

ПІДВИЩЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ (ОГЛЯД)

І. Кравець, аспірант

ORCID ID: 0000-0002-2239-849X

*Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна*

<https://doi.org/10.31734/architecture2021.22.054>

Кравець І. Підвищення несучої здатності земляного полотна залізничної колії (огляд)

Розглянуто важливе для транспортного будівництва питання – несучу здатність земляного полотна. Описано проблеми, які виникають у процесі експлуатації земляного полотна, а саме – підвищення швидкостей руху та збільшення навантаження на вісь, що призводить до розвитку залишкових деформацій та накопичення дефектів, зменшення несучої здатності земляного полотна, збільшення кількості ділянок із обмеженнями швидкості. Проаналізовано стан земляного полотна залізницями України.

Розглянуто вплив динамічної роботи транспортних одиниць на ґрунти земляного полотна та їх фізико-механічні характеристики.

Проведено критичний аналіз методів підвищення несучої здатності земляного полотна, серед яких: застосування геосинтетичних армуючих матеріалів, ін'єктування у баластний шар розчинів, струминна цементизація, встановлення у тіло земляного полотна об'ємних елементів, влаштування дренажних конструкцій. Щодо кожного з цих методів наведено приклад застосування, переваги та недоліки. Встановлено, що у застосуванні різних методів підсилення залишилось невирішеним питання ефективного відведення води з тіла земляного полотна. Також доведено, що перезволоження земляного полотна призводить до зменшення його міцнісних характеристик. Тому слід очікувати зниження несучої здатності і втрати стійкості за дії тимчасових навантажень від транспортних засобів.

Установлено, що більш прогресивними методами відведення води від земляного полотна є застосування трубчастих дренажів, оскільки на ділянках, де влаштовані дренажі, менше розладнань геометрії колії, а несуча здатність земляного полотна вища за аналогічні ділянки без влаштування дренажів.

Запропоновано спосіб підвищення несучої здатності земляного полотна залізничної колії, що реалізується застосуванням комбінованого розташування дренажних труб у вертикальному та горизонтальному напрямках у тілі насипу земляного полотна, що є засобом усунення фактору, який спричиняє його деформації та дефекти, а саме – відведення води. Також наведено результати дослідження напружено-деформованого стану земляного полотна, підсиленого трубчастими дренажами, методом скінченних елементів.

Ключові слова: земляне полотно, несуча здатність, дренаж, проколювання, підсилення.

Kravets I. Increasing carrying capacity subgrade of the railway track (overview)

An important issue for transport construction is considered – the bearing capacity of the subgrade. Problems that arise during the operation of the subgrade are described, namely increasing the speed and increasing the load on the axle, which leads to the development of residual deformations and accumulation of defects, reducing the bearing capacity of the subgrade, increasing the number of sections with speed limits. The condition of the subgrade on the railways of Ukraine is analyzed.

The influence of dynamic work of transport units on the soils of the subgrade and their physical and mechanical characteristics is considered.

A critical analysis of methods for increasing the bearing capacity of the subgrade, including the use of geosynthetic reinforcing materials, injection into the ballast layer of solutions, jet-grouting, installation in the body of the subgrade three-dimensional elements, installation of drainage structures. Each of these methods provides an example of application, advantages and disadvantages. It is established that the application of various methods of amplification left unresolved the issue of effective drainage of water from the subgrade of the ground. It is also proved that wetting the ground leads to a decrease in its strength characteristics. Therefore it is necessary to expect decrease in bearing capacity and loss of stability at action of temporary loadings from vehicles.

It is established that a more advanced method of drainage of water from the subgrade is the use of tubular drainage. Because in areas where drainage is arranged, there are fewer disorders of track geometry, and the bearing capacity of the subgrade is higher than similar areas without drainage.

A method of increasing the bearing capacity of the subgrade of the railway track, which is realized by using a combined arrangement of drainage pipes in vertical and horizontal directions in the subgrade of the embankment, which is a means of eliminating the factor that causes its deformation and defects, namely water drainage. The results of the study of the stress-strain state of the subgrade reinforced with tubular drainages by the finite element method are also presented.

