

## Визначення особливостей напружено-деформованого стану армованого земляного полотна залізничної колії трубчастими дренажами

Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук, І. Б. Кравець, О. М. Гайда

*Проаналізовано технічний стан земляного полотна залізничної колії та проблеми забезпечення його міцності та стійкості при дії паводкових вод та перезволоження на ділянках колії у процесі експлуатації. У результаті цього встановлено, що розробка методів підвищення несучої здатності земляного полотна є необхідною.*

*Проведено георадіолокаційні дослідження проблемних ділянок земляного полотна залізничної колії, на основі яких знайдено розподіл неоднорідності земляного полотна у вертикальній площині та межі її розташування. Тому дослідження з використанням георадіолокації дозволяють виявляти приховані дефектні місця земляного полотна без порушення його міцнісних характеристик.*

*Запропоновано спосіб підвищення несучої здатності хворого земляного полотна залізничної колії із застосуванням комбінованого розташування дренажних труб у вертикальному та горизонтальному напрямках у насипі колії. Особливістю цього способу є можливість відводити воду на різних рівнях залягання поверхневих вод, що дозволяє підвищити несучу здатність хворого земляного полотна.*

*Проведено дослідження напружено-деформованого стану земляного полотна підсиленого трубчастими дренажами. У результаті чого доведено ефективність застосування трубчастих дренажів для підвищення несучої здатності перезволоженого земляного полотна залізничної колії при дії постійних та тимчасових навантажень.*

*Результатами проведених досліджень встановлено, що з однієї сторони деформативність земляного полотна підвищується при застосуванні трубчастих дренажів, але це тільки у початковий період їх укладання, проте в подальшій експлуатації, коли вони відводять воду з тіла земляного полотна, навпаки буде підвищуватися несуча здатність земляного полотна за рахунок покращення фізико-механічних властивостей ґрунтів.*

*Ключові слова: земляне полотно, напруження, деформації, несуча здатність, дренажні труби, метод скінченних елементів.*

### 1. Вступ

Головним завданням утримання земляного полотна є забезпечення справно-го стану всіх його елементів, попередження несправностей, своєчасне їх усунення, а також ліквідація причин, що викликають несправності. Все це регламентується Інструкцією [1]. Згідно з нормативним документом [2], усі елементи залізничної колії за міцністю, стійкістю і станом мають забезпечувати безпечний і плавний рух поїздів із встановленими швидкостями. Отже всі дефекти та пошко-

дження земляного полотна та його споруд мають бути вчасно виявлені різними засобами діагностики. Їх усунення повинно виконуватись в процесі поточного утримання колії, при планово-запобіжних ремонтах верхньої будови колії, а також при ремонтах і підсиленні земляного полотна

Земляне полотно є основою транспортних магістралей, яке сприймає постійні та тимчасові навантаження від транспортних засобів. Крім цих навантажень на земляне полотно діють природньо-кліматичні впливи (паводки, опади), які спричиняють зменшення, або втрату його несучої здатності.

Загальна протяжність земляного полотна на залізницях становить 21872,2 км, а протяжність земляного полотна, схильного до деформацій становить до 870,8 км [3].

Одними з найпоширеніших дефектів, що призводять до виникнення деформацій земляного полотна, є дефекти основної площадки, що проявляються у вигляді баластних заглиблень та корит. Дані дефекти є небезпечними, оскільки свідчать про те, що земляне полотно зазнає перезволоження ґрунтів. Це призводить до порушення геометрії рейкової колії, зниження міцності та втрати стійкості земляного полотна, що негативно впливає на забезпечення безпеки руху. Також необхідно зазначити, що під час повеней у 2020 р. в Західних регіонах України відбулося руйнування та підмивання насипів земляного полотна протяжністю 150 м (рис. 1, *а*). У результаті цього було призупинено рух поїздів для здійснення міжнародних вантажних перевезень з країнами ЄС. Крім цього фіксувалися зсуви ґрунту через переміщення глибинних ґрунтових вод у результаті невизначених змін геології гірських порід (рис. 1, *б*). Унаслідок природної стихії на вказаному місці, що розташоване на косогорі, було деформовано 30 м колії.

Такі руйнування є притаманні для транспортної інфраструктури у всьому світі, та є часто предметом дискусії інженерів-будівельників на наукових конференціях, круглих столах та ін. [4].



*а*

*б*

Рис. 1. Руйнування та розмив насипу залізничної колії під час паводків: *а* – на 224-й кілометрі перегону Заболотів – Видинів [5]; *б* – на 124 км дільниці Львів – Самбір – Ужгород [6]

Для усунення наслідків розмиву земляного полотна залізничної виділяються значні фінансові ресурси. Крім цього, зупинення руху поїздів та автотранспорту

наносить значних економічних втрат для держави, особливо на транскордонних ділянках.

Перезволоження земляного полотна спричиняє прискорене погіршення технічного стану залізничної колії, втрати несучої здатності земляного полотна, що призводить до збільшення витрат на технічне обслуговування колії, включаючи очищення та підбивку баласту. Враховуючи негативні наслідки у зв'язку із зміною клімату (збільшення кількості опадів), потреба у дренажних конструкціях, що забезпечують проектну несучу здатність земляного полотна, є актуальною і своєчасною для залізниць.

Зазначені проблеми вимагають розробки нових та прогресивних методів швидкого відновлення пропускної та провізної здатності залізничної колії. Ймовірно, що більш раціональнішим способом підвищення несучої здатності перезволоженого земляного полотна є усунення фактору, що спричиняє його деформації та дефекти, а саме відведення води. Тому, як один із варіантів розглянуто можливість застосування трубчастих дренажів та оцінено несучу здатність земляного полотна при їх застосуванні при різних комбінаціях розташування у тілі насипу залізничної колії.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

На сьогоднішній день існує багато наукових робіт у напрямку досліджень підвищення міцності та стійкості земляного полотна. Але всі вони направлені на застосування геотекстилів [7], геосинтетиків [8], ін'єкційних розчинів [9]. Слід зазначити, що залишилось невирішеним питання ефективного відведення води з тіла земляного полотна. Оскільки практика показує, що тривала експлуатація геотекстилю в конструкції залізничної колії негативно впливає на її технічний стан через скупчення води.

Більш раціональними методами відведення води від земляного полотна є застосування трубчастих дренажів, що підтверджується дослідженнями проведеними на фінських залізницях [10]. Встановлено, що на ділянках де влаштовані дренажі спостерігається менше розладнань геометрії колії, а несуча здатність земляного полотна вища за аналогічні ділянки без влаштування дренажів.

У роботі [11] експериментально доведено, що дренажні пристрої є ефективними для відведення води із забрудненого баласту залізничної колії. Проте ці дослідження були направлені тільки на вивчення гідравлічної поведінки дренажних конструкцій.

Науковцями у праці [12] досліджено умови роботи нетипових дорожніх конструкцій з трубчастими дренами під впливом навантажень рухомого складу та здійснено числові дослідження напружено-деформованого стану земляного полотна. Визначено найбільш ефективне конструктивно-технологічне рішення, щодо використання у дорожній конструкції трубчастих дренажів. Також автори зазначають, що на практиці дренажні конструкції призначаються, виходячи з досвіду проектувальників та рекомендацій замовників.

