

Визначення впливу діаметру склопластикової труби на деформований стан транспортної споруди «насип-труба» залізничної колії

В. В. Ковальчук, Ю. Г. Соболевська, А. М. Онищенко, О. М. Баль,
І. Б. Кравець, А. Я. Пенцак, Б. З. Парнета, А. Я. Кузишин, В. В. Боярко,
О. М. Возняк

Проведено аналіз застосування склопластикових труб у тілі насипу залізничної колії методом продавлювання земляного полотна.

Удосконалено плоску стержневу модель для оцінки деформованого стану транспортної споруди «насип-склопластикова труба» методом сил при заміні поперечного перерізу труби полігональним.

В аналітичній моделі враховано взаємодію труби з ґрунтом насипу залізничної колії. Для цього у розрахункову схему вводяться радіальні та тангенціальні пружні в'язі, які дозволяють моделювати пружний відпір ґрунту, а також сили тертя, які виникають при контакті ґрунту з трубою.

Проведено розрахунок деформованого стану транспортної споруди «насип-склопластикова труба» методом сил та методом скінченних елементів при дії навантаження від залізничного рухомого складу із врахуванням різного поперечного перерізу труби.

Встановлено, що із збільшенням діаметру склопластикової труби величина деформацій земляного полотна та склопластикової труби збільшується. При діаметрі труби 1,0 м величина деформації у склепінні труби становить 2,12 мм, а при діаметрі труби 3,6 м–4,16 мм. При цьому величина деформацій земляного полотна під шпалою становить 5,2 мм та 6,0 мм відповідно.

Встановлено, що максимальні деформації земляного полотна, які виникають над трубою, при діаметрі труби 3,6 м становлять 4,46 мм. При цьому максимальні вертикальні деформації склопластикової труби виникають у склепінні труби і при діаметрі труби 3,6 м становлять 4,16 мм.

Встановлено, що максимальні горизонтальні деформації земляного полотна виникають в точках горизонтального діаметру склопластикової труби, а мінімальні горизонтальні деформації земляного полотна виникають в точках, що лежать на вертикальному діаметрі труби.

Ключові слова: земляне полотно, склопластикова труба, залізнична колія, горизонтальні та вертикальні деформації, еквівалентне навантаження.

1. Вступ

Підвищення надійності та безперебійності роботи транспортної інфраструктури є основною запорукою створення умов безпечної та стабільної роботи залізничного та автомобільного транспорту в цілому. Особливу увагу при цьому слід приділяти впровадженню сучасних прогресивних та економічних споруд, які повинні забезпечити безвідмовну роботу протягом гарантійного терміну їх напра-

цювання. На етапах розробки проекту ремонту ділянок доріг або колії потрібно приймати обґрунтовані рішення щодо вибору перспективних конструкцій транспортних споруд. Це дозволило підвищити несучу здатність доріг та зробило більш безпечним пропуск транспортних одиниць.

Водопрпусні труби є важливими конструктивними елементами автомобільних доріг і залізниць. Вони становлять близько 25 % від загальної кількості всіх штучних споруд доріг. Тому від справного функціонування труб залежить загальний стан доріг і безпека руху транспорту.

Зупинення руху поїздів завдає значних економічних втрат для залізничної галузі через простій вантажних та пасажирських поїздів. Для запобігання простоїв та відновлення роботи залізничної колії в умовах підтоплення колії у даній науковій роботі пропонується застосування перспективних склопластикових труб Nobas GRP (далі склопластикових труб).

Слід зазначити, що такі конструкції доцільно застосовувати і на перевезених ділянках залізничної колії. Перевезення призводить до втрати міцності та стійкості земляного полотна залізничної колії, що негативно позначається на провізній та пропускну здатності ділянки залізниці.

Труби Nobas GRP складаються із пластику, армованого скловолокном, та виготовляються методом відцентрового лиття [1]. Такі конструкції у країнах Європейського Союзу вкладаються у насип залізничної колії методом продавлювання. Вигляд експлуатованих склопластикових труб на залізничній колії наведений на рис. 1.



Рис. 1. Процес експлуатації склопластикових труб у тілі насипу залізничної колії [1]

Слід зазначити, що на даний час не має накопиченого досвіду застосування склопластикових труб на залізницях. Тому дослідження із обґрунтування можливості застосування склопластикових труб у тілі насипу залізничної колії при дії рухомого складу залізниць потребує проведення наукових досліджень щодо визначення деформованого стану транспортних споруд «насип-склопластикова труба». Такі дослідження слід проводити із врахуванням специфіки навантажень рухомого складу залізниць та постійних навантажень від ґрунтової засипки і елементів верхньої будови колії.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботі [1] зазначено, що склопластикові труби НОВАС GRP вбудовуються у тіло насипу земляного полотна методом продавлювання без зупинки руху поїздів. Максимальний діаметр труб, який можна встановити методом продавлювання, становить 3600 мм [1].

Основними матеріалами водопропускних труб на сьогодні є залізобетон і гофрована сталь [2]. При реконструкції та заміні дефектних малих мостів і водопропускних труб застосовують металеві гофровані конструкції (далі МГК) [3]. Транспортні споруди із металевих гофрованих конструкцій знайшли широке застосування у країнах Європейського Союзу [4] і також впроваджуються на автомобільних та залізничних дорогах [5] у вигляді водопропускних труб, шляхопроводів, малих мостів тощо [6].

Однак проведені дослідження впливу ґрунтової засипки на деформації металеві труби у роботі [4] не враховують сил тертя, які виникають у контакті труби із ґрунтовою засипкою.

У роботі [5] проведено тільки дослідження із визначення температурних напружень та деформацій металевих гофрованих конструкцій. А у роботі [6] наведено модель розрахунку деформацій труб типу Multiplate MP 150 та проведені дослідження їх деформування у залежності від щільності ґрунтової засипки. Однак модель не враховує сил тертя, які виникають у контакті труби із ґрунтовою засипкою та дію рухомого складу залізниці.

Слід зазначити, що одним із недоліків залізобетонних труб є обмежений розмір поперечного перерізу, обмежена довжина і, як наслідок, велика кількість стикувальних швів. Це потребує ретельної гідроізоляції. Також такі труби схильні до активних корозійних процесів у вигляді вилуговування, що призводить до руйнування труб.

Що стосується сталевих труб, то в порівнянні з залізобетонними вони мають меншу вагу. Але в процесі будівництва багато часу витрачається на монтаж конструкцій, так як сталеві водопропускні труби монтуються із окремих ланок за допомогою болтового з'єднання. Використання оцинкованих гофрованих труб не гарантує довговічності конструкцій з огляду на те, що в процесі експлуатації відбувається стирання захисного покриття і надалі відбувається катастрофічно швидко корозія основного металу.

Крім того у роботі [7] встановлено, що при збільшенні поперечних перерізів споруд із металевих гофрованих конструкцій [7], залишається низькою експлуатаційна надійність, зумовлена експлуатаційними та технічними факторами впливу [8]. Ця особливість викликана тим, що робота споруд із МГК пов'язана із взаємодією металевої оболонки із ґрунтовою засипкою [9]. І тільки при якісному ступені ущільнення можна добитися необхідної несучої здатності транспортних споруд із МГК [10].