Key words: subgrade, bearing capacity, drainage, pushing, reinforcement.

Постановка проблеми. Земляне полотно залізниць України споруджено понад 150 років, тому і спроектовано під інші навантаження та швидкості руху поїздів порівняно із сучасними експлуатаційними умовами. Земляне полотно є основним елементом залізничної колії, від якого безпосередньо залежать її геометрія, стабільна робота та безпечна експлуатація.

Нині простежується суттєва невідповідність параметрів інфраструктури потребам перевезень. Підвищення швидкостей руху та збільшення навантаження на вісь призводить до розвитку залишкових деформацій та накопичення дефектів, зменшення несучої здатності земляного полотна, збільшення кількості ділянок із обмеженнями швидкості, зменшення пропускної спроможності

(виникнення бар'єрних місць). Виникає загроза безпеці руху поїздів. Ці процеси суттєво впливають на подальшу безпечну експлуатацію земляного полотна, що зумовлює необхідність розробки експериментальних методів визначення та підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна.

Згідно з даними АТ «Укрзалізниця», загальна протяжність земляного полотна на залізницях України становить 21872,2 км, зокрема протяжність земляного полотна, схильного до деформацій, – 870,8 км (4 %) (рис. 1). Це негативний фактор, оскільки такі місця є бар'єрними, тобто на них діють обмеження швидкості, що, своєю чергою, впливає на пропускну і провізну спроможність залізниць.

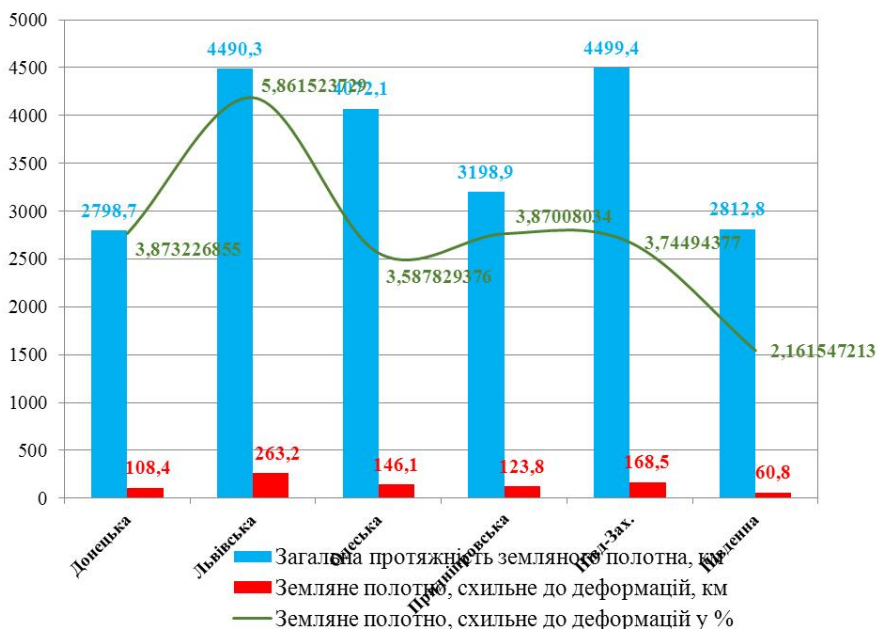


Рис. 1. Діаграма розподілу протяжності земляного полотна на залізницях України.

Однією із основних проблем інфраструктури, згідно зі Стратегією АТ «Укрзалізниця» на період 2019–2023 роки [1], є обмежена пропускна здатність окремих ділянок колії, відсутність можливості підвищення швидкостей руху пасажирських поїздів під час суміщеного руху. Також зазначено, що чимала частина колійної інфраструктури потребує різних видів ремонту (понад 2000 км) та спричиняє обмеження швидкості руху для поїздів (близько 350 км). Це збільшує експлуатаційні витрати та зменшує пропускну і провізну спроможність дільниць.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У залізничних організаціях розвинених країн

виникли проблеми з утриманням та реконструкцією колії, які є наслідком зростання осьових навантажень і швидкостей руху через неналежне дослідження та підсилення земляного полотна, і обґрунтування несучої здатності відповідно.