Дослідження впливу вібраційного навантаження на дренажну конструкцію приведено у роботі [13]. Авторами на експериментальній установці дорожньої конструкції, яка імітувала вібрації від руху транспорту, проведено серію випро-

бувань. Вони полягали у дослідженні роботи двох типів дренажних конструкцій мілкого закладання з трубчастим дренажем, обсипаного крупнозернистим піском та з щебеним заповненням. Експерименти проводилися, як із заданням вібраційних впливів від транспортних засобів, так і без них. Аналіз результатів проведених досліджень показав, що на інтенсивність водовідведення води по конструкції з трубчастим дренажем, вібрація майже не впливає.

У роботах [14–16] проведено оцінку несучої здатності підсиленних ділянок залізничної колії із застосуванням металевих гофрованих конструкцій Multiplate MP 150 та SuperCor. Проведеними дослідженнями встановлено, що металеві гофровані конструкції є альтернативою для відновлення пропускної та провізної здатності проблемних ділянок залізничної колії. Однак такі конструкції є ефективними при ліквідації наслідків паводкових підтоплень земляного полотна залізничної колії чи автомобільної дороги та при відновленні несучої здатності пошкоджених споруд [17]. Проте для підвищення несучої здатності дефектних місць земляного полотна, які простягаються на невеликих ділянках колії, вони є економічно не вигідними.

У роботах [18, 19] доказано, що підвищення динамічної дії рухомих транспортних одиниць на земляне полотно відбувається через нерівномірні осідання баласту залізничної колії. Також доведено [20], що з метою забезпечення безперебійної роботи колії необхідний контроль за станом її нижньої будови, а саме земляного полотна при дії динамічних навантажень від рухомого складу залізниць.

У роботах [4, 21] чисельними методами встановлено, що перезволоження земляного полотна призводить до зменшення його міцнісних характеристик. Тому слід очікувати зниження несучої здатності і втрати стійкості при дії тимчасових навантажень від транспортних засобів.

Експериментальними дослідженнями у праці [22] встановлено, що інтенсивне осідання нижньої будови колії відбувається у початковий період її експлуатації. Також зазначено, що сумарне осідання колії складається із суми пластичної та в'язкопластичної складових осідань щебеневого баласту. Пластичне осідання баласту залежить від початкового навантаження у період експлуатації колії, а в'язкопластичне – від кількості циклів навантажень, що зустрічалися в історії експлуатації колії.

У роботах [4, 18–22] розглянуто процеси осідання баласту залізничної колії при дії статичних та динамічних навантажень без урахування технічного стану земляного полотна. Крім цього, в жодній з цих робіт не вирішено проблему підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна, що має велике значення при експлуатації залізничної колії.

Основним документом, який регламентує норми проектування земляного полотна залізниць є ДБН В 2.3-19:2018 [23]. Проте в ньому відсутня методика розрахунку міцності та стійкості земляного полотна армованого трубчастими дренажами.

Розроблені аналітичні методи оцінки міцності та стійкості земляного полотна, що наведені у праці [24], застосовувати майже неможливо через складність конфігурації такої конструкції. На сьогоднішній день такі задачі можна вирішити із застосуванням методу скінченних елементів. Цей метод знімає усі складнощі

при створенні геометричної моделі яка найбільш наближена до реального об'єкту. Також дозволяє врахувати фізико-механічні характеристики матеріалу елементів залізничної колії.

Аналіз науково-дослідних робіт стосовно підвищення несучої здатності земляного полотна залізничної колії показує, що всі роботи в основному направлені на вивчення гідравлічної поведінки дренажних систем та геотекстильних матеріалів. Слід зазначити, що досліджень стосовно оцінювання несучої здатності земляного полотна при застосуванні дренажних систем не виявлено.

Для захисту земляного полотна від руйнівної дії природних чинників та підвищення експлуатаційної надійності підтоплювального та дефектного земляного полотна під час повеней, які спричиняють руйнування земляного полотна, одним із варіантів запропоновано застосування трубчастих дренажів, а пошук дефектних місць земляного полотна пропонується виконувати георадіолокаційним методом.

Підсилення хворого земляного полотна трубчастими дренажами є найбільш техніко-економічно вигідним у порівнянні з існуючими методами, а саме бортова вирізка, заміна шару ґрунту, влаштування прижимних берм. Також слід зазначити, що існуючі методи є дорогівартісними та вимагають довготривалої зупинки руху поїздів [25]. Крім цього, утримання земляного полотна армованого трубчастими дренажами рекомендується виконувати існуючими бригадами з утримання земляного полотна, які обслуговують водозбірні лотки, колодязі, водопропускні труби. Тому обслуговування дренажних конструкцій не потребує створення чи додаткового укомплектування цих бригад, і, як наслідок, не є дорогівартісним.

### **3. Мета і завдання дослідження**

Метою роботи є визначення напружено-деформованого стану земляного полотна залізничної колії із армуванням трубчастими дренажами.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені наступні завдання:

- провести оцінку технічного стану земляного полотна залізничної колії георадіолокаційним методом;
- розробити спосіб підвищення несучої здатності перезволоженого земляного полотна та методика оцінки його напружено-деформованого стану;
- провести багатоваріантні розрахунки напружено-деформованого стану армованого земляного полотна з різною комбінацією розташування трубчастих дренажів.

### **4. Оцінювання технічного стану земляного полотна залізничної колії георадіолокаційним методом**

Для встановлення технічного стану земляного полотна на дільниці залізничної колії Чернівці – Вадул Сирет використано георадіолокаційний метод [26]. Поперечне електромагнітне профілювання земляного полотна проведено по лівій підшві насипу (ПП 1) та по лівому узбіччю насипу (ПП 2).

Із проведених досліджень встановлено, що на ПП 1 на глибині від 0,3 м до 3 м наявні зони розуцільнення ґрунту (рис. 2, а). Також на глибині 2,3 м спо-

стерігається сигнал від залізобетонної труби, і крім цього в цьому ж місці на глибині від 0,3 м до 2,3 м наявна зона розуцільнення ґрунту над залізобетонною трубою. На ПП 2 на глибині земляного полотна від 0,3 м до 5,6 м наявні зони розуцільнення ґрунту над залізобетонною трубою, також видно характерні сигнали на глибині 6,0 м від залізобетонної труби (рис. 2, б).

