

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗНИЧНИХ ДЕФЕКТНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТРУБ ВІДНОВЛЕНИХ МЕТАЛЕВИМИ ГОФРОВАНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ

В. В. Ковальчук

Кандидат технічних наук

Кафедра «Рухомий склад і колія»

Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
вул. І. Блажкевич, 12а, м. Львів, Україна, 79052

E-mail: kovalchuk.diit@gmail.com

Р. В. Маркуль

Кандидат технічних наук

Кафедра «Колія та колійне господарство»

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010

А. Я. Пенцак

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: apentsak1963@gmail.com

Б. З. Парнета

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: f_termit@yahoo.com

О. М. Гайда

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: gajda@ukr.net

С. П. Брайченко

Кандидат технічних наук, старший викладач*

E-mail: Lpi2015@ukr.net

*Кафедра «Будівельне виробництво»

Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

Розроблено перспективні технології ремонту дефектних залізобетонних труб із використанням металевих гофрованих конструкцій. Наведено методіку розрахунку величин сил тиску на вершину залізобетонної труби, яка підсилена металевою гофрованою трубою, при статичних та динамічних навантаженнях у залежності від висоти засипки. За результатами статичних та динамічних сил тиску, методом скінченних елементів розраховується напружено-деформований стан труби при взаємодії із ґрунтом засипки

Ключові слова: залізобетонна труба, металева гофрована конструкція, дефект, статичне і динамічне навантаження, напруження, деформації

Разработаны перспективные технологии ремонта дефектных железобетонных труб с использованием металлических гофрированных конструкций. Приведена методика расчета величин сил давления на вершину железобетонной трубы, усиленная металлической гофрированной трубой, при статических и динамических нагрузках в зависимости от высоты засыпки. По результатам статических и динамических сил давления, методом конечных элементов рассчитывается напряженно-деформированное состояние трубы при взаимодействии с почвой засыпки

Ключевые слова: железобетонная труба, металлическая гофрированная конструкция, дефект, статическая и динамическая нагрузка, напряжение, деформации

1. Вступ

Одним із головних напрямків економічної політики держави є підвищення ефективності роботи всіх галузей народного господарства. Вирішення цього завдання у галузі капітального будівництва транспортних споруд пов'язано із раціональним використанням виділених капітальних вкладень. Підвищення ефективності капітальних вкладень значною мірою залежать від обґрунтованості рішень, прийнятих на стадії проектування та ремонту

об'єктів, що досягається впровадженням прогресивних конструкцій і будівельних матеріалів.

При будівництві нових залізничних магістралей та автомобільних доріг споруджується значна кількість залізобетонних водопропускних труб (більше 50 % від всіх транспортних споруд). Тому вибір економічно доцільних конструкцій труб забезпечить ефективне капіталовкладення, призведе до збільшення їх терміну служби, а це у свою чергу надасть можливість державі зекономити витрати коштів їх ремонт.

Проведені дослідження спрямовані на розробку перспективних технологій ремонту дефектних залізобетонних труб із використання металевих гофрованих конструкцій. Оскільки останнім часом відбувається погіршення стану водопропускних залізобетонних труб, у тому числі побудованих і за типовими проектами. Це зумовлено впливом навколишнього середовища, фізичним зносом і старінням матеріалів і конструкцій, зростаючими обсягами залізничних та автомобільних перевезень, підвищенням осьових навантажень та швидкостей руху транспорту. Виникаючі у процесі експлуатації дефекти залізобетонних труб потребують ремонтних заходів. Так, за даними Державної адміністрації залізничного транспорту України (Укрзалізниця) на залізницях експлуатується 10940 водопропускних труб із яких 259 дефектних. За даними служби автомобільних доріг України (Укравтодору) в експлуатації знаходиться 129053 водопропускних труби з яких 37425 є дефектними [1]. Якщо брати тільки труби, то, в середньому, при мережі автомобільних доріг загального користування 169739 км, кількість складає біля однієї (0,8) труби на один кілометр, 29 % із цих труб вимагають ремонтних заходів [2]. Зважаючи на те, що за останніх 5 років виконувався ремонт не в повній мірі, то відсоток труб, які потребують ремонтних заходів ще збільшився [1].

Оскільки в умовах економічного розвитку держави є вкрай необхідним забезпечити безперервність транспортних потоків, розробка та впровадження нових технологій ремонту існуючих дефектних залізобетонних труб є актуальною і потрібною задачею. А це є можливим при застосуванні перспективних технологій ремонту.

Розроблені перспективні технології ремонту та проведені дослідження нададуть можливість інженерам відновити дефектні залізобетонні споруди не зупиняючи залізничний чи автомобільний транспортні засоби. Це питання є особливо актуальним на прикордонних транспортних шляхах, які з'єднують Україну з країнами Європейського Союзу. Де одним із методів збільшення терміну служби дефектних залізобетонних труб є застосування металевих гофрованих конструкцій.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Перші відомості про використання комбінованих водопропускних труб із металевих гофрованих конструкцій у транспортному будівництві Росії датуються 1875 р., з 1914 р. будівництво припинилося, хоча дослідження їхньої роботи тривали, оскільки відомі праці вчених [3, 4]. І тільки у кінці сімдесятих років ХХ століття будівництво металевих гофрованих труб (МГТ) відновилося [5]. При розробці цих конструкцій виходили із використання освоєних у виробництві елементів типових круглих труб діаметром 2,0 м і 3,0 м із гофрованих листів товщиною 2,5 мм з гофром розміром 130×32,5 мм [5]. Порівняння з подібними закордонними трубами отвором 1,5–3,0 м [6], але з гофром розміром 150×50 мм показали, що вітчизняні труби при мінімальних товщинах 2,7–3,0 мм мають менший момент опору – в 1,49–1,75 рази [7]. У зв'язку з цим було зроблено висновки, що застосування труб із гофрованих елементів товщиною 2,5 мм з гофром розміром 130×32,5 мм потребує додаткових досліджень. У роботі [8] зазначено, що менші площі поперечного перерізу стінки склепінь металевих гофрованих труб одночасно

є показником ефективності по витраті металу. У порівнянні з металевими гофрованими трубами розміром гофрованих листів 150×50 мм, може бути в 1,14–3,0 рази менше, що робить ці конструкції більш перспективними транспортними спорудами з економічної точки зору [9].