З аналізу технічної літератури [2–5] відомо, що в результаті збільшення навантаження на вісь на деяких ділянках, які раніше були у відмінному стані, виникають геометричні відхилення та залишкові деформації. Основною причиною цих явищ є те, що у порівняно слабких елементах – баластному шарі та земляному полотні – виникають граничні значення напружень. Ґрунт земляного полотна проникає в баластний шар, унаслідок чого несуча здатність земляного полотна суттєво знижується.

Іншим важливим аспектом проблеми забезпечення несучої здатності земляного полотна є збільшення швидкостей руху, через які зростає і динамічний вплив на земляне полотно. У результаті підвищеної динамічної дії на неоднорідні ґрунти земляного полотна збільшується показник пластичних деформацій ґрунтів. Це призводить до більш швидкого розладнання колії загалом та обмеження швидкостей руху.

У праці [2] автори описують дослідження роботи залізничної колії під вібродинамічним впливом різного за величиною поїзного навантаження, зазначаючи, що інтенсивність руху поїздів у поєднанні з кліматичними та експлуатаційними факторами, без надійної основи можуть призвести до значних деформацій земляного полотна та зміни геометрії залізничної колії.

Способи армування земляного полотна досліджували А. М. М. Алхдур, Е. С. Ашпиз, Л. С. Блажко, М. Н. Гольдштейн, Е. І. Даніленко, В. В. Ковальчук, А. Л. Ланис, Й. Й. Лучко, В. Д. Петренко, Л. М. Тимофєєва, О. Л. Тюткін, М. А. Фрішман, Г. М. Шахунянц, Т. Г. Яковлева [6–11] та інші.

З огляду на аналіз науково-технічної літератури [4; 12], основними заходами зі стабілізації та покращання фізико-механічних властивостей ґрунтів земляного полотна є відсіпання поверх слабкої основи шару щебеню, суцільна вирізка з улаштування прижимних бERM, бортова вирізка по торцях шпал. Але з часом унаслідок динамічного поїзного навантаження велика частина щебеневого баласту змішується зі слабким ґрунтом, що знову призводить до втрати міцності основи щебеневої призми, виникнення її осідання, відтак – зменшення швидкості руху поїздів [14], тобто ефект від такого виду робіт є недовготривалим (короткочасним). Суцільна вирізка з улаштування прижимних бERM і бортова вирізка по торцях шпал є дієвим, але дорогим видом робіт [4], оскільки зумовлює використання великої кількості будівельних матеріалів (ґрунт, щебінь, пісок), збільшення розмірів земляного полотна та подовження штучних споруд. Також ці роботи виконуються з тривалим закриттям руху.

Армування ґрунтів земляного полотна актуальне здавна, але в Україні поширені лише геосинтетичні армуючі елементи як у залізничній [4; 13], так і в автомобільній [14] галузях.

Постановка завдання. Наша мета – проведення критичного аналізу методів підвищення несучої здатності земляного полотна.

Виклад основного матеріалу. Для забезпечення нормальної експлуатації земляного полотна вживають відповідних заходів, що відповідають механізму порушення міцності і стійкості кожного його елементу: забезпечення правильного розташування і необхідного ступеня ущільнення ґрунту, відповідний вибір ґрунтів для насипів, захист ґрунту від зволоження влаштуванням дренажів, гідроізоляції тощо, захист від небезпечних температурних впливів, ерозії, хвильових впливів, правильне призначення геометричних параметрів. Зазначені заходи необхідно проводити комплексно, з урахуванням місцевих та експлуатаційних умов [15].

Сучасні технології зміцнення ґрунтів входять у практику транспортного і цивільного будівництва. Зміцнення слабких основ земляного полотна, посилення дорожнього одягу, зведення насипів із укосами підвищеної крутості, будівництво армоґрунтових підпірних стін, – усі ці завдання вирішують за допомогою сучасних армуючих матеріалів.

Одними із таких матеріалів є геотекстилі. До них належать: геосітки, геомати, георешітки, геомембрани, геокомпозити [16].