При ненормативному ущільненню ґрунтової засипки можуть виникати нерівномірні осідання насипу над МГК, деформації укріплення укосів насипу та найнебезпечніше, залишкові деформації вертикального та горизонтального поперечних перерізів МГК [11].

У роботі [12] встановлено, що при дії динамічного навантаження рухомого складу залізниць щебінь ущільнюється, що викликає утворення нерівностей на колії. Тому для ефективного ущільнення, необхідний час припрацювання щебеневого баласту. А у випадку застосування металевих гофрованих конструкцій, які у початковий період роботи здатні до утворення залишкових деформацій поперечного перерізу, необхідною умовою роботи є досягнення нормативного ступеню ущільнення ґрунтової засипки [13].

Для ремонту і будівництва водопропускних споруд на автомобільних дорогах широко використовуються полімерні труби великих діаметрів [14]. Перші проекти дорожнього будівництва з використанням гофрованих поліетиленових труб відомі в США [15] і проектні розрахунки приведені у роботі [16].

У праці [17] встановлено відносну ефективність поліетиленових труб у порівнянні з трубами з інших матеріалів. Випробування різних труб в аналогічних умовах показали, що поліетиленові труби з профільованою стінкою є міцнішими по робочих характеристиках, ніж «гладкі» труби з більш жорстких матеріалів.

Однак у проаналізованих науково-дослідних роботах [14–17] не вирішено питань оцінки деформованого стану поліетиленових труб при дії транспортних засобів.

Австралія та Нова Зеландія мають ряд спільних нормативних документів, та специфікацій, серед яких TNZ F/2 [18], TNZ F/3 [19], щодо проектування водопропускних труб з полімерних матеріалів на автомобільних дорогах [20]. При цьому конструкція водопропускних труб повинна відповідати Оклендському транспортному кодексу [21].

У роботі [22] встановлено, що важливим фактором експлуатації пластикових труб є вплив транспортного навантаження через ґрунтовий насип. А у роботі [23] доведено, що мінімальну товщину ґрунтового насипу над трубою слід приймати в діапазоні від 0,9 м до 1,2 м. Слід також зазначити, що в деяких країнах висота насипу над трубою становить понад 15 м [24].

Склопластикові труби знайшли широке застосування в різних країнах. У 80-х роках вони застосовані при мікротунелюванні у Гамбурзі із зовнішнім діаметром 752 мм. Пізніше почали успішно застосовуватися у США діаметром від 400 мм до 2200 мм. Після 1999 р. такі конструкції ефективно застосовуються у Польщі та інших країнах світу.

У роботі [24] описані методи досліджень механічних властивостей склопластику на зразках, вирізаних із фрагментів труб. Встановлено, що у всіх зразках руйнування склопластику розвивалося з утворенням тріщини під кутом близько 45° від поверхні труби, протилежної поверхні прикладання навантаження. При насиченні склопластику вологою характер руйнування не змінювався. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані з оцінки деформованого стану склопластикових труб при дії рухомого складу залізниць.

Із виконаного аналізу науково-дослідних робіт встановлено, що теоретичні дослідження деформованого стану транспортних споруд «насип-склопластикова труба» при дії рухомого складу залізничного транспорту не проводилися, автори обмежувалися оцінкою результатів практичного застосування конструкцій такого типу. Тому тема роботи є важливою для проектуван-

ня водопропускних споруд доріг різного призначення та прогнозування їх міцності та надійності.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є визначення впливу діаметру склопластикової труби на деформований стан транспортної споруди «насип-труба» залізничної колії при дії рухомого складу залізничного транспорту. Це дасть можливість отримати обґрунтовані дані деформованого стану склопластикових труб при дії рухомого складу залізниці.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені наступні завдання:

- удосконалити аналітичну модель оцінки деформованого стану склопластикових труб;
- провести дослідження деформованого стану земляного полотна залізничної колії методом скінченних елементів із врахуванням різного поперечного перерізу труби;
- провести дослідження деформованого стану склопластикових труб при різних значеннях поперечного перерізу труби методом скінченних елементів та методом сил.

4. Матеріали та методи дослідження

4.1. Вихідні дані до розрахунку споруди «насип-склопластикова труба»

Для дослідження деформованого стану транспортної споруди «насип-склопластикова труба» при дії динамічного навантаження від рухомого складу залізниць використано розрахункову схему, що наведена на рис. 2. У тілі земляного полотна залізничної колії знаходиться склопластикова труба. Для дослідження деформованого стану споруди «насип-склопластикова труба» використовуються труби із діаметром 1,0 м, 1,5 м, 2,0 м, 3,0 м та 3,6 м.

Висота насипу земляного полотна становить 6,7 м. Труба оточена супіском. Засипка щебеневим баластом над трубою, рахуючи від підшви шпали залізничної колії до верху зовнішнього діаметру труби, становить 1,47 м.

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики ґрунтової засипки труби

Механічні характеристики ґрунту	Щебінь	Супісок
Питома вага, γ кН/м ³	13,5	21,5
Коефіцієнт Пуансона, ν	0,26	0,26
Коефіцієнт зчеплення c , кПа	0,1	4
Кут внутрішнього тертя, φ°	43	37
Кут дилантації, ψ°	0	1
Модуль Юнга, E , МПа	150	110

У розрахунках прийнято, що верхній шар земляного полотна до висоти 4,3 м є водонасиченим із питомою вагою води рівною 10 кН/м³.

Фізико-механічні параметри ґрунтів земляного полотна, що наведені на розрахунковій схемі (рис. 2) подано у табл. 1.

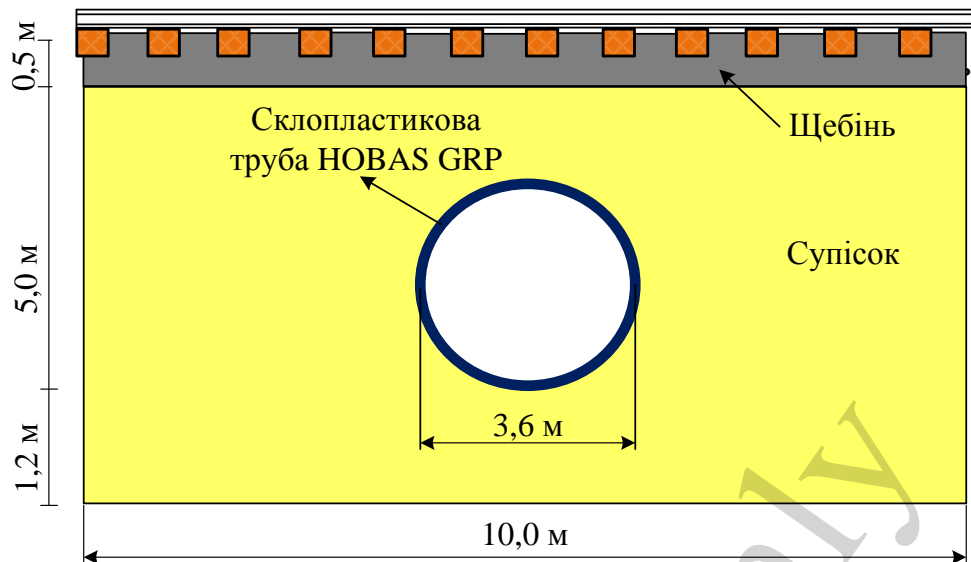


Рис. 2. Розрахункова схема транспортної споруди «насип-склопластикова труба» залізничної колії

Рівномірно-розподілене тимчасове навантаження від рухомого складу залізничного транспорту, задано величиною $q=249,5$ кН/м при дії еквівалентного навантаження СК 14 і довжині завантаження лінії впливу $\lambda=5,0$ м та при відносному положенні вершини лінії впливу $\alpha=0,5$. У моделі також враховано додаткове навантаження, від впливу матеріалів верхньої будови залізничної колії (рейко-шпальної решітки).