Великий досвід застосування металевих гофрованих конструкцій накопичений у США [10], Канаді, країнах Західної Європи [11], а також у Японії.

В Україні конструкції із металевих гофрованих листів впроваджені тільки у 90-х роках ХХ ст. [1, 2]. Існуючі нормативний документ ВБН В.2.3-218-198:2007 [12] стосується тільки розрахунку та проектування металевих гофрованих труб отвором до 3 м, а рекомендації ОДМ 218.2.001-2009 [13] – проектування труб отвором до 6 м. Взагалі відсутні нормативні дані про проектування комбінованих труб. Тому дана проблема є актуальною і потребує проведення досліджень роботи металевих гофрованих конструкцій при взаємодії із ґрунтом засипки і доповнення існуючих нормативних документів.

Із проведеного аналізу випливає, що недостатньо досліджений характер та величина деформацій склепіння і тиску ґрунту засипки на склепіння, а також відсутній аналіз несучої здатності комбінованих труб (залізобетонних підсиленних гофрованими металевими трубами).

Також встановлено, що розглянуті конструкції при позитивних властивостях характеризуються відносно низькою надійністю і довговічністю. У процесі експлуатації у багатьох випадках спостерігається зростання недопустимих деформацій, а саме збільшення горизонтального та зменшення вертикального діаметрів труби. Для виключення недопустимих деформацій труб необхідно у подальшому розвинути методи розрахунку МГК, які працюють спільно з ґрунтом засипки, що дозволяють прогнозувати міцність і довговічність МГК.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є розробка перспективних технологій ремонту дефектних водопропускних залізобетонних труб, методом гільзування, із використанням гофрованого металу на залізничних та автомобільних дорогах із визначенням міцності методом скінчених елементів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити технологію відновлення дефектних залізобетонних труб із використанням металевих гофрованих конструкцій на залізничних коліях;
- провести розрахунок вертикального та горизонтального сил тисків на трубу від дії рухомого складу залізниць;
- провести оцінку напружено-деформованого стану відновленої залізобетонної труби методом скінчених елементів.

4. Технологія ремонту дефектних залізобетонних труб із використанням металевих гофрованих конструкцій

При ремонті дефектних залізобетонних труб пропонується використання методу гільзування. Його суть полягає у тому, що у внутрішню частину існуючої дефектної залізобетонної труби вводиться конструкція із гофрованого металу. Наступним етапом є заповнення простору

між існуючим об'єктом і стінкою конструкції, або труби із гофрованих листів бетоном (рис. 1). Ця технологія дозволяє виконувати повне й ефективне заповнення цього простору [12–17]. Метод дозволяє відремонтувати існуючий об'єкт без припинення руху й виключає необхідність його розбирання.

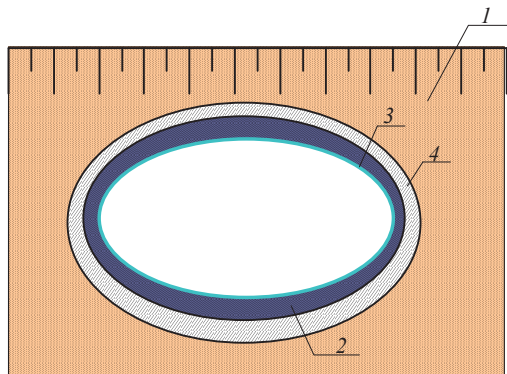


Рис. 1. Схематичне зображення ремонту залізобетонних труб за допомогою «методу гільзування»: 1 – насип; 2 – простір заповнений бетоном; 3 – металева гофрована конструкція; 4 – дефектна залізобетонна труба

У результаті такого з'єднання отримуємо багатшарову конструкцію з важкою для описання розрахунковою моделлю, у тому числі через сумісну роботу елементів, які значно відрізняються один від одного фізико-механічними характеристиками.

Технологія ремонту «методом гільзування» передбачає виконання послідовності операцій, які зазначені на рис. 2. Дана технологія складається із двох основних етапів, а саме проектування та будівництва. На етапі проектування необхідно провести вишукувальні роботи, підібрати діаметр конструкції та розрахувати довговічність запроєктованої конструкції.

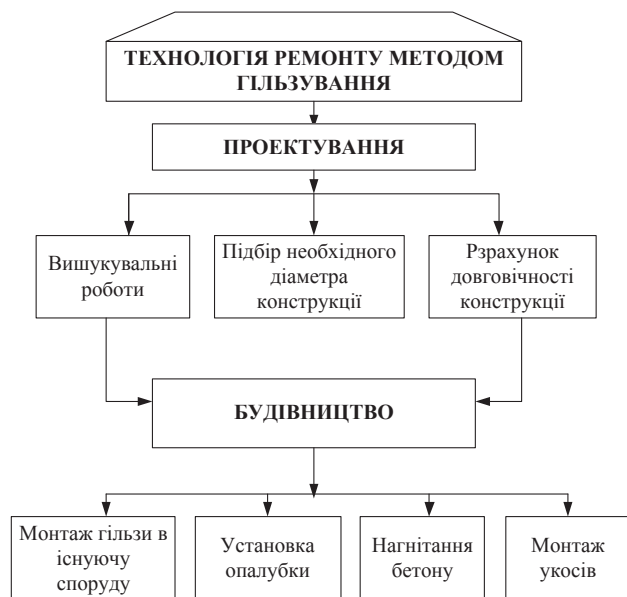


Рис. 2. Послідовність етапів ремонту дефектних залізобетонних водопропускних труб «методом гільзування»