Геотекстильні матеріали виконують такі функції: поділ – розділяють різні типи ґрунтів, унеможливають їх перемішування, що часто стається в експлуатації залізничних доріг, і виникають такі дефекти, як баластні корита, виплески та інші; армування – підвищення несучої здатності ґрунтів або ґрунтових конструкцій внаслідок перерозподілу в них розтягувальних напружень на армуючі матеріали. Експериментальні дослідження з армування, основної площадки земляного полотна геотекстилем засвідчують, що міцність зростає до 1,6 раза [13].

У залізничному будівництві георешітки застосовують для захисту укосів виїмки (насипу) від ерозії, підсилення основної площадки земляного полотна, при відсіпці насипу на слабкій основі. Приклад застосування об'ємних георешіток для підсилення та стабілізації земляного полотна у будівництві інших колій та укріплення наявних відображено на рис. 2.

У праці [17] для посилення динамічної міцності щебеневого баласту, відтак – підвищення швидкості рухомого складу, автори пропонують застосовувати технологію зміцнення за рахунок ін'єктування в щебеновий шар нового ефективного полімерного матеріалу «Ballastbond 70». Обробка поліуретановою композицією щебеневого баласту підвищує пружність основи колії і покращує такі параметри, як жорсткість, сприй-

няття навантажень. Використання такої технології дає змогу мінімізувати вплив змін характеристик колії на перехідних ділянках. Пружна основа колії довше зберігає свої вихідні геометричні параметри під навантаженням, що уможливорює подовження міжремонтних інтервалів не менше ніж утричі.

Перехід із безбаластної колії на штучних спорудах до колії на баласті завжди був проблемним. На залізничних магістралях Європи це завдання вирішують за допомогою посилення баласту поліуретановою композицією (рис. 3, *a*). Також цю технологію застосовують для укріплення баластної призми у кривих малого радіуса (рис. 3, *b*).

Технологія укріплення зберігає дренажні властивості, оскільки щебеневі частинки склеюються тільки в контактних точках. Виробники запевняють, що баласт можна підбивати, очищати і знову склеювати.

В останні 40–50 років розвивається технологія «jet-grouting» (струминна цементизація).

Вона настільки ефективна, що останнім десятиліттям її почали застосовувати у всьому світі, ефективно вирішуючи численні завдання в галузі транспортного та цивільного будівництва [18; 19]. Суть технології полягає у використанні струменя цементного розчину для руйнування і одночасного перемішування ґрунту з цементним розчином у режимі «mix-in-place» (перемішування на місці). До основних переваг цієї технології належать: висока швидкість робіт, можливість виконання робіт у стислих умовах, відсутність динамічних впливів на об'єкти, що розташовані в зоні укріплення. За допомогою цієї технології можна вирішити такі завдання: улаштування підпірних стінок і огорожень котлованів, посилення фундаментів, улаштування протифільтраційних завіс і екранів, армування ґрунтів і геомасивів, закріплення ґрунтів за проходження тунелів і будівництва автодоріг; зміцнення укосів і схилів, підвищення міцнісних і деформаційних характеристик і контрольоване заповнення пазух споруд та підземних пустот.



Рис. 2. Застосування об'ємних георешіток для підсилення та стабілізації земляного полотна: *a* – під час будівництва додаткових колій; *b* – в укріпленні наявних.



Рис. 3. Застосування поліуретанової композиції: *a* – виконання ділянки з перехідною жорсткістю за допомогою ін'єктування поліуретанової суміші; *b* – укріплення плеча баластної призми в кривих малого радіуса.