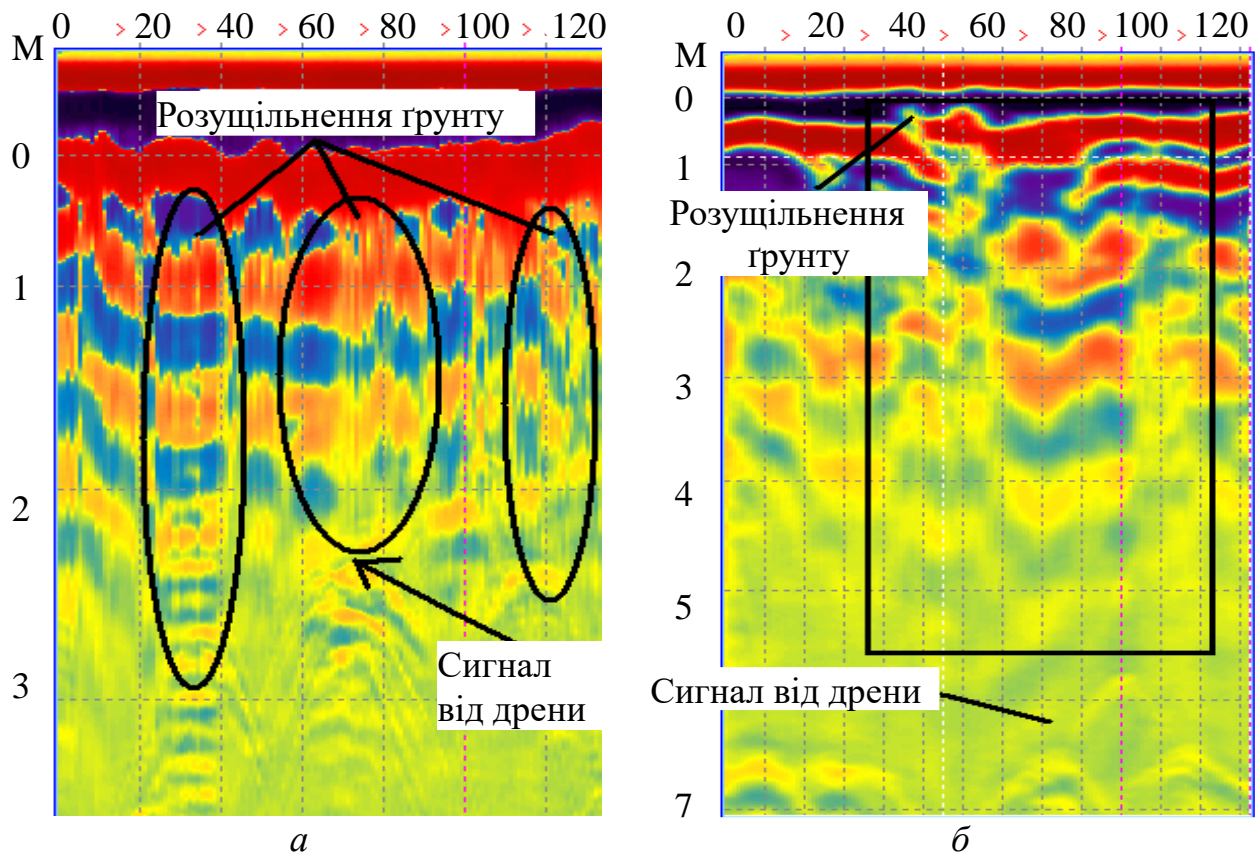


Рис. 2. Радарограма поперечного електромагнітного профілювання: *а* – ПП 1 – по лівій підшві насипу; *б* – ПП 2 – по лівому узбіччю насипу

На основі проведених георадіолокаційних досліджень виявлено ділянки неоднорідного та перезволоженого земляного полотна. Тому застосування георадіолокаційного методу є ефективним щодо визначення технічного стану земляного полотна і прийняття обґрунтованих проектних заходів, щодо відновлення та підвищення його несучої здатності і вибору ефективного місця встановлення дренажних труб.

## 5. Результати визначення напружено-деформованого стану земляного полотна

### 5.1. Алгоритм проведення оцінки напружено-деформованого стану земляного полотна із трубчастими дренажами

Перезволоженні місця земляного полотна залізничної колії призводять до втрати його міцності та стійкості. Тому у роботі пропонується застосування трубчастих дренажів, які вкладаються у тіло земляного полотна у його поперечному напрямку.

Запропонована розрахункова схема земляного полотна залізничної колії армованого трубчастими дренажами при дії транспортного навантаження, наведена на рис. 3.

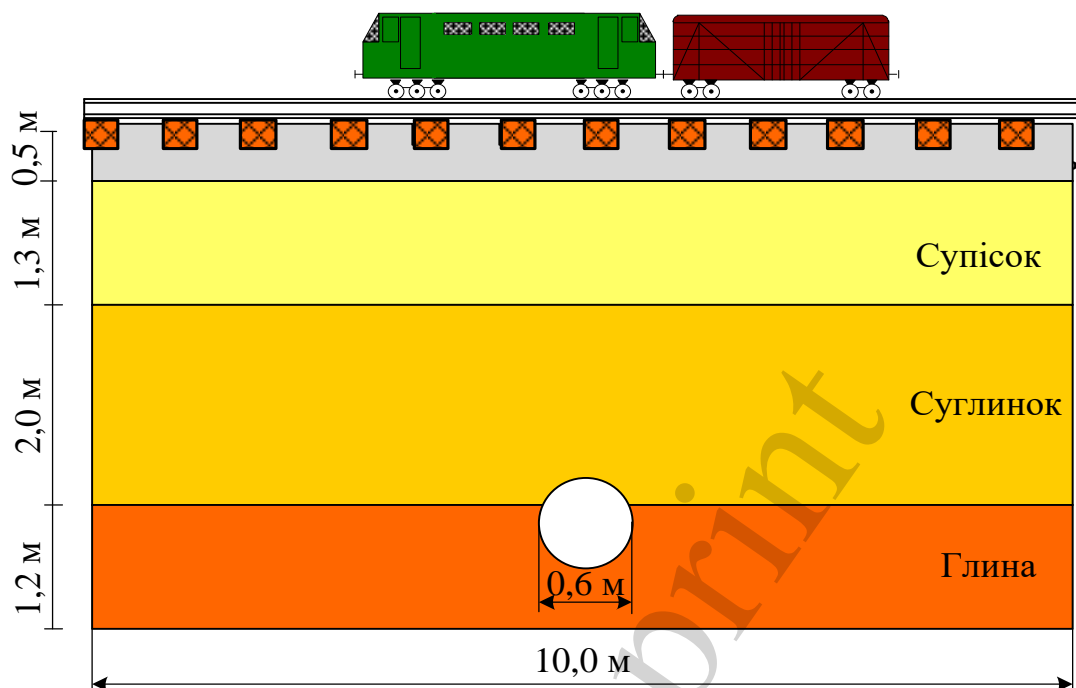


Рис. 3. Схема геометричного перерізу підсиленого земляного полотна

Фрагмент земляного полотна залізничної колії складається із трьох шарів ґрунту. Товщина першого шару, супіску становить 1,3 м, другого шару, суглинку – 2,0 м та третього шару, глини – 1,2 м. Шари земляного полотна до висоти 4,3 м є водонасиченими із питомою вагою води 10 кН/м<sup>3</sup>. Фізико-механічні характеристики кожного із шарів земляного полотна наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики ґрунтової ущільнюючої засипки

Назва механічних характеристик ґрунту	Щебневий баласт	Супісок	Суглинок	Глина
Питома вага, $\gamma$ кН/м <sup>3</sup>	13,8	21,7	22,6	27,4
Коефіцієнт Пуансона, $\nu$	0,27	0,27	0,27	0,27
Коефіцієнт зчеплення $c$ , кПа	0,1	5	13	30
Кут внутрішнього тертя, $\varphi^\circ$	43	37	25	17
Кут дилантації, $\psi^\circ$	0	1	1	2
$E$ , МПа	150	110	28	16,4

Рівномірно-розподілене тимчасове навантаження задано величиною  $q=249,5$  кН/м від еквівалентного навантаження СК 14 [27] при довжині завантаження лінії впливу  $\lambda=5,0$  м та відносному положенні вершини лінії впливу при  $\alpha=0,5$ .