При виборі форми конструкції з гофрованого металу потрібно керуватися двома основними критеріями: формою конструкції, яка ремонтується; необхідним отвором об'єкта після ремонту. Оскільки відремонтована труба буде мати зменшений отвір для пропуску води, то на етапі проектування необхідно застосувати відповідні матеріали металевої гофрованої конструкції, які мають менший коефіцієнт шорсткості. У деяких випадках зменшення отвору необов'язково повинно викликати обмеження гідравлічних властивостей конструкції, яку зміцнюють. Це впливає із відносно низької величини показника шорсткості по Маннінгу « n », який для гофрованих труб знаходиться у межах $n=0,013-0,033$. Тому, введення конструкції гофрованого металу з меншим коефіцієнтом шорсткості, ніж є в об'єкта, який ремонтується, призведе до покращення гідравлічні характеристик відремонтованої водопропускної труби.

Найчастіше для ремонту інженерних об'єктів «методом гільзування» використовуються наступні форми перерізу конструкцій, або труб з гофрованого металу: переріз з плоскою основою; круглий переріз та арковий переріз. Під час проектування інженерам доводиться підібрати форму поперечного перерізу МГК, яка б була максимально пристосована до форми існуючого об'єкту. Проте часто буває так, що конструкцію, якою підсилюватимемо існуючу споруду, проектують індивідуально, яка буде відрізнятися від форми існуючого ремонтного об'єкту.

На етапі будівництва виконують монтаж гільзи (металева гофрована труба) в існуючу споруду, установлюють опалубку, після чого нагнітають бетонну суміш і після набору нею проектної міцності демонтують опалубку і роблять монтаж укосів насипу.

Під час монтажу необхідно влаштувати обмежувачів, які запобігають переміщенню конструкції в ході ущільнення бетону (особливо перед заповненням). Простір, який буде заповнено бетоном, не потрібно додатково армувати, але якщо таке рішення буде прийняте, арматуру слід прикріпити до склепіння існуючих об'єктів.

Металеві оцинковані гофровані конструкції найчастіше вбудовуються двома способами [12, 13]. Перший спосіб полягає у монтажі труби, загальна довжина якої відповідає довжині об'єкту, чи є більшою при необхідності подовження існуючої водопропускної труби. А другий спосіб передбачає послідовне з'єднання ланок труби під час монтажу, у середині дефектної залізобетонної труби.

Враховуючи, що поперечні перерізи дефектних труб, які ремонтуються – різні за формою та розміром, використовують різні матеріали та способи заповнення вільного простору між ремонтною трубою і металевою гофрованою конструкцією. Найчастіше, як заповнювачі, використовують литий бетон і піщані суміші. Матеріал, яким заповнюють, повинен забезпечити спільну роботу об'єкта, який ремонтують, й конструкції з гофрованого металу, тому важливим є правильне, щільне заповнення вільного простору без утворення повітряних порожнин. Простір між існуючим об'єктом і трубою необхідно заповнювати бетонною сумішшю рідкої маси під тиском 0,6 МПа таким чином, щоб суміш заповнила весь простір між конструкціями. Рекомендується [12] використовувати бетон класу С12/15 на заповнювачі з максимальним діаметром зерен 16 мм та марки за морозостійкістю, яка відповідає вимогам, що висуваються до конструкцій

даного регіону, які експлуатуються у водному середовищі [12, 13]. Бетонні суміші необхідно ущільнити за допомогою глибинних вібраторів. Однак, слід використовувати обережно, щоб запобігти пошкодженню МГК. Допускається також застосовувати бетони, які самі розширюються й самоупільнюються.

Рекомендується залишити, як мінімум 100 мм вільного простору від зовнішнього контуру металевої гофрованої конструкції до існуючого об'єкту. Заповнення простору бетонною сумішшю слід виконувати симетрично по обидва боки труби, попередньо захистивши від виштовхування, або переміщення силою плавучості рідкого бетону. Для цього рекомендується баластувати трубу, наприклад, мішками з піском, використовувати розпори, або бетонувати поетапно [12, 13]. А для того, щоб бетонна суміш могла вільно заповнити простір між трубою та існуючою конструкцією, слід виконати повітревідвідні канали в кількості і місці, відповідних довжині і габаритам об'єкта. Важливим є правильне видалення повітря із простору, який необхідно заповнити. Видалення виконується через отвори, які знаходяться у верхній частині простору, що підлягає заповненню (рис. 3, 4). Також служать, як оглядові отвори для контролю ступеня заповнення. Бетонну суміш можна подавати чотирма способами: від торця стінки (опалубки), яка обмежує витікання суміші (рис. 3, а); через отвори, які просвердлено в дорожньому полотні та проходять через конструкцію старого об'єкта (рис. 3, б); через отвори, які просвердлені в тілі насипу й проходять через конструкцію існуючого об'єкта та через технологічні отвори конструкції, або труби з гофрованих листів (рис. 4).