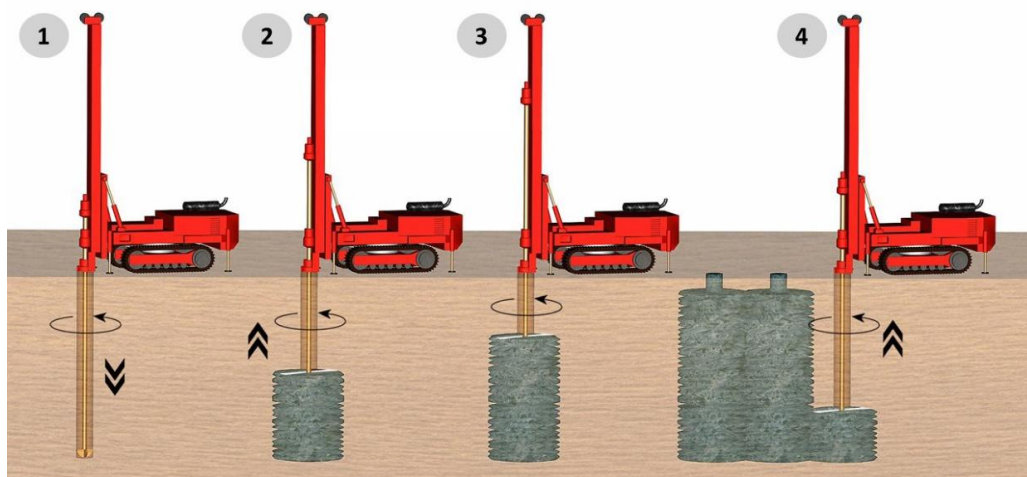


Рис. 4. Технологія «jet-grouting»: 1) буріння; 2) нагнітання розчину (підйом і обертання); 3) завершення укріплення (обертання і вилучення); 4) повторення дій 1–3 [20].



Рис. 5. Укріплення земляного полотна залізниць.

Етапність і схема струминної цементації ґрунтів наведена на рис. 4.

Приклад укріплення земляного полотна залізничної колії методом струминної цементації наведено на рис. 5.

Новим методом підсилення земляного полотна є *Geopier GeoSpikeSM* (рис. 6) [21]. Ця система передбачає встановлення міцних елементів у неоднорідних ґрунтах і виконується без зняття залізничних

колій, шпал або баласту. Розширена верхня частина оболонки стискається між шпалами під час вставки та розширюється до початкової форми після очищення шпал, щоб забезпечити ефективну передачу навантаження від баласту до системи *GeoSpike*. Динамічні навантаження від транспортних одиниць передаються через баласт до оболонки, а далі – через оболонку та тісно ущільнений заповнювач – до відповідного несучого шару.

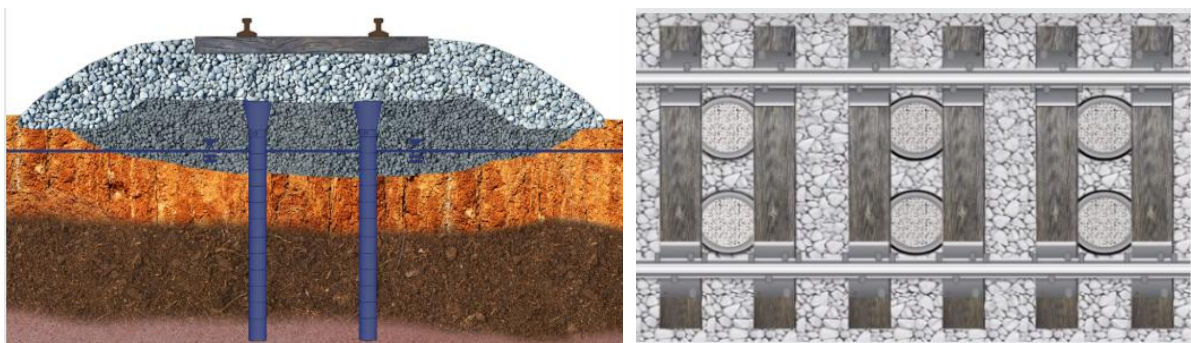
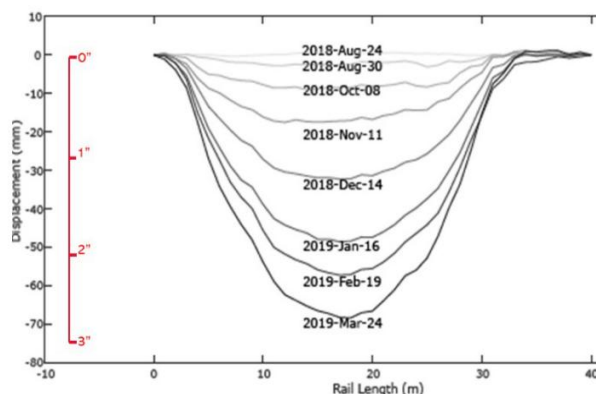


Рис. 6. Метод *Geopier GeoSpikeSM* для підсилення неоднорідного земляного полотна [21].



a



b

Рис. 7. Дослідна ділянка колії [21]: а – осідання залізничної колії;
b – графік осідань за результатами моніторингу.