Для порівняння напружень, які виникають при дії навантажень від залізничного транспорту, проводяться розрахунки напружено-деформованого стану земляного полотна методом скінченно-елементного аналізу. Розрахунок проводиться при різній кількості та комбінації розташування трубчастих залізобетонних дренажів у тілі насипу земляного полотна. Всього було створено чотири розрахункові схеми для різних способів розташування дренажних труб та без них. У першому варіанті проведено розрахунок земляного полотна, яке підтоплене ґрунтовими водами без встановлення трубчастих дренажів. У другому варіанті встановлюється одна дренажна труба у тіло насипу земляного полотна. Третій і четвертий варіант передбачає встановлення відповідно двох та трьох дренажних труб.

Армування земляного полотна трубчастими дренажами виконується методом продавлювання без зупинки руху поїздів. Максимальний діаметр труб який можна влаштувати методом проколу становить 600 мм [28]. Крім цього, дані труби є одними із найбільш індустріальних і використовують при осушенні вулиць, автодоріг від ґрунтових вод [29].

Глибина розміщення дренажних труб залежить від рівня залягання водонасичених шарів земляного полотна, які виявляються в результатів георадіолокаційних досліджень.

Глибину встановлення дренажних труб визначається за наступною формулою

$$H_m = \text{БН} - \text{РВ} - 0,5, \quad (1)$$

де БН – бровка насипу земляного полотна; РВ – рівень водоносного шару, які визначаємо за результатами георадіолокаційних досліджень; 0,5 – відстань до верху дренажної труби від РВ.

У четвертому варіанті одна із дренажних труб встановлена нижче (рис. 4, з), порівняно з двома сусідніми, що пояснюється скупченням водонасиченого неоднорідного ґрунту земляного полотна, що видно з результатів георадіолокаційних досліджень (рис. 2).

Слід зазначити, що кількість дренажних труб у тілі земляного полотна визначається розрахунком в залежності від витрати води яку необхідно пропустити у період паводкових вод. Схема їх розташування у тілі земляного полотна залежить від особливостей залягання водонасичених шарів земляного полотна.

З метою вибору оптимальної схеми установки трубчастих дренажів у земляне полотно проведено багатоваріантну оцінку напружено-деформованого стану земляного полотна в залежності від кількості дренажних труб та схеми їх встановлення.

Розрахунок напружено-деформованого стану армованого земляного полотна виконано в нелінійній поставці з використанням пружно-пластичної моделі Мора-Кулона [30, 31].

Ґрунтовий масив моделювали п'ятнадцятивузловими скінченними елементами [32] із заданням фізико-механічних характеристик кожного шару ґрунту, що наведені у табл. 1.



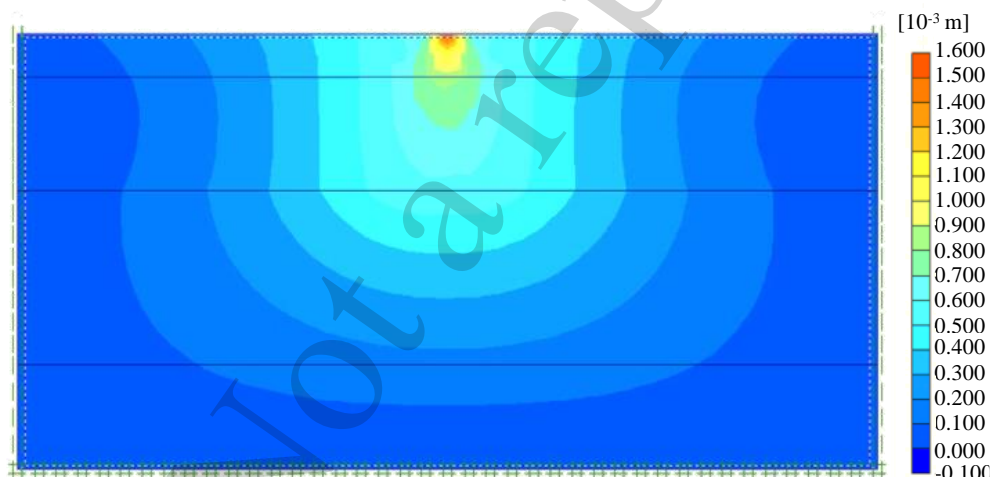
Дренажні труби задані із наступними фізико-механічними параметрами: модуль Юнга –  $3,6 \cdot 10^4$  МПа та коефіцієнтом Пуансона – 0,3. У всіх варіантах діаметр дренажних труб становить 600 мм.

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

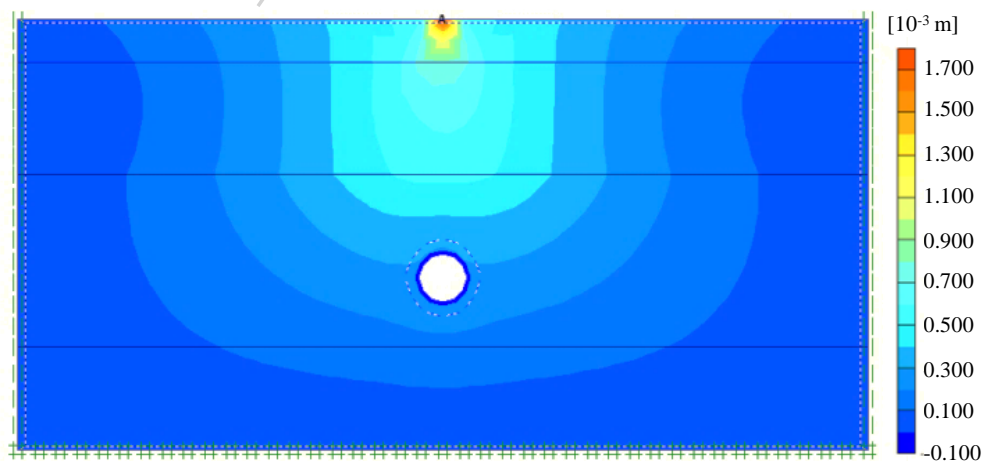
## 5. 2. Результати багатоваріантних розрахунків напружено-деформованого стану армованого земляного полотна з різною комбінацією розташування трубчастих дренажів

Результати розрахунку деформованого стану земляного полотна із різними варіантами розміщення трубчастих дренажів у земляному полотні колії наведено на рис. 5.