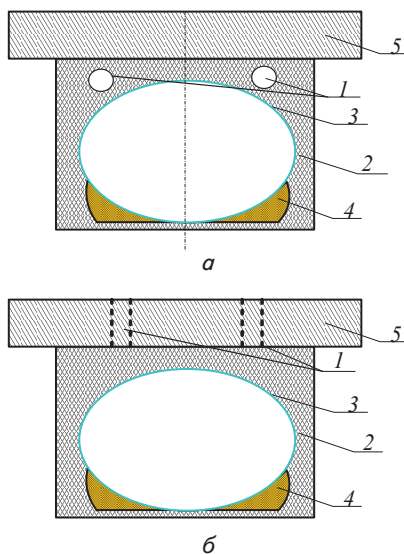


Рис. 3. Отвори для подачі бетону: а – розміщені в торці опалубки; б – розміщені в площадці старого об'єкту: 1 – отвори для подачі (оглядові); 2 – опалубка; 3 – конструкція з гофрованого металу; 4 – подушка з піску, або гранвідсіву; 5 – плита площадки об'єкта, який ремонтується

Перед початком подачі суміші потрібно зробити опалубку (рис. 4), встановлену на стиках кінців об'єкта, який ремонтується з новою встановленою конструкцією. Замість дерев'яної опалубки можливе викладення стінки

із цегли, або каменю, яка руйнується після тужавіння розчину.

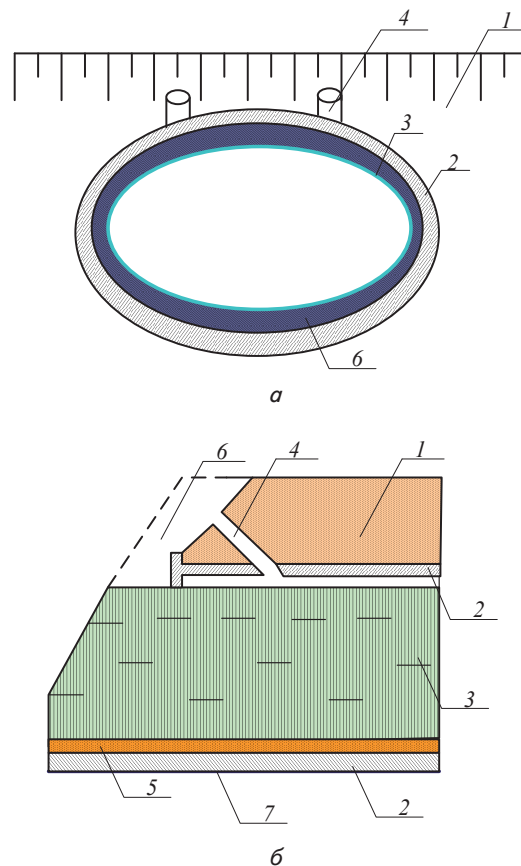


Рис. 4. Отвори для подачі бетону, розміщені у насипі: а – вид з торця подачі бетону; б – поздовжній переріз, об'єкту; 1 – насип; 2 – об'єкт, який ремонтується; 3 – конструкція з гофрованого металу; 4 – отвори для подачі бетону, або оглядові; 5 – подушка з піску, або гравію із розширення насипу; 6 – опалубка, геотекстиль, або геосітка

У випадку подачі бетонної суміші від торця можна застосовувати східчасту зміну рівня подачі. Проте дана технологія застосовується для об'єктів з отвором труби діаметром більшим за 3,5 м і більшим простором для заповнення (відстань до стінки старого об'єкта більша за 1,0 м). Діаметр отворів для подачі бетонної суміші повинен забезпечувати вільне проходження шланга при цьому він повинен бути не менше 25 см.

Заповнення простору виконується гравійно-піщаною сумішшю, або пісок із фракцією менше 4,5 мм і неоднорідною зернистістю. Гравійна суміш повинна бути добре ущільнена – рекомендується коефіцієнт ущільнення від 0,98 до 1,0. При цьому ущільнення повинно виконуватись шарами по 0,2–0,3 м.

Зустрічаються випадки, коли при посиленні об'єктів необхідно виконувати подовження. При цьому виникає необхідність спорудження насипу, який влаштовують на подовженні ділянки МГК, або труб. Таке рішення дуже практичне, оскільки воно дає можливість подальшого подовження об'єкта після зняття насипу над вхідною й вихідною частинами об'єкта, який ремонтується. Таке подовження здійснюється за допомогою приєднання чер-

гових листів до існуючої конструкції й повторного відсіпання насипу.

5. Дослідження горизонтального та вертикального тиску на трубу від рухомого складу залізничного транспорту

Труби розраховують на постійні навантаження від ваги ґрунту насипу і на тимчасове вертикальне рухоме навантаження, розташоване на насипі. Обидва ці навантаження, передаючись через насип, викликають вертикальний і горизонтальний тиск на ланки труби. Схеми навантаження на трубу та розрахункові схеми наведені на рис. 5 [10].

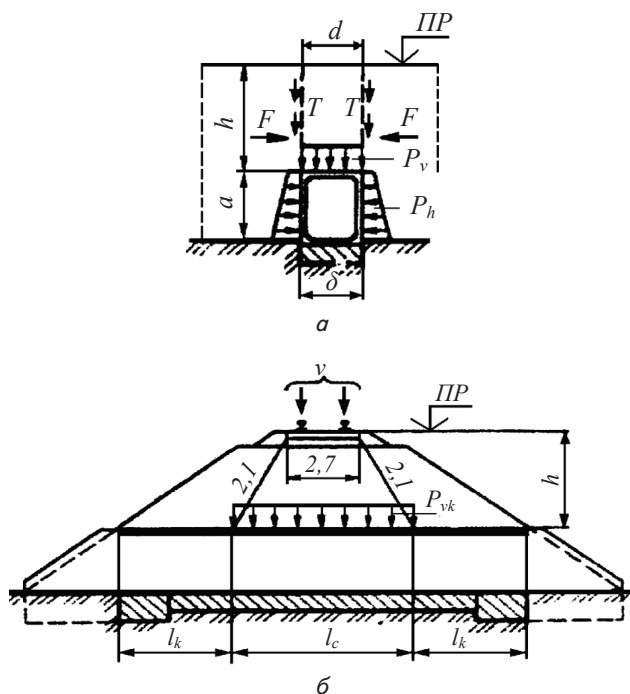


Рис. 5. Схема навантажень на трубу:
а – тиск власної ваги насипу; б – тиск тимчасового рухомого навантаження