Склопластикова труба задана із наступними фізико-механічними параметрами: модуль Юнга – $1,5 \cdot 10^4$ МПа, коефіцієнтом Пуансона – 0,3, щільність – 2000 кг/м³, допустима деформація згину, коли відбувається розрив внутрішнього волокна становить 2,2 % [1].

4. 2. Скінченно-елементна модель транспортної споруди «насип-склопластикова труба» залізничної колії

Розрахунок напружено-деформованого стану земляного полотна залізниці та склопластикової труби виконано в нелінійній поставці з використанням пружно-пластичної моделі Мора-Кулона [25]. Розрахунок виконано методом скінченно-елементного аналізу.

Ґрунтовий масив моделювався п'ятнадцятивузловими скінченними елементами [25] із заданням фізико-механічних характеристик кожного шару ґрунту, що наведені у табл. 1.

При розрахунку напружено-деформованого стану земляного полотна із склопластиковою трубою задано наступні граничні умови – на бокових сторонах розрахункової моделі накладена заборона переміщень у горизонтальному напрямку, а внизу – накладена заборона вертикальних і горизонтальних переміщень.

Скінченно-елементна модель земляного полотна із склопластиковою трубою наведена на рис. 3.

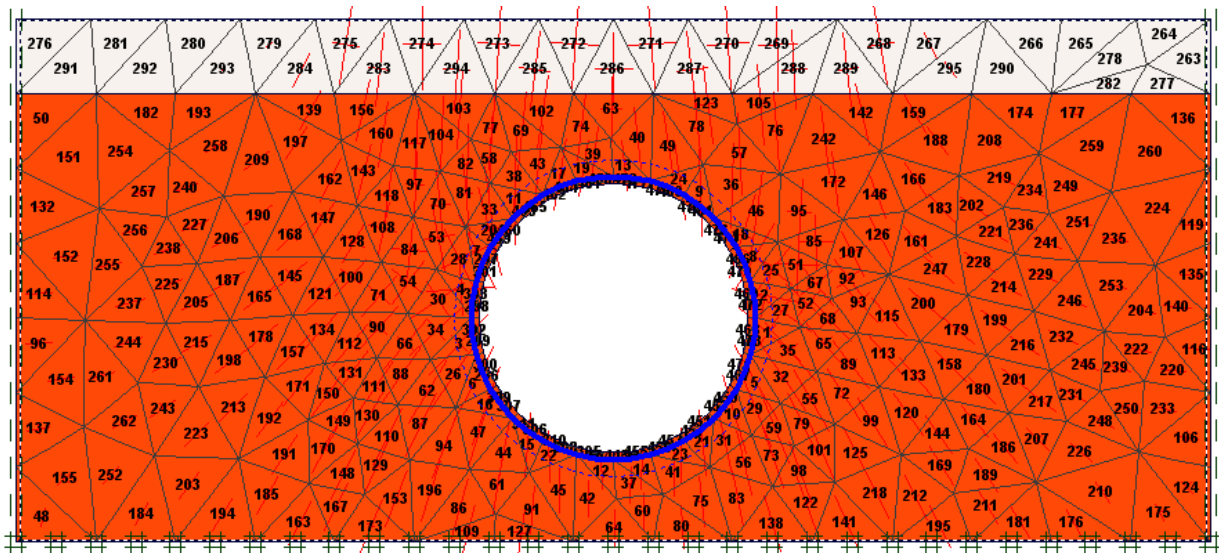


Рис. 3. Скінченно-елементна модель земляного полотна із склопластиковою трубою

Згущення сітки скінченних елементів виконано в точках контакту склопластикової труби із земляним полотном.

В основі розрахункової моделі прийнято нерухоме закріплення, а по боках прийнято рухоме закріплення, що дозволяє рух земляного полотна та труби у вертикальному напрямі.

5. Результати дослідження напружено-деформованого стану склопластикової труби при дії навантажень від рухомого складу залізниць

5.1. Удосконалена аналітична модель оцінки напружено-деформованого стану склопластикової труби

Для моделювання напружено-деформованого стану гнучких водопропускних труб, що розміщуються у тілі насипу залізничної колії, приймемо плоску стержневу модель. Спрощення розрахунків досягається заміною поперечного перерізу труби полігональним, тобто переріз розглядається як правильний багатокутник.

Для врахування взаємодії труби з ґрунтом у розрахункову схему вводяться радіальні та тангенціальні пружні в'язі, які дозволяють моделювати пружний відпір ґрунту, а також сили тертя, що виникають при контакті ґрунту з конструкцією. Щоб правильно відобразити фізичну природу ґрунту, необхідно виключити із розгляду радіальні в'язі при появі в них розтягуючих зусиль.

У проведених дослідженнях коло замінювалося правильним 8-кутником, для визначення зусиль в якому при дії рівномірно розподіленого по поверхні ґрунту навантаження, застосовувався метод сил.

Для позбавлення замкнутого восьмикутного контуру від зайвих в'язей у кутових точках розміщувалися шарніри. Кожний з них відкидає два «зайвих» зусилля – згинальний момент X_{2i-1} і поздовжню силу X_{2i} , де i – номер вершини. Розрахункова схема поперечного перерізу труби наведена на рис. 4.

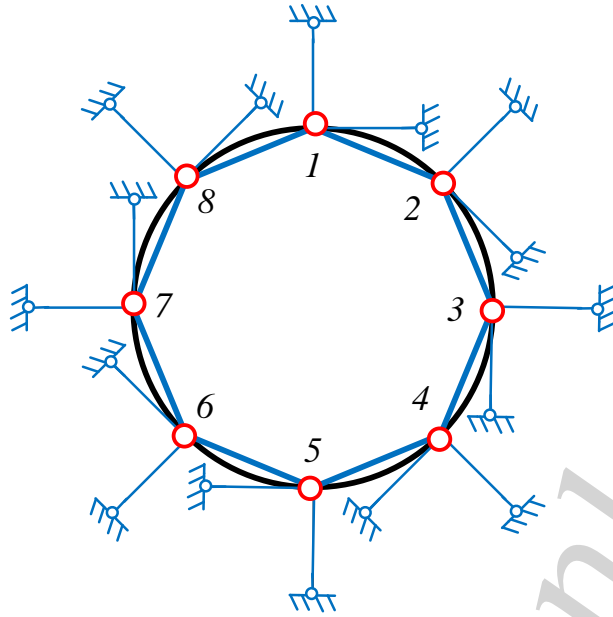


Рис. 4. Розрахункова схема моделі «насип-склопластикова труба»

В'язі, що відкинуті у вузлі основної системи, показано на рис. 5.