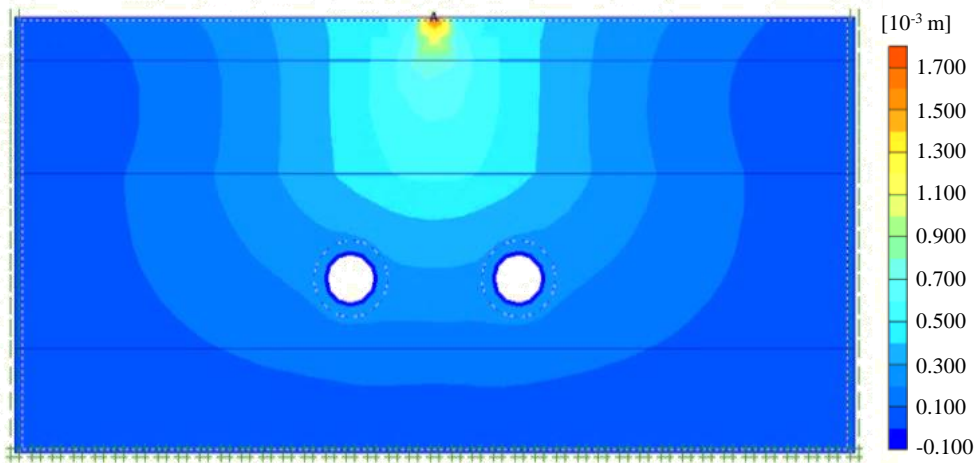
Із рис. 4 видно, що максимальні вертикальні деформації, які виникають у земляному полотні без трубчастих дренажів становлять 1,54 мм. При влаштуванні у тілі земляного полотна дренажних труб максимальні деформації складають: 1,77 мм – одна дренажна труба; 1,75 мм – дві дренажних труби; 1,66 мм – три дренажних труби.



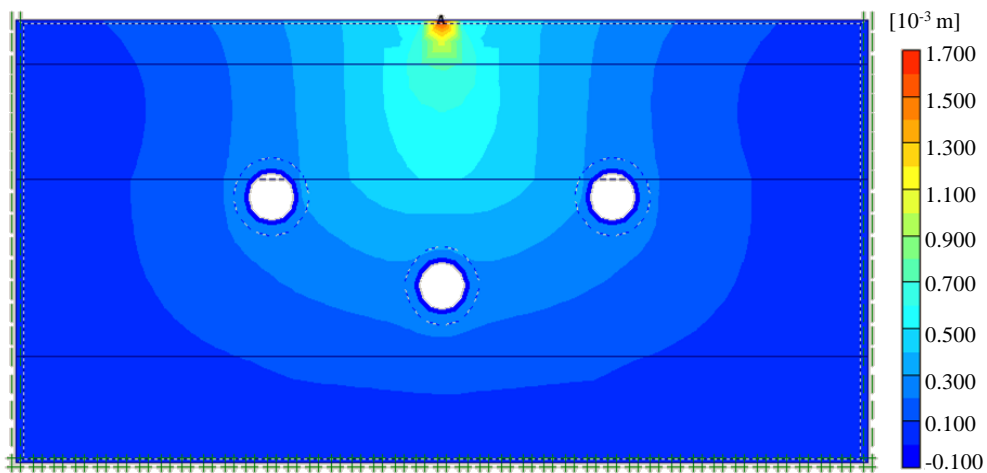
a



б



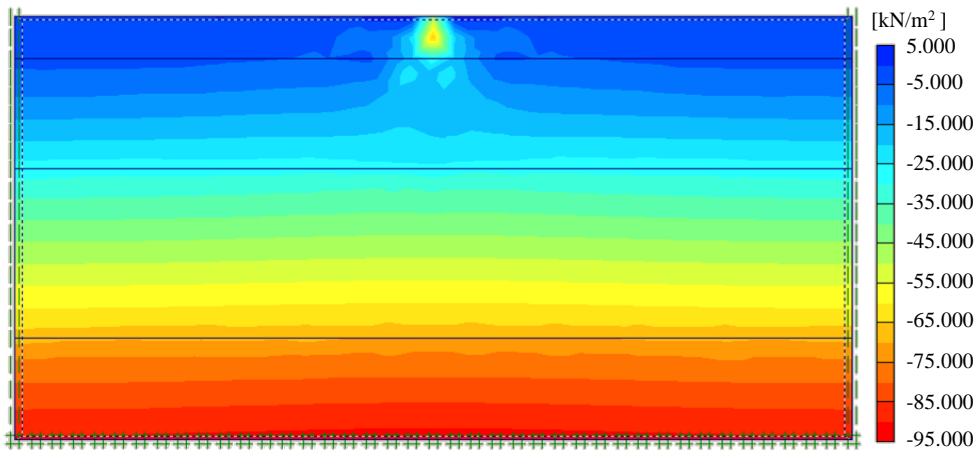
*b*



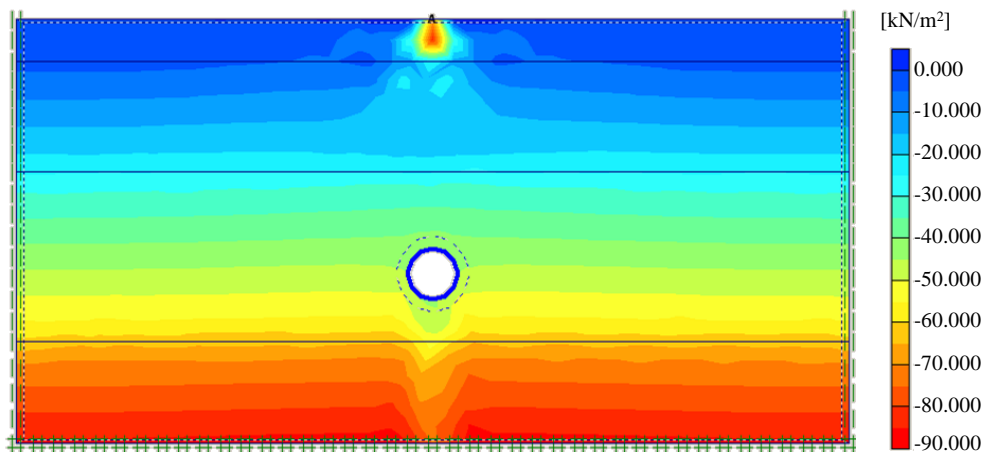
*z*

Рис. 4. Розподіл деформацій у земляному полотні при варіанті: *a* – без дренажів; *b* – одна дренажна труба; *в* – дві дренажні труби; *z* – три дренажні труби

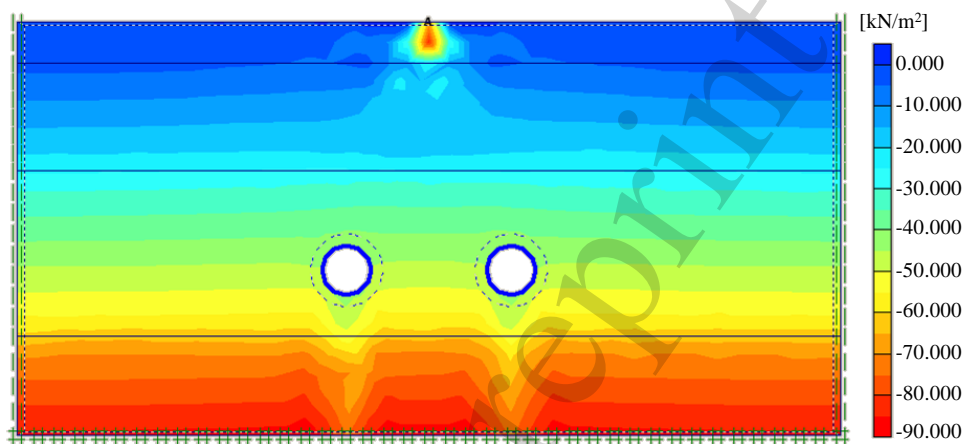
Результати розрахунку напружень, які виникають у земляному полотні наведено на рис. 5.