Вертикальний тиск на трубу від постійного навантаження визначають із врахуванням сил тертя, які діють на вертикальні площині, що обмежують стовп насипу під трубою (рис. 5). Ці сили тертя виникають унаслідок того, що осідання насипу відбувається у перший період після його відсіпання над трубою менше, ніж на ділянках поряд з трубою. Різниця осідання досягає максимального значення на рівні верху труби, а на рівні поїзда вона значно менша, особливо при високих насипах.

Сили тертя F , що діють на стовп насипу над трубою, направлені вниз, оскільки ділянки насипу із боків труби, розташовані поряд із стовпом який ми розглядаємо, будуть спускатися. Величину сил тертя можна визначити, помноживши сили нормального тиску на граничні площини і на коефіцієнт внутрішнього тертя ґрунту насипу. Тому тиск ґрунту насипу на трубу виявляється більшим за вагу стовпа ґрунту, розташованого над трубою.

Величину вертикального рівномірно розподіленого тиску на трубу (γ МПа) визначають за формулою:

$$P = C\gamma_n H, \quad (1)$$

де $C > 1$ – безрозмірний коефіцієнт, який враховує сили тертя; γ_n – об'ємна вага насипу ґрунту, т/м³; H – висота стовпа ґрунту від верху труби до підшви шпали, або до верху дорожнього покриття, м.

Величину коефіцієнта C визначають із наступних міркувань. Сила тертя по одній із площин, віднесена до 1 м² горизонтальної проекції труби шириною D рівна:

$$F = \frac{E}{D} \operatorname{tg}(\varphi_n), \quad (2)$$

де $E = 1/2\gamma_n H^2 \mu$ – активний тиск ґрунту на 1 п. м довжини площини, яка обмежує стовп ґрунту над трубою;

$$\mu = \operatorname{tg}^2(45 - \varphi_n/2),$$

де φ_n – нормативний кут внутрішнього тертя ґрунту.

Значення γ_n і φ_n , як правило, приймаються на підставі лабораторних досліджень зразків ґрунтів, що призначені для засипки споруди. При типовому проектуванні для визначення характеристичного тиску ґрунту припускається приймати щільність ґрунту засипки $\gamma_n = 17,7$ кН/м³ (1,80 тс/м³), характеристичні кути внутрішнього тертя φ_n слід приймати: для стоянів при засипанні піщаним (дренувальним) ґрунтом $\varphi_n = 35^\circ$; для ланок труб, що знаходяться у насипу, $\varphi_n = 30^\circ$; для оголовок труб $\varphi_n = 25^\circ$.

Сума сил тертя по двох площинах над трубою, буде рівною:

$$2F = \frac{2E}{D} \operatorname{tg} \varphi_n = \frac{\gamma_i}{D} H^2 \mu \operatorname{tg} \varphi_n. \quad (3)$$

Тому, застосовуючи формулу (3) визначаємо коефіцієнт C для невисокого насипу:

$$N = 1 + \frac{H}{D} \mu \operatorname{tg} \varphi_n = 1 + A \mu \operatorname{tg} \varphi_n. \quad (4)$$

При високому насипу, коли на деякій висоті осідання над трубою і по боках труби вирівнюються, можна одержати на основі аналогічних міркувань уточнене значення величини

$$A = \frac{Sh}{H} \left(2 - \frac{SDn}{H^2} \right), \quad (5)$$

де h – висота труби, м; s – коефіцієнт відносної жорсткості основи, рівний 15 при скельній, або пальовій основі, 10 – при основі із щільних пісків, твердих і туго пластичних глин і суглинків і 5 при основі із рудих пісків, м'яко-пластичних суглинків і глин.

При доброму ущільненні насипу в час його відсіпки вертикальний тиск на трубу зменшується внаслідок меншої величини осідання. У цьому випадку для труб під автодорогами дозволяється знижувати коефіцієнт C на 30 %. При $Sh/H = H/D$ потрібно приймати $A = H/D$.

Горизонтальний постійний тиск ґрунту насипу на трубу (МПа) визначають за формулою:

$$e_p = \mu \gamma_n H', \quad (6)$$

де $H' = H$ для круглих труб і $H' = H + h/2$ для прямокутних труб.

Тимчасове вертикальне навантаження, розташоване на насипі, також викликає вертикальний і горизонтальний тиск ґрунту на трубу (рис. 1). Воно розподіляється у насипі під кутом, рівним $\arctg 1/2$ до вертикалі. Приймаючи навантаження від залізничного рухомого складу, рівного $2K$ (для навантаження С14 – 28 т/мп колії) і що довжина шпал, через які навантаження розподіляється впоперек вісі колії, рівна 2,7 м, одержимо вертикальний тиск на трубу (т/м²)

$$q = \frac{2K}{2,7 + H} = \frac{28}{2,7 + H} \tag{7}$$

Для труб під автомобільні дороги тиск (1 т/м²) від рухомого навантаження НК-80 можна визначити за формулою

$$q = \frac{19}{H + 3} \tag{8}$$

Якщо висота засипки над трубою менше 1 м, розглядають фактичний тиск на трубу від коліс навантаження НК-100, або НК-80 з врахуванням його розподілу покриттям і насипом.