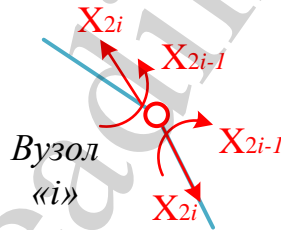


Рис. 5. Схема в'язей, відкинутих у вузлі основної системи

Система канонічних рівнянь методу сил для прийнятої схеми має 16-ий порядок і записується у матричному вигляді:

$$\delta X + \Delta q = 0, \quad (1)$$

де δ – квадратна матриця одиничних переміщень; X , Δq – матриці-стовпці невідомих зусиль та вантажних переміщень. Елементи матриць δ та Δq обчислюються за інтегралом Мора з урахуванням впливу згинальних моментів та поздовжніх сил, підсумовування ведеться по числу стержнів розрахункової схеми:

$$\delta_{ij} = \sum_k \left(\int \frac{\bar{M}_{ik} \cdot \bar{M}_{jk}}{E_k I_k} dx + \int \frac{\bar{N}_{ik} \cdot \bar{N}_{jk}}{E_k A_k} dx \right), \quad (2)$$

$$\Delta_{iq} = \sum_k \left(\int \frac{\bar{M}_{ik} \cdot M_{qk}}{E_k I_k} dx + \int \frac{\bar{N}_{ik} \cdot N_{qk}}{E_k A_k} dx \right),$$

де \bar{M}_{ik} , \bar{N}_{ik} – одиничні епюри згинальних моментів та поздовжніх сил для k -го стержня; M_{qk} , N_{qk} – вантажні епюри згинальних моментів та поздовжніх сил; $E_k I_k$, $E_k A_k$ – відповідно жорсткості при згині та розтягу k -го стержня.

По знайдених у результаті розрахунку невідомих X встановлювалися зусилля $U_{i,r}$ та $U_{i,\tau}$, що діють у радіальному та тангенціальному пружних стержнях, приєднаних до i -го вузла. За законом Гука знаходилися деформації в цих стержнях:

$$\delta_{i,r} = \frac{U_{i,r}}{\left(\frac{EA}{l} \right)_{i,r}}, \quad (3)$$

$$\delta_{i,\tau} = \frac{U_{i,\tau}}{\left(\frac{EA}{l} \right)_{i,\tau}},$$

де $\left(\frac{EA}{l} \right)_{i,r}$, $\left(\frac{EA}{l} \right)_{i,\tau}$ – жорсткості радіального та тангенціального стержнів відповідно, через які виражалися вертикальні та горизонтальні складові переміщення i -го вузла системи у результаті деформування:

$$\delta_{iB} = -\delta_{i,r} \cdot \cos \frac{\varphi_i + \varphi_{i+1}}{2} - \delta_{i,\tau} \cdot \sin \frac{\varphi_i + \varphi_{i+1}}{2}, \quad (4)$$

$$\delta_{ir} = -\delta_{i,r} \cdot \sin \frac{\varphi_i + \varphi_{i+1}}{2} - \delta_{i,\tau} \cdot \cos \frac{\varphi_i + \varphi_{i+1}}{2}.$$

Таким чином визначається деформований стан склопластикової труби під дією рухомого складу залізничного транспорту.

5. 2. Результати розрахунку деформованого стану земляного полотна у залежності від діаметру склопластикової труби

На рис. 6 наведено розподіл вертикальних деформацій земляного полотна залізничної колії із склопластиковою трубою НОВАС GRP. При цьому розподіл деформованого стану отримано для труб діаметрів 1,0 м, 2,0 м та 3,6 м.

Із рис. 6 видно, що максимальні вертикальні деформації земляного полотна виникають безпосередньо під рухомих складом залізниць і становлять для діаметру труби 1,0 м – 5,2 мм, при діаметрі 2,0 м – 5,25 мм та при діаметрі 3,6 м – 6,0 мм.