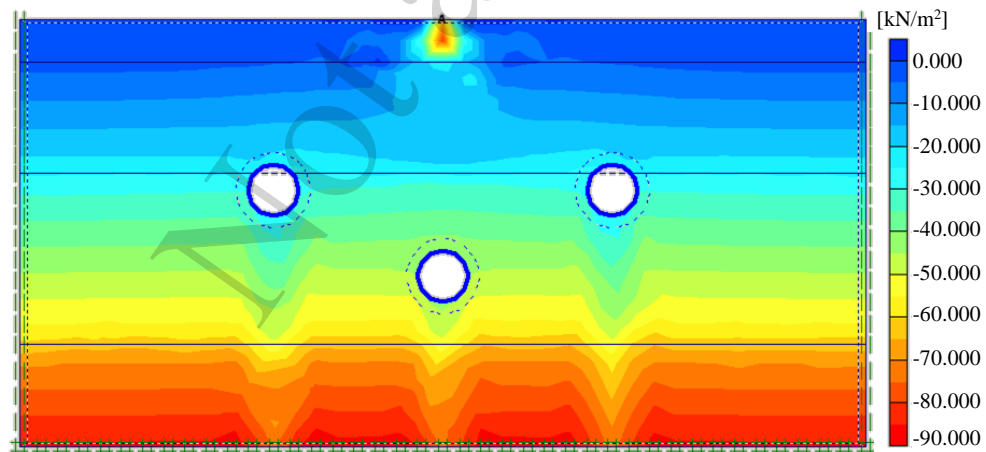
*a*



*а*



*б*



*в*

Рис. 5. Розподіл напружень у земляному полотні при варіанті: *а* – без дренажів; *б* – одна дренажна труба; *в* – дві дренажні труби; *г* – три дренажні труби

Із рис. 5 видно, що максимальні напруження, які виникають у земляному полотні без влаштування трубчастих дренажів становлять 92,28 кПа. При влаштуванні трубчастих дренажів виникають напруження 88,97 кПа – один трубчатий дренаж, 89,40 кПа – два трубчатих дренажі та 89,58 кПа – три трубчастих дренажі.

Результати багатоваріантних розрахунків напружено-деформованого стану армованого земляного полотна наведено в табл. 2.

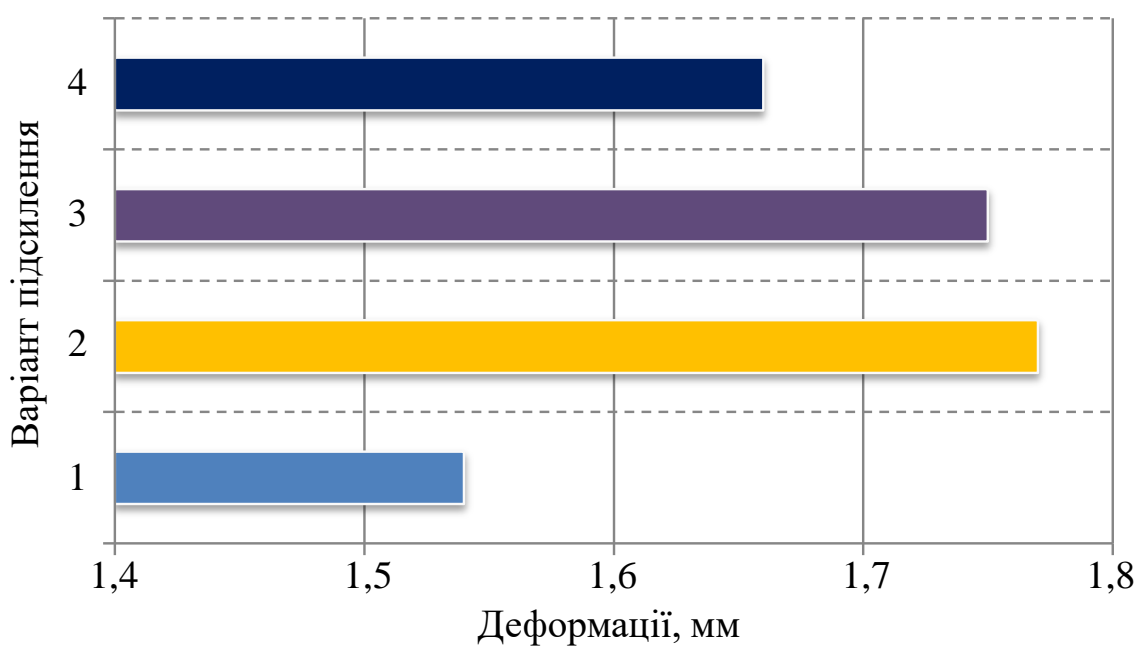
Таблиця 2  
Напружено-деформований стану земляного полотна колії

Варіант підсилення	Кількість дренажних труб	Напруження у земляному полотні, кПа	Вертикальні деформації у земляному полотні, мм	Різниця у відсотках	
				Напруження	Деформації
1	–	92,28	1,54	–	–
2	Одна	88,97	1,77	–3,65%	14,93%
3	Дві	89,40	1,75	–3,12%	13,63%
4	Три	89,58	1,66	–2,92%	7,79%

Із результатів розрахунку напружено-деформованого стану земляного полотна (рис. 4, 5, табл. 2) можна побачити, що застосування трубчастих дренажів призводить до підвищення деформативності земляного полотна залізничної колії. А саме, на 14,93 % при влаштуванні однієї труби, на 13,63 % – двох та на 7,79 % при влаштуванні трьох дренажних труб. Проте напруження у земляному полотні навпаки зменшуються. У випадку влаштування однієї дренажної труби по відношенню до напружень без дренажних труб вони зменшилися на 3,65 %, при влаштуванні двох труб на – 3,12 % та у випадку влаштування трьох дренажних труб напруження зменшилися на 2,92 %.

Результати порівняння деформацій та напружень земляного полотна в залежності від варіанту армування трубчастими дренажами наведено на рис. 6.

Із результатів визначення деформацій (рис. 6, а) видно, що деформації найменші виникають при армуванні земляного полотна трьома дренажними трубами, і вони становлять 1,66 мм. А найбільші виникають при армуванні однією трубою і становлять 1,77 мм.