Горизонтальний тиск також визначають множенням вертикального тиску на μ :

$$e_q = \mu q, \tag{9}$$

де q – визначається для висоти $H' = H$ для круглих труб і $H' = H + h/2$ для прямокутних труб.

Відхилення навантаження від нормативного враховують множенням величини тисків p , e_p , q , e_q на коефіцієнти перевантаження, а відхилення від нормативного кута внутрішнього тертя враховують, приймаючи його на 5° вище, або нижче за нормативний у невигідну для розрахунку конструкції труби сторону.

Ланки круглих труб розраховують як кільця, що працюють в умовах нерівномірного радіального стиску. Найбільші розрахункові згинальні моменти у такому кільці у вертикальних і горизонтальних перерізах (без врахування нормальних і поперечних сил) визначають за формулою:

$$M = \pm v r^2 (n_p P + n_t q) (1 - \mu) \tag{10}$$

Тут враховується вплив постійних тисків p і e_p і тимчасових P і e_q ; n_p і n_t – коефіцієнт перевантаження; μ – нормативний кут внутрішнього тертя $\pm 5^\circ$; r – радіус кільця труби для середини товщини ланки; $v \geq 0,2$ – коефіцієнт, який враховує умови обпирання ланки: для ланок, укладених на фундаменті, $v = 0,22$; на ґрунтову основу – $v = 0,25$.

За цими значеннями згинальних моментів визначають товщину кільця при його нормуванні із умови недопущення тріщин у бетоні.

Для дослідження величин горизонтальних та вертикальних тисків на трубу були вибрані наступні вихідні дані: висота засипки змінювалася від 1 м до 3 м, величина діаметру труби – 2 м; величина щільності ґрунту засипки $\gamma_n = 17,7$ кН/м³; кут внутрішнього тертя ґрунту – $\phi_n = 30^\circ$; коефіцієнт відносної жорсткості основи $S = 1,0$. Для врахування динамічних властивостей від рухомого складу залізниць було прийнято навантаження від залізничного

рухомого складу, рівного $2K$ (для навантаження С14 – 28 т/мп колії) при довжині шпал, через які навантаження розподіляється впоперек вісі колії – рівна 2,7 м.

Для розрахунку сил тиску на трубу була розроблена програма у програмному пакеті Mathcad 14. Результати розрахунку величин горизонтального та вертикального тисків ґрунту від постійного навантаження ґрунту засипки наведені на рис. 6, а від рухомого складу залізниць на рис. 7.

Із рис. 6 видно, що величина, як вертикального так і горизонтального тисків на залізобетонну трубу, яка підсилена металевою гофрованою трубою, при збільшенні висоти засипки ґрунту над нею – збільшується. Так при висоті засипки над трубою 1 м, величина вертикального тиску від постійного навантаження ґрунту становить 17,7 кПа, а горизонтального – 5,9 кПа. При 2 м величина вертикального тиску ґрунту становить 45,62 кПа, горизонтального – 11,8 кПа. І при 3 м величина вертикального тиску ґрунту становить 65,21, а горизонтального – 17,7 кПа.

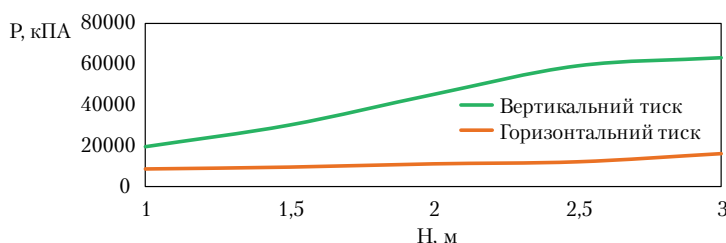


Рис. 6. Величини вертикального та горизонтального тисків на трубу від статичного навантаження рухомого складу залізниць

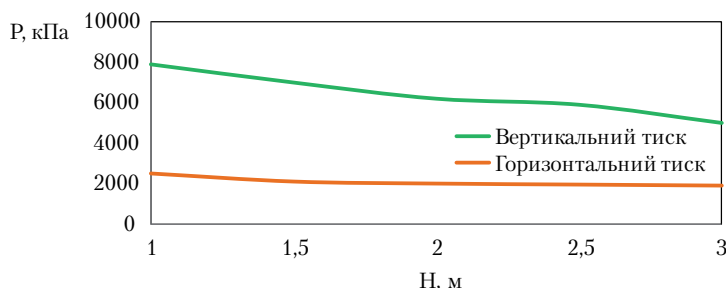


Рис. 7. Величини вертикального та горизонтального тисків на трубу від динамічного навантаження рухомого складу залізниць

Із рис. 7 видно, що величина, як вертикального так і горизонтального тисків, на залізобетонну трубу, які виникають від дії рухомого складу при збільшенні висоти засипки зменшується, що пов'язано із розсіянням енергії у товщі ґрунту. При висоті засипки над трубою 1 м величина вертикального тиску від навантаження С14 становить – 7,568 кПа, а горизонтального – 2,523 кПа, при 2 м величина вертикального тиску ґрунту – 5,957 кПа, горизонтального – 1,986 кПа, при 3 м величина вертикального тиску ґрунту – 4,912 кПа, а горизонтального – 1,637 кПа.