Було проведено експериментальні дослідження роботи неоднорідного земляного полотна з осіданнями (рис. 7, а), які продовжувались після виконання ремонту. Відповідно до моніторингу за станом ділянки, з часу попереднього ремонту відбулося відхилення більше ніж 75 мм (рис. 7, b).

Система *Geopier GeoSpikeSM*, використана для посилення неоднорідного земляного полотна на проблемній ділянці колії, зменшила динамічні прогини залізничної колії більш ніж на 60 % без демонтажу рейок, шпал і баласту.

Автор [22] аналізує різні способи укріплення земляного полотна та наголошує на проблемі порушення вологісного режиму, який призводить до понад 40 % деформацій земляного полотна. Виконання часткових робіт із усунення баластних заглиблень не вирішує проблему, яка є набагато глибшою, у тілі земляного полотна, – наявність ослаблених ділянок із недостатніми для залізниць фізико-механічними властивостями.

Отже, як бачимо із проведеного аналізу, виконано чимало наукових робіт на тему підвищення міцності та несучої здатності земляного полотна. Але вони спрямовані на застосування геотекстилів [13], геосинтетиків [11], ін'єкційних розчинів [8; 22]. Відтак питання щодо ефективного відведення води з тіла земляного полотна досі невирішено, адже практика доводить, що тривала експлуатація геотекстилю у конструкції залізничної колії негативно впливає на її технічний стан через скупчення води.

Встановлено, що перезволоження земляного полотна призводить до послаблення його міцнісних характеристик. Тому слід очікувати зниження несучої здатності і втрати стійкості за дії тимчасових навантажень від транспортних засобів.

Більш раціональними методами відведення води від земляного полотна є застосування трубчастих дренажів, що підтверджується проміжними результатами досліджень, проведених на фінських залізницях [23]. Установлено, що на ділянках, де влаштовані дренажі, спостерігається менше розладнань геометрії колії, а несуча здатність земляного полотна вища за аналогічні ділянки без влаштування дренажів. Ефективність дренажних конструкцій підтверджено також у праці [24].

Для захисту та підвищення несучої здатності підтопленого й дефектного земляного полотна від перезволоження, які спричиняють руйнування земляного полотна, одним із варіантів запропоновано застосування трубчастих дренажів [10]. Цей спосіб підвищення несучої здатності земляного полотна залізничної колії реалізується застосуванням комбінованого розташування дренажних труб у вертикальному та горизонтальному напрямках у тілі насипу земляного полотна, що є засобом усунення чинника, який спричиняє його деформації та дефекти, а саме – відведення води. На цей спосіб підвищення несучої здатності земляного полотна отримано патент на корисну модель [25].

Автори у праці [10] оцінили й дослідили напружено-деформований стан земляного полотна, підсиленого трубчастими дренажами методом скінченних елементів. 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 встановлено дренажні труби. Досліджено, що різниця напружень становить до 3,65 % за влаштування однієї труби, 3,12 % – двох, і 2,92 % – трьох дренажних труб. Це доводить ефективність застосування трубчастих дренажів діаметром 600 мм для підсилення перезволоженого земляного полотна залізничної колії [10]. Отже, теоретично доведено ефективність застосування трубчастих дренажів для підвищення несучої здатності перезволоженого земляного полотна залізничної колії за дії постійних і тимчасових навантажень.