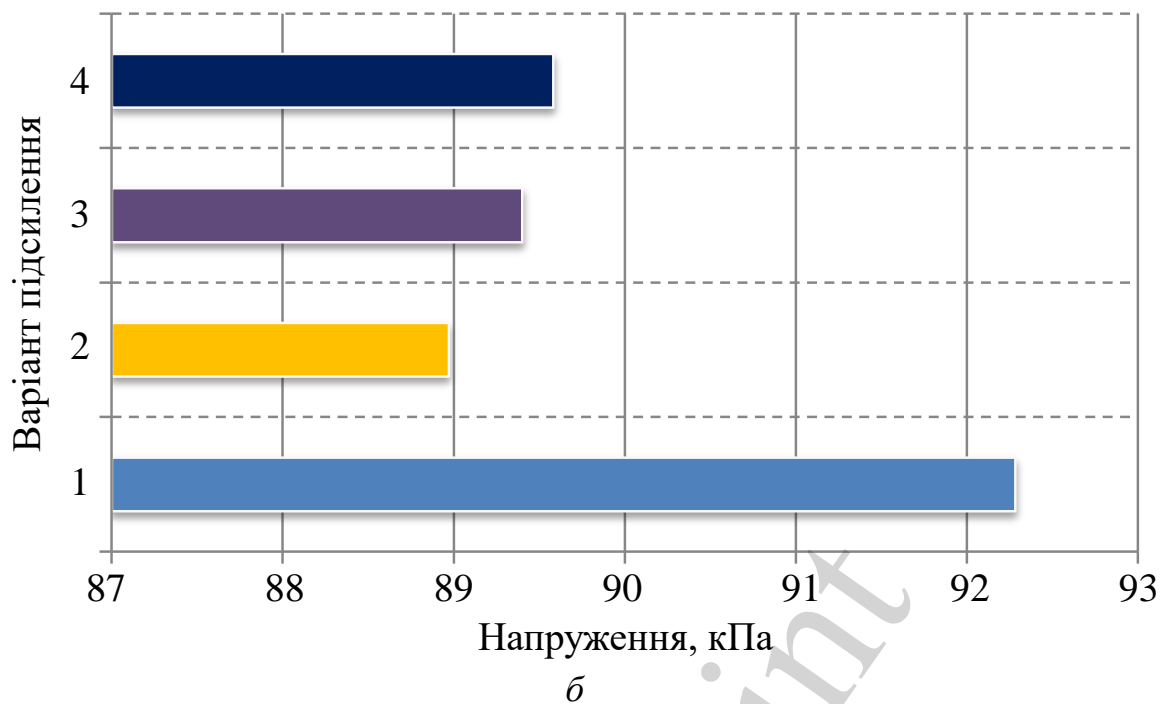


Рис. 6. Порівняння результатів напружено-деформованого стан земляного полотна: *a* – деформацій; *б* – напружень

Максимальні напруження у земляному полотні виникають при армуванні його трьома дренажними трубами, а найменші при армуванні однією трубою і становлять 89,58 кПа та 88,97 кПа відповідно.

### 6. Обговорення результатів оцінки напружено-деформованого стану земляного полотна із трубчастими дренажами

Із проведених досліджень можна побачити, що величина концентрації зони розподілу деформацій у земляному полотні залежить від розрахункової схеми розміщення дренажних труб. У випадку розрахунку деформацій земляного полотна без дренажних труб зона розподілу більших за значенням деформацій займає більшу площу. Далі при застосуванні трубчастих дренажів зона розподілу таких деформацій поширюється на меншу площу земляного полотна. Цей ефект пояснюється тим, що значну частку навантажень приймає залізобетонна труба.

Застосування трубчастих дренажів підвищує деформативність земляного полотна на відміну від земляного полотна без дренажів на 14,93 % (рис. 4). Проте аналізуючи розподіл напружень наведений на рис. 5, бачимо деякі відмінності. Тобто можна констатувати, що величина напружень, які виникають у тілі земляного полотна, є вищими за напруження, які виникають у тілі земляного полотна, у якому знаходиться дренажна труба. Різниця напружень становить до 3,65 %.

Отже, як бачимо компромісний результат який полягає в наступному: з однієї сторони деформативність земляного полотна підвищується (рис. 6, *a*) при застосуванні трубчастих дренажів, але це тільки у початковий період їх укладання. Проте в період експлуатації трубчасті дренажі відводять воду із земляного полотна, що призводить до підвищення його міцності та стійкості. –Крім

цього, як видно з розрахунку розподілу напруження у земляному полотні при застосуванні трубчастих дренажів, вони зменшуються до 4 % у порівнянні із варіантом без застосування трубчастих дренажів (рис. 6, а). Це також позитивно впливає на підвищення несучої здатності земляного полотна.

Приведені результати досліджень напружено-деформованого стану земляного полотна (табл. 2, рис. 6) доводять ефективність застосування трубчастих дренажів. Тому рекомендується їх застосування з метою підвищення міцності земляного полотна залізничної колії, що призведе до зменшення розладнання геометрії колії та підвищення стану безпеки руху поїздів.

Проведеними дослідженнями встановлено, що схема встановлення дренажів не значно впливає на напружено-деформований стан земляного полотна залізничної колії (табл. 2, рис. 6). Тому ефективний вибір варіанту розташування дренажної залізобетонної труби у земляному полотні залізничної колії повинен бути економічно обґрунтованим рішенням. Оскільки із технічної точки зору кількість труб залежить тільки від максимальної витрати води, яку необхідно пропустити дренажною трубою. Результати розрахунку напружено-деформованого стану армованого земляного полотна трубчастими дренажами підтверджується збігом із результатами розрахунку напружень та деформацій отриманих методом скінченних елементів та ітераційним методом у роботах [12, 27, 31].

## 7. Висновки

1. Технічний стан земляного полотна можна оцінити георадіолокаційним методом, що дозволяє провести його ефективну діагностику із виявленням прихованих дефектів та відповідно дозволить попередити виникнення аварійних ситуацій. Даний метод дозволяє виконати дослідження без перекривання руху транспортних одиниць та виконанням робіт у стислі терміни.

2. Для підвищення несучої здатності проблемних ділянок земляного полотна запропоновано конструктивну схему його армування трубчастими дренажами у його поперечному напрямі. Кількість дренажних труб та спосіб їх розміщення у тілі насипу земляного полотна залежить від гідравлічних параметрів ділянки дороги. Максимальний діаметр дренажних труб слід застосовувати розміром 600 мм, при влаштуванні їх методом проколу.

При оцінці напружено-деформованого стану армованого земляного полотна найбільш коректним є використання методу скінчено-елементного моделювання.

3. У результаті багатоваріантних розрахунків напружено-деформованого стану армованого земляного полотна встановлено, що трубчасті дренажі підвищують деформативність земляного полотна на 14,93 % при влаштуванні однієї труби, 13,63 % – двох, і 7,79 % – трьох дренажних труб відносно результатів розрахунку земляного полотна без влаштування трубчастих дренажів.

Напруження, які виникають у тілі земляного полотна без трубчастого дренажу є вищими за напруження, які виникають у тілі земляного полотна у якому знаходиться дренажні труби. Різниця напружень становить до 3,65 % при влаштуванні однієї труби, 3,12 % – двох, і 2,92 % – трьох дренажних труб, що доводить ефективність застосування трубчастих дренажів діаметром 600 мм для підсилення перезволоженого земляного полотна залізничної колії.