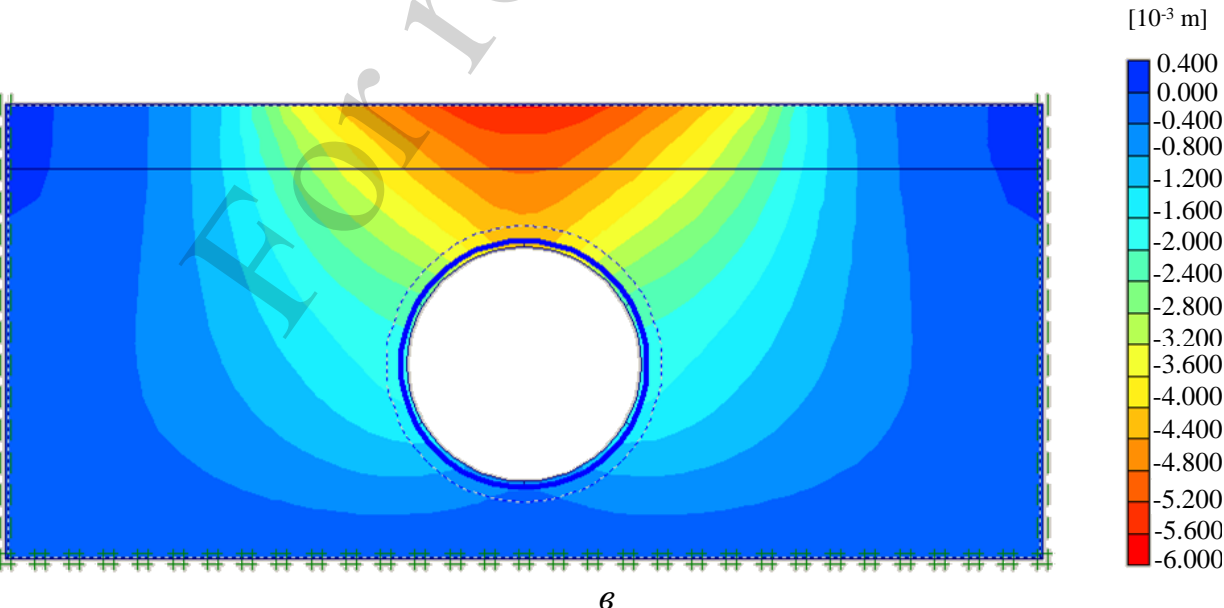
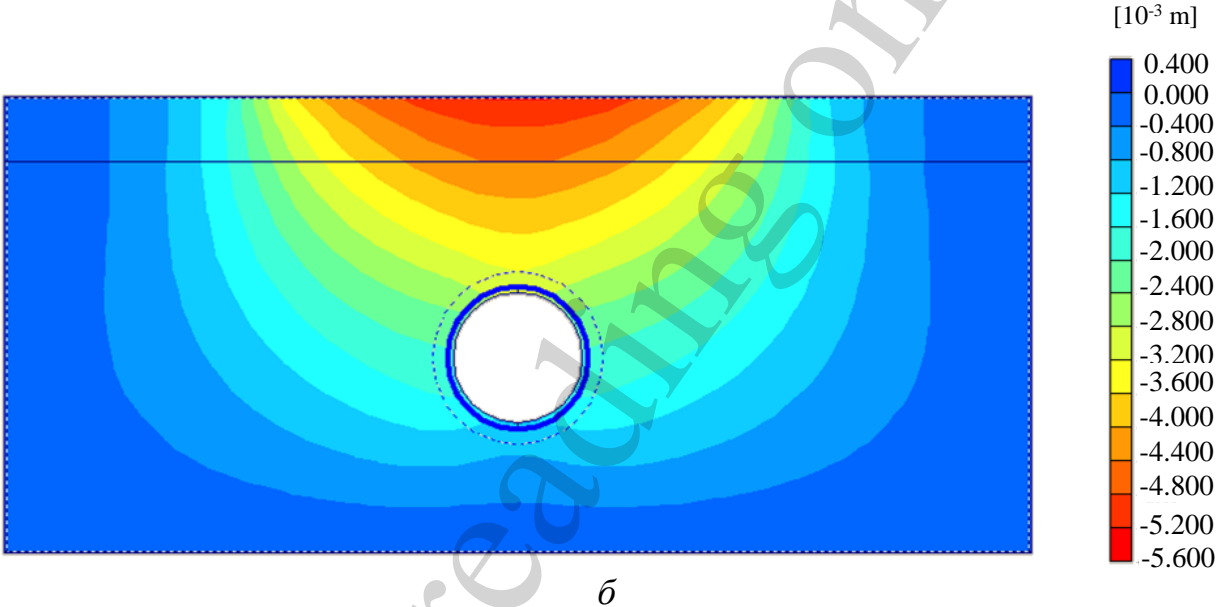
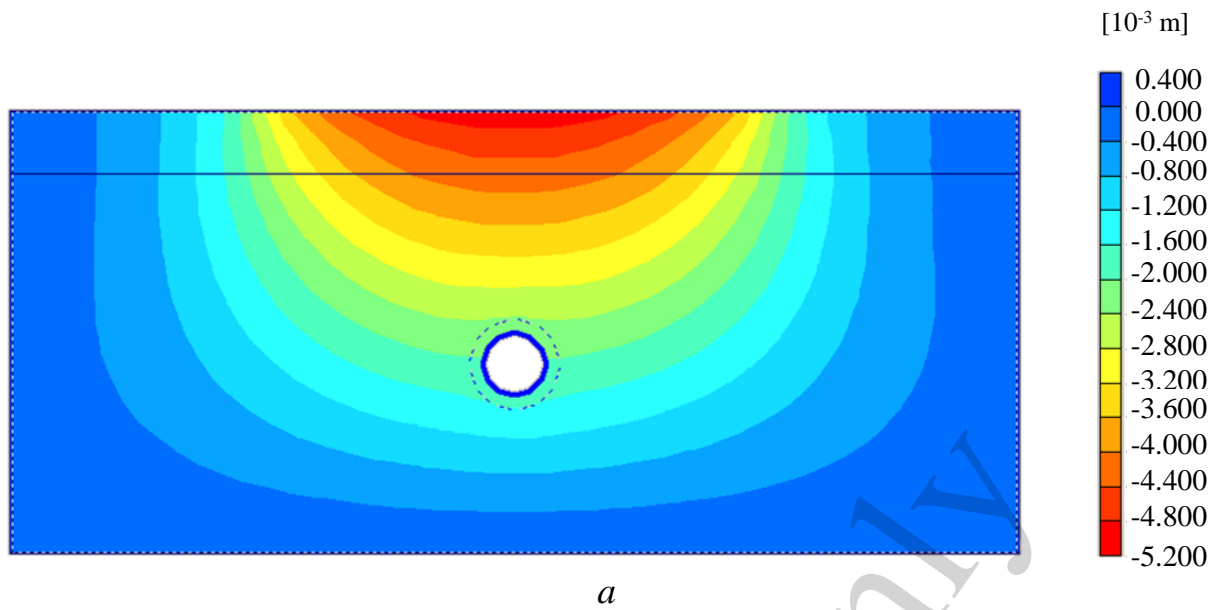
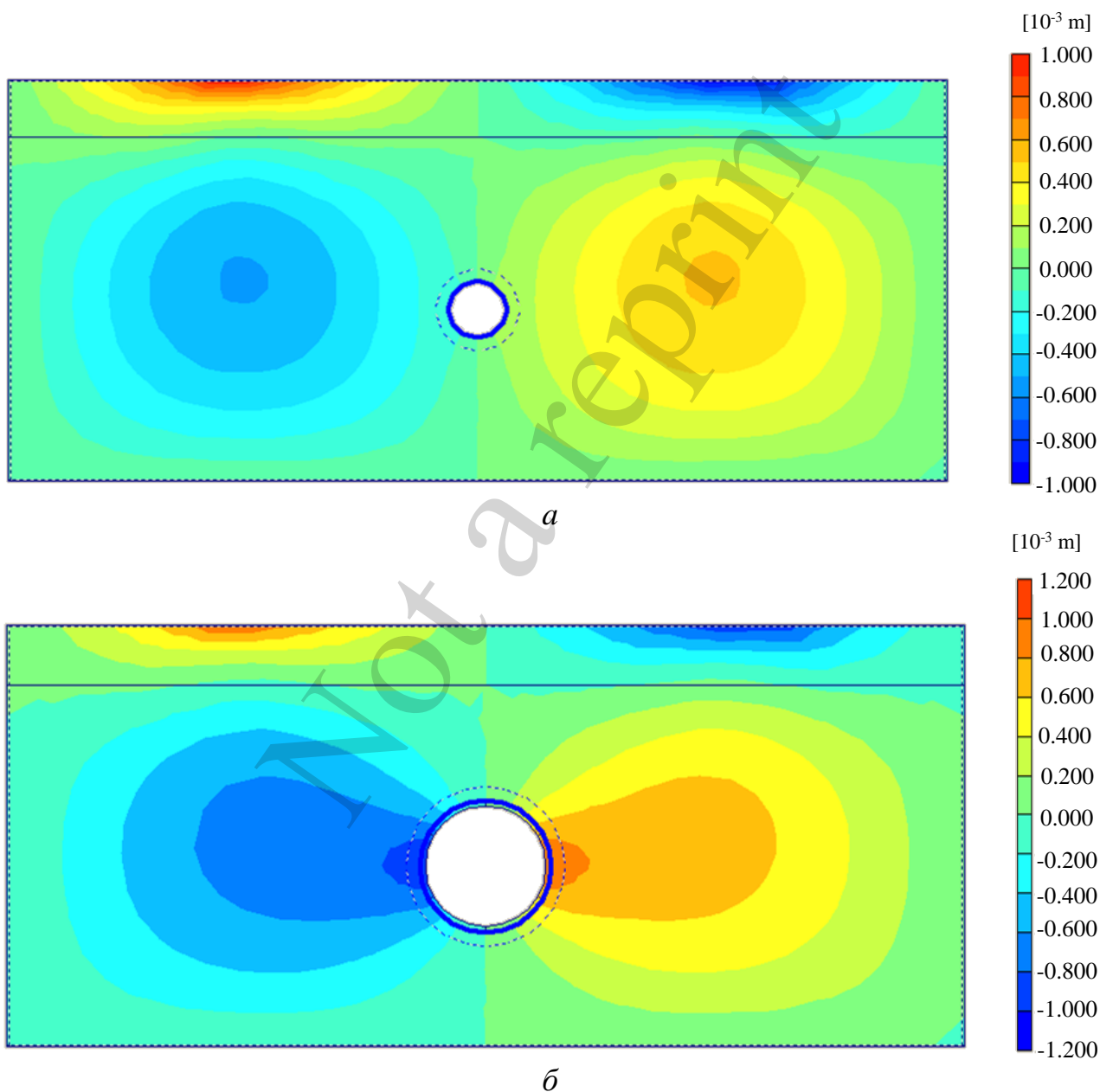