6. Напружено-деформований стан залізобетонної труби, яка підсилена металевою гофрованою конструкцією

Числові дослідження напружено-деформованого стану проведемо при наступних геометричних параметрах залізобетонної труби: діаметр труби 2000 мм; товщина

стілки труби змінна від 150 мм до 200 мм; при температурі навколишнього середовища 20°. Фізико-механічні характеристики труби: для сталі Ст3: $E_1=2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_1=0,3$; $\alpha_1=1,25 \cdot 10^{-5}$ 1/°C; для бетону С25/30: $E_2=3,6 \cdot 10^4$ МПа, $\nu_2=0,25$; $\alpha_2=1,0 \cdot 10^{-5}$ 1/°C.

Граничні умови у даній розрахунковій задачі були наступними, нижня поверхня $x=0$ була жорстко закріплена, а ліва та права поверхні мали вільне переміщення по координаті y .

Розрахунок напружено-деформованого стану залізобетонної труби проведено методом скінченних елементів [15, 17] за допомогою ліцензійної програми FEMAP with MSC NASTRAN.

У даній задачі переріз труби моделюється криволінійним стержнем (одновимірним елементом), а залізобетон – плоскими елементами. Перевагою такого підходу є швидка підготовка моделі та порівняно невелика кількість скінченних елементів. Недоліком зазначеної моделі є неможливість врахування гофрів труби та коректного завдання навантажень від рухомого складу.

За одновимірний елемент вибрано елемент типу BEAM, а за двовимірний скінченний елемент вибрано елемент типу PLATE – чотири вузловий чотирикутник.

Кількість вузлів скінченноелементної сітки становить 15874 шт, які утворюють 7551 елементів.

Результати напружень та деформацій, які виникають від заданих постійних та тимчасових вертикальних та горизонтальних тисків наведені на рис. 8 та рис. 9.

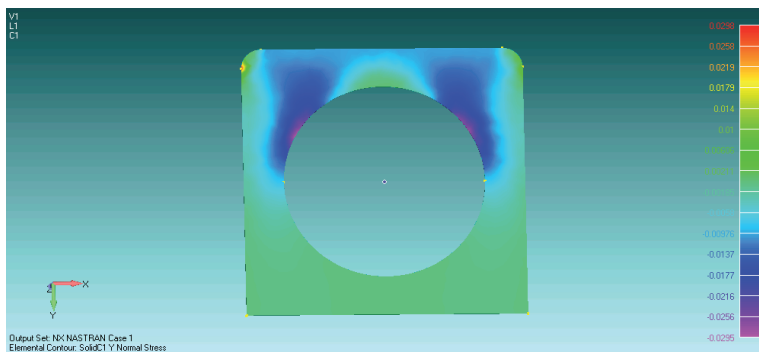


Рис. 8. Вид напружень у трубі

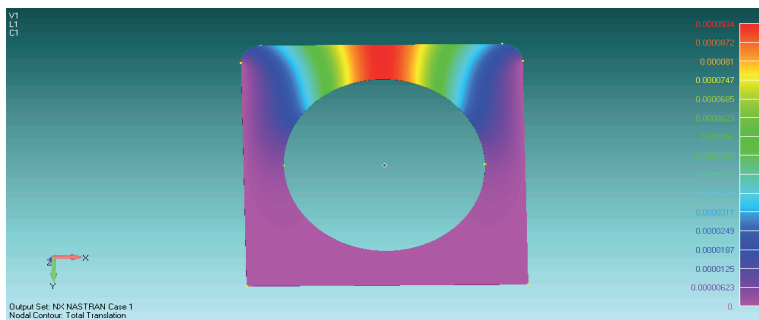


Рис. 9. Вид деформації у трубі

Результати проведеного розрахунку напружено-деформованого стану залізобетонної труби, яка підсилена металевією гофрованою конструкцією показали, що максимальна величина напружень виникає у склепінні труби і становить 0,024 МПа. Деформації складають $9,3 \cdot 10^{-4}$ мм.

7. Обговорення результатів дослідження з метою формування оцінки стану міцності елементів МГК в умовах роботи залізничних колій

Застосування водопропускних труб з використанням гофрованого металу при капітальному ремонті (перебудові) штучних споруд на залізничних та автомобільних дорогах України дозволить зменшити витрати коштів на реконструкцію та подальшу експлуатацію. У зв'язку з цим тема наукового дослідження, спрямованого на вибір раціональної та надійної конструкцій водопропускних труб з використанням гофрованого металу, актуальна і своєчасна для України. Причому актуальність досліджень з часом зростає.

Результати розрахунків сил тисків на склепіння труби показали, що при висоті засипки над трубою 1 м, величина вертикального тиску від постійного навантаження ґрунту становить 17,7 кПа, а горизонтального – 5,9 кПа. При 2 м величина вертикального тиску ґрунту становить 45,62 кПа, горизонтального – 11,8 кПа. І при 3 м величина вертикального тиску ґрунту становить 65,21, а горизонтального – 17,7 кПа.

Результати проведеного розрахунку напружено-деформованого стану залізобетонної труби, яка підсилена металевією гофрованою конструкцією, показали, що максимальна величина напружень виникає у верхній частині труби і становить 0,024 МПа, а деформації при цьому складають $9,3 \cdot 10^{-4}$.

Аналіз несучої здатності МГК за наведеною методикою надає можливість оцінити працездатність МГК у залежності від типу розмірів гофр труби та фізико-механічних характеристик ґрунту засипки. Також використання даної методики дозволяє визначити, при яких геометричних, силових та швидкісних параметрах рухомого складу можлива втрата несучої здатності металевих гофрованих конструкцій.

Отримані результати несучої здатності МГК можуть бути використані інженерами Мостовипробувних станцій Укрзалізниці та Укравтодору та проектними організаціями, з метою подальшого проектування металевих гофрованих конструкцій.