Встановлено, що схема встановлення дренажів у поперечному напрямі земляного полотна не значно впливає на його напружено-деформований стан. Тому при виборі варіанту розташування дренажів необхідно виходити із техніко-економічної доцільності використання кількості дренажних труб, що буде залежати від витрат води, що будуть проходити через дренажну трубу.

### Література

1. Дяченко, Л. І., Кислий, Г. П., Курач, В. О. (2001). Інструкція з утримання земляного полотна залізниць України. Дніпро: Вид-во АТЗТ ВКФ “Арт-Прес”, 104.
2. Правила технічної експлуатації залізниць України (2003). Затв.: Наказ Мінтрансу України № 411 від 20.12.1996 р. із змінами та доповненнями. Київ, 133.
3. Сайт Укрзалізниці. URL: <https://www.uz.gov.ua/search/?split=0&q=%D0%B4%D0%B5%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8+%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%96%D1%97&from=&to=&lang=&section=>
4. Kovalchuk, V., Sysyn, M., Nabochenko, O., Pentsak, A., Voznyak, O., Kinter, S. (2019). Stability of the Railway Subgrade under Condition of Its Elements Damage and Severe Environment. MATEC Web of Conferences, 294, 03017. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929403017>
5. Залізничники завершують відновлення колій, пошкоджених повеннями на Івано-Франківщині (2020). URL: <http://railway.lviv.ua/info/press-center/news/article/2020/july/2105/>
6. Новорічний “сюрприз” від стихії (2008). Львівський залізничник. URL: <http://railway.lviv.ua/fileadmin/gazeta/2008/N01/2.pdf>
7. Петренко, В. Д., Тютюкін, А. Л., Кулаженко, О. (2016). Лоткові дослідження армування земляного полотна для підвищення руху поїздів на залізницях України. Українська залізниця, 5 (35), 40–45. URL: <http://eadnurt.diit.edu.ua/handle/123456789/4770>
8. Гуртіна, Л. Г., Хлапук, М. М., Шумінський, В. Д. (2019). Застосування армування ґрунтових споруд в гідротехнічному та цивільному будівництві. Гідроенергетика України, 1-2, 72–75. URL: <https://uhe.gov.ua/sites/default/files/2019-08/18.pdf>
9. Ланис, А. Л. (2019). Армирование эксплуатируемых высоких насыпей с инъектированием твердеющих растворов. Новосибирск, 409.
10. Latvala, J., Nurmikolu, A., Luomala, H. (2016). Problems with Railway Track Drainage in Finland. Procedia Engineering, 143, 1051–1058. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.098>
11. Tasalloti, A., Marshall, A. M., Heron, C. M., Hashemi, M. A. (2020). Geocellular railway drainage systems: Physical and numerical modelling. Transportation Geotechnics, 22, 100299. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100299>
12. Slavinska, O., Savenko, V., Bubela, A., Yaremov, A. (2018). Investigation of the work of the road construction at the sites by pipe drenes from materials of different origin. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (7 (92)), 18–26. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126512>

13. Славінська, О. С., Бубела, А. В., Бондаренко, Л. П., Чечуга, О. С. (2020) Дослідження роботи дренажів мілкового закладання за інтенсивністю водовідведення з урахуванням впливу вібрації. *Дороги і мости*, 21, 201–216. doi: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.201>
14. Kovalchuk, V., Markul, R., Bal, O., Milyanych, A., Pentsak, A., Parneta, B., Gajda, A. (2017). The study of strength of corrugated metal structures of railroad tracks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (7 (86)), 18–25. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96549>
15. Kovalchuk, V., Markul, R., Pentsak, A., Parneta, B., Gayda, O., Braichenko, S. (2017). Study of the stress-strain state in defective railway reinforced-concrete pipes restored with corrugated metal structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (89)), 37–44. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109611>
16. 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>
17. 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, 65–78. doi: <http://doi.org/10.7409/rabdim.020.004>
18. Nabochenko, O., Sysyn, M., Kovalchuk, V., Kovalchuk, Y., Pentsak, A., Braichenko, S. (2019). Studying the railroad track geometry deterioration as a result of an uneven subsidence of the ballast layer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (7 (97)), 50–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154864>
19. Sysyn, M., Nabochenko, O., Kovalchuk, V., Gerber, U. (2019). Evaluation of railway ballast layer consolidation after maintenance works. *Acta Polytechnica*, 59 (1), 77–87. doi: <https://doi.org/10.14311/ap.2019.59.0077>
20. Sysyn, M., Kovalchuk, V., Gerber, U., Nabochenko, O., & Parneta, B. (2019). Laboratory Evaluation of Railway Ballast Consolidation by the Non-Destructive Testing. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 21 (2), 81–88. doi: <https://doi.org/10.26552/com.c.2019.2.81-88>
21. Ашпиз, Е. С., Савин, А. Н. (2006). Мониторинг состояния высоких насыпей Верховской дистанции пути Московской железной дороги. Материалы третьей науч.-техн. конф. с междунар. участием. Москва, 76–79.
22. 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: <https://doi.org/10.1556/606.2020.15.1.3>
23. ДБН. 2.3-19:2018. Споруди транспорту. Залізничі колії 1520 мм. *Норми проектування* (2018). Київ: Мінрегіонбуд, 126.
24. Петренко, В. Д., Тютюкін, О. Л., Купрій, В. П. (2015). Аналіз стійкості земляного полотна для реалізації умов його безпеки при підвищенні швид-



кості руху. Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті, 9, 76–85. URL: [http://ecsrt.diit.edu.ua/article/view/73849/pdf\\_83](http://ecsrt.diit.edu.ua/article/view/73849/pdf_83)

25. Петренко, В. Д., Гузченко, В. Т., Тютюкин, О. Л., Алхдур, А. М. М., Ковалевич, В. В. (2012). Порівняльний аналіз НДС земляного полотна при модернізації. Мости и тоннели: теория, исследования, практика, 1, 69–74.

26. Ковальчук, В. В., Кравець, І. Б., Лучко, Й. Й. (2019). Георадіолокація як неруйнівний метод моніторингу земляного полотна. Дороги і мости, 19-20, 117–137. doi: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2019.19.119>

27. ДБН В.1.2-15.2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи (2009). Київ: Мінрегіонбуд України, 83.

28. Лучко, Й. Й., Ковальчук, В. В., Кравець, І. Б. (2020). Мости і труби з гофрованих металевих конструкцій та моніторинг ґрунтових основ доріг і споруд. Львів: Світ, 272.

29. Дренажная труба PRAGMA. URL: <https://pn20.com.ua/ua/products/drenajna-ruba/>

30. Швец, В. Б., Шаповал, В. Г., Петренко, В. Д. (2008). Фундаменты промышленных, гражданских и транспортных сооружений на слоистых грунтовых основаниях. Днепропетровск: Новая идеология, 274.

31. Петренко, В. Д., Тютюкин, О. Л., Кулаженко, Є. Ю., Кулаженко, О. М. (2016). Математичне моделювання земляного полотна залізничної колії на основі методу скінчених елементів. Дніпро: Дніпровський національний університет залізничного транспорту, 64.

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