Рис. 6. Розподіл вертикальних деформацій у земляному полотну із склопластиковою трубою при діаметрах: *a* – 1,0 м; *б* – 2,0 м; *в* – 3,6 м

Максимальні вертикальні деформації земляного полотна, що виникають над трубою при діаметрі труби 1,0 м становлять 2,72 мм, при діаметрі 2,0 м – 2,94 мм та при діаметрі 3,6 м – 4,46 мм.

Встановлено, що із збільшенням діаметру склопластикової труби величина деформацій земляного полотна та склопластикової труби збільшується. При діаметрі труби 1,0 м величина деформацій у склепінні труби становить 2,72 мм, а при діаметрі труби 3,6 м – 4,46 мм. При цьому величина деформацій земляного полотна під шпалою становить 5,2 мм та 6,0 мм відповідно.

Результати розрахунку деформованого стану у горизонтальному напрямку земляного полотна із діаметрами труби 1,0 м, 2,0 м та 3,6 м наведено на рис. 7.



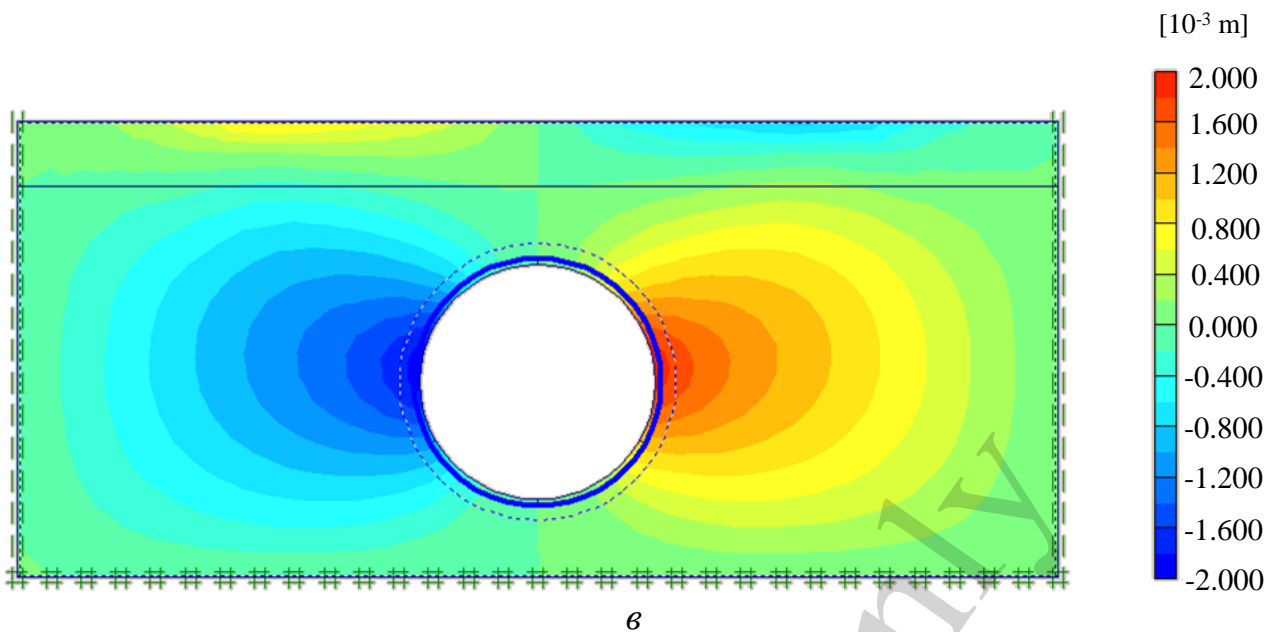


Рис. 7. Розподіл горизонтальних деформацій у земляному полотні із склопластиковою трубою при діаметрах труби: a – 1,0 м; b – 2,0 м; $в$ – 3,6 м

Із рис. 7 видно, що максимальні горизонтальні деформації земляного полотна виникають у точках, що лежать на горизонтальному діаметрі труби. Вони становлять 1,0 мм при діаметрі труби 1,0 м; 1,2 мм – при діаметрі 2,0 м та 1,93 мм – при діаметрі 3,6 м.

Слід зазначити, що ізолінії вертикальних деформацій максимально щільно розташовуються у вершині земляного полотна і над трубою. Максимальна концентрація ізоліній горизонтальних деформацій спостерігається на бокових сторонах труби. Фактично ці області земляного полотна залізничної колії зазнають найбільших деформацій від дії рухомого складу залізниці.

Отже, максимальні вертикальні деформації земляного полотна виникають безпосередньо під дією навантаження у вершині земляного полотна, а максимальні горизонтальні деформації земляного полотна виникають на горизонтальних сторонах труби.

Із проведених числових розрахунків встановлено, що максимальні вертикальні деформації земляного полотна залізничної колії над трубою при дії навантаження СК14 становлять 4,46 мм для труби діаметру 3,6 м. Слід зазначити, що максимальна горизонтальна деформація земляного полотна на бокових сторонах труби становить 1,93 мм.

5.3. Результати розрахунку деформованого стану склопластикової труби НОВАС

Результати розрахунку деформацій склопластикової труби аналітичним методом для максимального діаметру труби 3,6 м наведено у табл. 2.

Із проведених розрахунків (табл. 2) встановлено, що максимальні деформації труби виникають у вершині труби і вони становлять 3,06 мм, а мінімальні деформації труби виникають в основі труби і вони становлять 0,637 мм.