Визначений напружено-деформований стан МГК надає межі формування нормативної бази з надійності транспортних споруд залізниць із врахуванням комплексу вихідних факторів впливу на їх несучу здатність.

Одним із недоліків проведених досліджень є те, що у дослідженні несучої здатності дефектної залізобетонної труби відновленої металевією гофрованою конструкцією використано двовимірну скінченно-елементну модель розрахунку. Тому у подальших науково-дослідних роботах оцінка несучої здатності труби повинна проводитись методом скінченних елементів у тривимірній постановці.

8. Висновки

1. Застосування металевих гофрованих труб при капітальному ремонті залізобетонних труб дозволить не

зупиняти рух залізничного та автомобільного транспорту. Що дозволить виконати відновлювані роботи дефектної труби у незначні терміни та крім того надасть змогу зменшити витрати коштів держави на реконструкцію та подальшу експлуатацію споруд.

2. Величина, як вертикального так і горизонтального тисків, на залізобетонну трубу, які виникають від дії рухомого складу при збільшенні висоти засипки зменшується, що пов'язано із розсіянням енергії у товщі ґрунту. При ви-

соті засипки над трубою 1 м, величина вертикального тиску від постійного навантаження ґрунту становить 17,7 кПа, а горизонтального – 5,9 кПа. При 2 м величина вертикального тиску ґрунту становить 45,62 кПа, горизонтального – 11,8 кПа. І при 3 м величина вертикального тиску ґрунту становить 65,21, а горизонтального – 17,7 кПа.

3. Максимальна величина напружень у комбінованій трубі виникає у склепінню труби і становить 0,024 МПа, що є меншим за допустимі нормативні напруження.

Література

1. Коваль, П. М. Нормування при проектуванні і будівництві споруд з металевих гофрованих конструкцій [Текст] / П. М. Коваль, І. П. Баб'як, Т. М. Сітдикова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту зал. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. – 2010. – № 39. – С. 114–117.
2. Ковальчук, В. В. Стан та проблеми забезпечення довговічності прогонових будов мостів [Текст] / В. В. Ковальчук // Збірник наукових праць ДонІЗТ. – 2012. – № 32. – С. 226–235.
3. Ковальчук, В. В. Вплив товщини гофрованого елемента на напружено-деформований стан металевих гофрованих конструкцій [Текст] / В. В. Ковальчук // Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту. залізн. транспорту ім. академ. В. Лазаряна Наука та прогрес транспорту. – 2015. – Вип. 3 (57). – С. 199–207. doi: 10.15802/stp2015/46079
4. Sysyn, M. P. Die Tragfähigkeit von Eisenbahndurchlässen in Abhängigkeit von der Bauausführung und der Instandhaltung [Text] / M. P. Sysyn, W. W. Kowaltschuk, O. S. Nabotschenko, U. Gerber // ETR – Eisenbahntechnische Rundschau. – 2016. – P. 39–44.
5. Esmaeili, M. Minimum depth of soil cover above long-span soil-steel railway bridges [Text] / M. Esmaeili, J. A. Zakeri, P. H. Abdulrazagh // International Journal of Advanced Structural Engineering. – 2013. – Vol. 5, Issue 1. – P. 7. doi: 10.1186/2008-6695-5-7
6. Черепов, В. В. Варіантне проектування при прийнятті інженерного рішення по відновлення експлуатаційного стану водопропускної труби [Текст] / В. В. Черепов, І. В. Шилін // Енерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування. – Донецьк, 2012. – С. 164–166.
7. Жинкин, А. Проблемы и перспективы типового проектирования металлических гофрированных конструкций [Текст] / А. Жинкин // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 2. – С. 53–54.
8. Металлические гофрированные конструкции: достоинства и перспективы [Текст] // Евразия Вести. Новые технологии. Транспортная газета. Министерство транспорта РФ. – 2008. – № 2. – С. 1–3.
9. Гнатюк, І. Новий «стиль» старого мосту [Електронний ресурс] / І. Гнатюк // Всеукраїнська транспортна газета Магістраль. – 2011. – Режим доступу: <http://www.magistral-uz.com.ua/>
10. Handbook of steel drainage and highway construction products [Text]. – Canada, 2002. – 482 p.
11. Pettersson, L. Design of soil steel composite bridges [Text] / L. Pettersson, H. Sundquist. – Structural Design and Bridges, 2007. – 84 p.
12. 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]. – К., 2007. – 122 с.
13. ОДМ 218.2.001-2009. Рекомендации по проектированию водопропускных металлических гофрированных труб: Распоряжение Федерального дорожного агентства от 21 июля 2009 г [Текст]. – Федеральное дорожное агентство, 2009. – № 252-р. – 126 с.
14. СОУ 45.120-00034045-015:2012. Оцінка технічного стану та експлуатаційної придатності інженерних споруд на залізницях України [Текст]. – К.: Інпрес, 2013. – 99 с.
15. Kovalchuk, V. Research and analysis of the stressed-strained state of metal corrugated structures of railroad tracks [Text] / V. Kovalchuk, J. Luchko, I. Bondarenko, R. Markul, B. Parneta // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 6, Issue 7 (84). – P. 4–9. doi: 10.15587/1729-4061.2016.84236
16. Waster, M. RORBROAR. Verifiering av nyutvecklat dimensioneringsprogram samt vidareutveckling for jernvagstrafik [Text] / M. Waster. – Orebro University, Sweden, 2008. – 143 p.
17. Wysokowski, A. Mostowe konstrukcje gruntowe – powlokowe. Laboratoryjne badania niszczone. Awarie w czasie budowy i eksploatacji [Text] / A. Wysokowski, L. Janusz // XXIII konferencja naukowo-techniczna. – Szczecin, 2007. – P. 541–550.