. *Naturnye ispytaniya na prochnost i ustoychivost podzemnykh stalnykh tonkostennykh trub bolshogo diametra* [Full-scale tests for the strength and stability of underground steel thin-walled pipes of large diameter]. Moscow, Otdel nauchno-tekhnicheskoy informatsii. Publ, 1959. 48 p.
5. Yankovskiy O. A. *Eksperymentalnye issledovaniya vodopropusknykh trub iz gofrirovannogo metalla na opytnykh obektakh i v laboratornykh usloviyakh s razrabotkoy predlozheniy po konstruksiyam i usloviyam sooruzheniya serii opytnykh metallicheskih trub v raznykh rayonakh strany dlya vklyucheniya v plan 162 stroitelstva na 1971-1972* [Experimental studies of corrugated metal culverts on experimental sites and in laboratory conditions, with the development of proposals for structures and conditions for the construction of a series of experimental metal pipes in different regions of the country for inclusion in the construction plan for 1971-1972]. *Stroitelstvo zheleznykh dorog – Construction of railways*, Transportnoe stroitelstvo., no.1, Moscow, 1972. 14 p.
6. Yaroshenko V. A. *Vodopropusknye truby pod zheleznodorozhnymi nasypami* [Culverts under railway embankments]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1952, issue 5, 231 p.
7. Koretskyi A. S., Liantukh-Liashchenko A. I., Medvediev K. V. *Analiz modelei rozrakhunku trub systemy «konstruktsiia-hrunt»* [Analysis of models of calculation of pipe system «design-soil»]. 2010. pp. 131-137.
8. Vinogradov S. V. *Raschet podzemnykh truboprovodov na vneshnie nagruzki* [Calculation of underground pipelines for external loads]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980. 135 p.
9. Kolokolov N. M., Yankovskiy O. A., Shcherbina K. B., Chernyakhovskaya S. E. *Metallicheskie gofrirovannyye truby pod nasypami* [Metal corrugated pipes under embankments]. Moscow, Transport Publ., 1973. 120 p.
10. Bugaeva O. Ye. *Proektirovanie obdelok transportnykh tonneley* [Designing of lining of transport tunnels].

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Leningrad., 1966. 75 p.
11. Prevo R. *Raschet na prochnost truboprovodov, zalozhennykh v grunt* [Calculation of the strength of pipelines laid in the ground]. Moscow, 1964. 123 p.
 12. Bodrov B. P., Materi B. F. *Koltso v uprugoy srede* [Ring in an elastic medium]. *Byulleten Metroproekta – Metroproekt Newsletter*, 1939, issue 24, 92 p.
 13. Vaynberg D. V. *Arki na sploshnom uprugom osnovanii* [Arches on a solid elastic foundation]. *Sbornik trudov Kievskogo stroitel'nogo instituta* [Collection of works of the Kiev Construction Institute], Kyjiv, 1936, issue 3.
 14. Vaynberg D. V. *Krivoy brus v uprugoy srede* [Curved beam in an elastic medium]. *Prikladnaya matematika i mekhanika – Applied Mathematics and Mechanics*, 1939, vol. 3, issue 4.
 15. Galerkin, B. G. *Napryazhennoe sostoyanie tsilindricheskoy truby v uprugoy srede* [Stress state of a cylindrical tube in an elastic medium]. Moscow, Akademiya Nauk SSSR., 1952, vol. 1.
 16. Yemelyanov L. M. *O raschete podzemnykh gibkikh trub* [About calculation of underground flexible pipes]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy – Structural Mechanics and Structures Calculation*, 1961. JV2 1. pp. 1-7.
 17. Yemelyanov L. N. *O raschete tonkostennykh trub, zalozhennykh v zemlyu* [On the calculation of thin-walled pipes laid in the ground]. *Gidrotekhnika i melioratsiya – Hydrotechnics and Land Reclamation*, 1952. JV210. pp. 18-39.
 18. Leontev N. N. *Prakticheskiy raschet tonkostennoy truby na uprugom osnovanii* [Practical calculation of a thin-walled pipe on an elastic base] *Sbornik trudov Moskovskogo inzhenerno-stroitel'nogo instituta*. Moscow, 1957.
 19. Bazhenov V. A. *Izgib tsilindricheskikh obolochek v uprugoy srede* [Bending of cylindrical shells in an elastic medium]. Lvov, 1975.
 20. Baslavskiy I. A. *Ustoychivost podzemnykh trub. Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*. [Stability of underground pipes. Hydraulic engineering.], 1964, issue 24.
 21. Kleyn G. K. *Raschet trub, ulozhennykh v zemle* [Calculation of pipes laid in the ground]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1957. 195 p.
 22. Shaposhnikov N. N. *Raschet krugovykh tonnelnykh obdelok na uprugom osnovanii, kharakterizuemom dvumya koeffitsientami posteli* [Calculation of circular tunnel lining on an elastic foundation characterized by two bed coefficients]. *Trudy Moskovskogo instituta inzhenerov transporta*, 1961, issue 131.
 23. Brik A. L., Kuzmin V. P., Karapetova G. S., Nenashev A. V. *Morozostoykie zashchitnye pokrytiya metallicheskikh gofrirovannykh vodopropusknykh trub* [Frost-resistant protective coatings for metal corrugated culverts]. *Voprosy proektirovaniya i ekspluatatsii iskusstvennykh sooruzheniy*. Leningrad, 1983. pp. 78-84.
 24. VSN 176-78. *Instruktsiya po proyektirovaniyu i postroyke metallicheskikh gofrirovannykh vodopropusknykh trub* [VSN 176-78. Instructions for design and construction of corrugated metal pipe culverts]. Moscow, Orgtransstroy Publ., 1979. 131 p.
 25. Freze M. V. *Vzaimodeystvie metallicheskikh gofrirovannykh konstruksiy s gruntovoy sredoy*. Diss. kand. tekhn. nauk [Interaction of metal corrugated structures with a soil medium]. St. Petersburg, 2006. 162 p.
 26. Posibnyk do VBN V.2.3-218-198:2007 *Sporudy transportu. Proektuvannia ta budivnytstvo sporud iz metalevykh hofrovanykh konstruksii na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannia* [V.2.3-218-198:2007 Constructions of transport. Design and construction of structures from metal corrugated structures on public highways]. Kyjiv, 2007. 122 p.
 27. AASHTO: *Standart Specifications for Highway Bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 N. Capitol St., N. W., Ste. 249, Washington, D. C., 2001.
 28. Duncan J. M., Drawsky R. H. *Design Procedures for Flexible Metal Culvert Structures*, Reports No. UCB/GT/83-02, Department of Civil Eng., University of California, Berkeley, 1983.
 29. *Handbook of steel drainage and highway construction products*, American Iron and Steel Institute, 2ed edition, Canada, June 2002.
 30. Vaslestad J. *Long-term behaviour of flexible large-span culverts*, Norwegian Public Road Administration – Publication No. 74, Oslo, 1994. 38 p.
 31. Waster M. *RORBROAR. Verifiering av nyutvecklat dimensioneringsprogram samt vidareutveckling for jernvagstrafik*. Orebro University, Sweden, 2008. 143 p.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М. М. Біляєвим (Україна), к.т.н, доц. І. Г. Іваник (Україна).

Надійшла до редколегії 20.08.2017.

Прийнята до друку 25.09.2017.