Таблиця 2

Деформований стан склопластикових труб діаметром 3,6 м

Номер точки (рис. 4)	Деформації у радіальному напрямі	Деформації у тангенціальному напрямі	Повні деформації
1	3,06	0	3,06
2	1,73	2,6	3,12
3	0,175	2,24	2,25
4	0,756	0,63	0,985
5	0,637	0	0,637

Результати розрахунку напружено-деформованого стану склопластикових труб методом скінченних елементів наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Деформований стан склопластикової труби, що отриманий методом скінченних елементів

Номер точки	Діаметр склопластикової труби, м					
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,6
Деформації труби, мм						
1	2,12	2,45	2,88	3,28	3,78	4,16
2	2,01	2,44	2,55	2,69	2,84	3,21
3	1,64	1,75	1,89	1,91	2,08	2,45
4	0,87	1,02	1,11	1,21	1,28	1,37
5	0,15	0,19	0,26	0,32	0,37	0,54

Із проведених розрахунків деформованого стану склопластикової труби методом скінченних елементів (табл. 3) випливає, що із зменшенням діаметру труби величина її деформації зменшується. При максимально можливому діаметрі труби 3,6 м величина деформації у вершині (точці 1) становить 4,16 мм, тоді як при діаметрі 3,0 м – 3,78 мм, діаметрі 2,5 м – 3,28 мм, діаметрі 2,0 м – 2,88 мм, діаметрі 1,5 м – 2,45 мм та при діаметрі 1,0 м – 2,12 мм.

Максимальних деформацій склопластикова труба зазнає у вершині труби (точка 1). Далі значення деформацій труби по радіальній координаті зменшуються і в основі труби досягають найменшого значення. При діаметрі труби 3,6 м значення деформацій труби у вершині (точка 1) становлять 4,16 мм, у точці 2 – 3,21 мм, у точці 3 – 2,45 мм, у точці 4 – 1,37 мм та в основі труби (точка 5) – 0,54 мм.

Проведені дослідження деформованого стану склопластикової труби показали, що максимальна вертикальна деформація труби не перевищує допустиму величину деформації згину, яка становить 2,2 % [1]. Так, для труби діаметром 3,6 м допустима деформація складає 79,2 мм, що є набагато більшим за отримане в результаті розрахунку значення 4,16 мм.

Таким чином, можна стверджувати, що склопластикові труби мають великий запас несучої здатності при дії рухомого складу залізничного транспорту і відповідно можуть бути застосовані у конструкції залізничної колії.

6. Обговорення результатів оцінки напружено-деформованого стану транспортних споруд «насип-склопластикова труба»

Удосконалено плоску стержневу модель для оцінки деформованого стану склопластикових труб. Для цього поперечний переріз труби представлений у вигляді правильного восьмикутника, у вузлах якого розташовані радіальні та тангенціальні в'язі, що моделюють взаємодію труби з земляним полотном. Для врахування взаємодії труби з ґрунтом у розрахункову схему вводяться радіальні та тангенціальні пружні в'язі, які дозволяють моделювати пружний відпір ґрунту, а також сили тертя, що виникають при контакті ґрунту з конструкцією. Такий підхід найбільш точно відповідає реальним умовам роботи склопластикових труб при дії транспортного навантаження.

Слід зазначити, що для правильної фізичної природи ґрунту, необхідно виключати з розгляду радіальні в'язі при появі в них розтягуючих зусиль.

Із характеру деформування склопластикової труби видно, що труба зменшується у напрямку вертикального діаметру і збільшується її горизонтальний розмір. Це, у свою чергу, призводить до виникнення деформацій земляного полотна на бокових сторонах труби (рис. 6, 7). При діаметрі труби 1,0 м величина горизонтальних деформацій земляного полотна становить 1,0 мм, при діаметрі 2,0 м – 1,2 мм та при діаметрі 3,6 м – 1,93 мм.

Максимальні вертикальні деформації земляного полотна виникають безпосередньо під рухомих складом залізниць і становлять для діаметру труби 1,0 м – 5,2 мм, при діаметрі 2,0 м – 5,25 мм та при діаметрі 3,6 м – 6,0 мм. При цьому максимальні вертикальні деформації земляного полотна, що виникають над трубою при діаметрі труби 1,0 м становлять 2,72 мм, при діаметрі 2,0 м – 2,94 мм та при діаметрі 3,6 м – 4,46 мм.

Результати розрахунку деформацій склопластикової труби показали, що при діаметрі труби 3,6 м величина деформації труби у вершині становить 4,16 мм, тоді як при діаметрі 3,0 м – 3,78 мм, діаметрі 2,5 м – 3,28 мм, діаметрі 2,0 м – 2,88 мм, діаметрі 1,5 м – 2,45 мм та при діаметрі 1,0 м – 2,12 мм.

Слід зазначити, що максимальних значень деформацій склопластикова труба зазнає у вершині. Далі значення деформацій труби по радіальній координаті зменшуються і в основі труби досягають найменшого значення. І так при діаметрі труби 3,6 м значення деформацій труби у вершині (точка 1) становлять 4,16 мм, у точці 2 – 3,21 мм, у точці 3 – 2,45 мм, у точці 4 – 1,37 мм та в основі труби (точка 5) – 0,54 мм.

Із проведених досліджень деформування земляного полотна (рис. 6, 7) видно, що максимальні деформації земляного полотна виникають при діаметрі труби 3,6 м. Встановлено, що із зменшенням діаметру труби деформації земляного полотна та склопластикової труби зменшуються.

Проведені дослідження деформованого стану склопластикової труби показали, що отримані максимальні деформації 4,16 мм при розрахунку труби діаметром 3,6 м є меншими за допустимі (79,2 мм). Це дає можливість зробити висновки, що склопластикові труби мають великий запас несучої здатності при дії рухомого складу залізничного транспорту, тому рекомендується їх застосовувати на залізничних коліях.

Одним із обмежень проведеного дослідження є двовимірний метод розрахунку деформованого стану транспортної споруди «насип-склопластикова труба». Також слід зазначити, що удосконалена аналітична модель оцінки деформованого стану склопластикових труб придатна для розрахунку склопластикових труб із максимальним діаметром 3,6 м. При використанні моделі для розрахунку труб поперечним перерізом більшим за 3,6 м потрібно проводити додаткові дослідження.

Розвиток методів застосування просторової математичної моделі при розрахунку деформованого стану склопластикових труб є перспективним напрямом подальших науково-дослідних робіт.

7. Висновки

1. Для визначення деформованого стану гнучких склопластикових водопропускних труб, що розміщуються у тілі насипу залізничної колії удосконалено плоску стержневу модель шляхом заміни поперечного круглого перерізу труби полігональним. Для врахування взаємодії труби з ґрунтом засипки в розрахункову схему вводяться радіальні та тангенціальні пружні в'язі, які дозволяють моделювати пружний відпір ґрунту, а також сили тертя, що виникають при контакті ґрунту з конструкцією. Це найбільш точно відповідає реальним умовам роботи склопластикових труб при дії рухомого складу залізничного транспорту.

2. Встановлено, що при вертикальному і горизонтальному деформуванні склопластикової труби у земляному полотні залізничної колії виникають деформації. При діаметрі труби 1,0 м величина максимальних горизонтальних деформацій земляного полотна склали 1,0 мм, при діаметрі 2,0 м – 1,2 мм та при діаметрі 3,6 м – 1,93 мм. Максимальні вертикальні деформації земляного полотна над трубою при діаметрі труби 1,0 м склали 2,72 мм, при діаметрі 2,0 м – 2,94 мм та при діаметрі 3,6 м склали 4,46 мм. Встановлено, що максимальні вертикальні деформації земляного полотна виникають безпосередньо під рухомих складом залізниць. При діаметрі труби 1,0 м деформації становлять 5,2 мм, при діаметрі 2,0 м – 5,25 мм та при діаметрі 3,6 м – 6,0 мм.

3. Результати досліджень деформованого стану склопластикової труби показали, що із зменшенням діаметру труби, її деформації зменшуються. Максимальні деформації труби отримано при найбільшому діаметрі труби 3,6 м, що випускається заводом виробником склопластикових труб Nobas GRP. Значення деформацій труби у вершині (точка 1) становлять 4,16 мм, у точці 2 – 3,21 мм, у точці 3 – 2,45 мм, у точці 4 – 1,37 мм та в основі труби (точка 5) – 0,54 мм. Проведені дослідження деформованого стану склопластикової труби показали, що отримані максимальні деформації 4,16 мм при розрахунку труби діаметром 3,6 м є набагато меншими за допустимі (79,2 мм). Це дозволяє стверджувати, що склопластикові труби мають великий запас несучої здатності при дії рухомого складу залізничного транспорту, і рекомендувати їх до застосування на залізничних коліях.

Література

1. 3,000 mm GRP culverts jacked under railway. URL: <https://www.plastics.g1/market/3000-mm-grp-culverts-jacked-under-railway/>
2. Machelski, C. (2016). Steel plate curvatures of soil-steel structure during construction and exploitation. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 15 (3), 207–220. doi: <https://doi.org/10.7409/rabdim.016.013>
3. Mistewicz, M. (2019). Risk assessment of the use of corrugated metal sheets for construction of road soil-shell structures. *Roads and Bridges-Drogi i Mosty*, 18 (2), 89–107. doi: <https://doi.org/10.7409/rabdim.019.006>
4. Bęben, D. (2013). Evaluation of backfill corrosivity around steel road culverts. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, 12 (3), 255–268. doi: <https://doi.org/10.7409/rabdim.013.018>
5. Gera, B., Kovalchuk, V. (2019). A study of the effects of climatic temperature changes on the corrugated structure. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (7 (99)), 26–35. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.168260>
6. Kovalchuk, V., Kovalchuk, Y., Sysyn, M., Stankevych, V., Petrenko, O. (2018). Estimation of carrying capacity of metallic corrugated structures of the type Multiplate MP 150 during interaction with backfill soil. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (1 (91)), 18–26. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123002>
7. Esmaeili, M., Zakeri, J. A., Abdulrazagh, P. H. (2013). Minimum depth of soil cover above long-span soil-steel railway bridges. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 5 (1), 7. doi: <https://doi.org/10.1186/2008-6695-5-7>
8. Kovalchuk, V., Hnativ, Y., Luchko, J., Sysyn, M. (2020). Study of the temperature field and the thermo-elastic state of the multilayer soil-steel structure. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 19 (1), 65–78. doi: <https://doi.org/10.7409/rabdim.020.004>
9. Machelski, C., Janusz, L., Czerepak, A. (2016). Estimation of Stress in the Crown of Soil-Steel Structures Based on Deformations. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 4, 186–193. doi: <https://doi.org/10.17265/2328-2142/2016.04.002>
10. Machelski, C., Mumot, M. (2016). Corrugated Shell Displacements During the Passage of a Vehicle Along a Soil-Steel Structure. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 38 (4), 25–32. doi: <https://doi.org/10.1515/sgem-2016-0028>
11. Kovalchuk, V., Sysyn, M., Hnativ, Y., Onyshchenko, A., Koval, M., Tiutkin, O., Parneta, M. (2021). Restoration of the Bearing Capacity of Damaged Transport Constructions Made of Corrugated Metal Structures. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 16 (2), 90–109. doi: <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2021-16.529>
12. Sysyn, M., Kovalchuk, V., Gerber, U., Nabochenko, O., Pentsak, A. (2020). Experimental study of railway ballast consolidation inhomogeneity under vibration loading. *Pollack Periodica*, 15 (1), 27–36. doi: v
13. Kovalchuk, V., Luchko, J., Bondarenko, I., Markul, R., Parneta, B. (2016). Research and analysis of the stressed-strained state of metal corrugated

structures of railroad tracks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7 (84)), 4–9. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.84236>

14. Годдард, Д. (2014). Полимерные трубы в дорожном строительстве: 50 лет эволюции и роста. *Полимерные трубы*, 1 (43), 58–61.

15. ASTM F405. Standard Specification for Corrugated Polyethylene (PE) Pipe and Fittings (2013). URL: https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=ASTM%20F405&item_s_key=00020792

16. AASHTO M 252. Standard Specification for Corrugated Polyethylene Drainage Pipe. URL: <https://standards.globalspec.com/std/14289640/AASHTO%20M%20252>

17. Jafari, N. H., Ulloa, H. O. (2020). Literature Search on Use of Flexible Pipes in Highway Engineering for DOTD's Needs. FHWA/LA.17/638. Dept. of Civil and Environmental Engineering Louisiana State University, 63.

18. Specification for Pipe Subsoil Drain Construction. URL: <https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/pipe-subsoil-drain-const/docs/pipe-subsoil-drain-const.pdf>

19. Specification for pipe culvert construction. URL: <https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/pipe-culvert-const/docs/pipe-culvert-const-2010-12.pdf>

20. AS 2439.1. Perforated plastics drainage and effluent pipe and fittings. Part 1: Perforated drainage pipe and associated fittings. URL: <https://www.saiglobal.com/pdftemp/previews/osh/as/as2000/2400/2439.1-2007.pdf>

21. The Auckland Code of Practice for Land Development and Subdivision. Chapter 4 – Stormwater. Version 3.0 (2022). URL: <https://content.aucklanddesignmanual.co.nz/regulations/codes-of-practice/Documents/SW-CoP-v3-January-2022.pdf>

22. Manual. Road Drainage Chapter 9: Culvert Design (2019). The State of Queensland (Department of Transport and Main Roads). URL: <https://www.tmr.qld.gov.au/-/media/busind/techstdpubs/Hydraulics-and-drainage/Road-drainage-manual/Chapter9.pdf?la=en>

23. Kang, J., Jung, Y., Ahn, Y. (2013). Cover requirements of thermoplastic pipes used under highways. *Composites Part B: Engineering*, 55, 184–192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.025>

24. Шилько, С. В., Рябченко, Т. В., Гавриленко, С. Л. (2019). Анализ деградации механических свойств стеклопластика в водной среде при эксплуатации трубопровода. *Актуальные вопросы машиноведения*, 8, 59–62. URL: https://www.researchgate.net/publication/337289716_Analysis_of_Degradation_of_Mechanical_Properties_of_Fiberglass_in_Water_Environment_during_Pipeline_Operation_in_Russian_Analiz_degradacii_mehaniqueskih_svoystv_stekloplastika_v_vodnoj_srede_pri_eksplu

25. Brinkgreve, R. B. J., Vermeer, P. A. (2002). PLAXIS (version 8) user's manual. Delft University of Technology and PLAXIS BV.