Особливу увагу потрібно приділяти впровадженню прогресивних методів під час влаштування дренажних конструкцій. Утворення горизонтальних виробок і свердловин під час прокладання дренажних конструкцій закритим способом можуть бути реалізовані статичним вібраційним і віброударним впливами на робочий орган або їх поєднання. Влаштовуючи дренажні конструкції під автомобільними і залізничними дорогами, трамвайними шляхами та іншими перешкодами, більш ефективний закритий метод, який не вимагає прокладання траншей. Доцільність закритого способу методом статичного проколу чи продавлювання на практиці доведена [26; 27].

Висновки. Зважаючи на стан земляного полотна залізничних та автомобільних доріг України, впровадження сучасних технологій із підвищення міцності та несучої здатності є актуальним науково-практичним завданням.

Виконано чимало наукових робіт на тему підвищення міцності та стійкості земляного полотна. Але вони спрямовані на застосування геотекстилів, геосинтетиків, ін'єкційних розчинів.

Питання ефективного відведення води з тіла земляного полотна не розроблено.

Попри впровадження методів ін'єктування та струминної цементизації вони є дороговартісні через застосування дорогих в'язучих матеріалів. Також зазначимо, що не досліджено, як ці матеріали вплинуть на проведення робіт з очищення баласту залізничної колії, яке виконується періодично для відновлення рівнопружності підрейкової основи.

Метод *Geopier GeoSpikeSM* для підсилення земляного полотна є новим і недостатньо вивченим. Невідомо, як вібраційні дії від рухомого складу залізниць з часом впливатимуть на стійкість і міцність такої конструкції.

У результаті застосування скінченно-елементного аналізу теоретично доведено ефективність застосування трубчастих дренажів для підвищення несучої здатності перезволоженого земляного полотна залізничної колії під час дії постійних і тимчасових навантажень.

Установлено, що деформативність земляного полотна підвищується під час застосування трубчастих дренажів, у початковий період їх експлуатації, проте в подальшому, коли вони відводять воду з тіла земляного полотна, навпаки, – підвищуватиметься несуча здатність земляного полотна за рахунок покращення фізико-механічних властивостей ґрунтів.

Тому подальша робота ґрунтуватиметься на натурних експериментальних дослідженнях запропонованого способу підвищення несучої здатності земляного полотна [25] та розробці рекомендацій із підвищення несучої здатності проблемних ділянок земляного полотна з трубчастими дренажами.

Бібліографічний список

1. Стратегія АТ «Укрзалізниця» на 2019–2023 роки. URL: <https://www.uz.gov.ua/files/file/Strategy-5-Typography-%D0%B0%D0%BD%D0%B3.pdf> (дата звернення: 15.04.2021).
2. Железнов М. М. и др. Влияние длительности и частоты приложения нагрузки на напряженно-деформированное состояние пути. *Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. 2018. 77 (6). С. 364–367.
3. Коншин Г. Г. Оценочные критерии воздействия на земляное полотно вагонов с повышенными осевыми нагрузками. *Транссибирская магистраль на рубеже XX-XXI веков: пути повышения эффективности использования перевозочного потенциала: Труды Международной научно-практической конференции*. Москва, 2003. С. 367–369.
4. Petrenko V. D. Research of parameters of the modernized subgrade. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2012. №. 41. С. 164–169.
5. Briggs K. M. Failures in transport infrastructure embankments. *Engineering Geology*. 2017. Vol. 219. P. 107–117.
6. Даніленко Е. І. Залізнична колія: підручник для вищих навчальних закладів (у 2-х т.). Київ: Інпрес, 2010. Том 2. 456 с.
7. Шахунянц Г. М. Земляное полотно. Москва: Гос. транспорт. ж.-д. изд-во, 1946. 342 с.
8. Ланис А. Л. Армирование эксплуатируемых высоких насыпей с инъецированием твердеющих растворов: дис. док. тех. наук: 05.22.06 «Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог». Новосибирск, 2019. 409 с.

9. Лучко Й. Й. Грунтознавство, механіка ґрунтів, основи та фундаменти: навч. посіб. Львів: Каменяр, 2013. 320 с.
10. Luchko J., Kovalchuk V., Kravets I., Gajda O. Determining patterns in the stressed-deformed state of the railroad track subgrade reinforced with tubular drains. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 5/7 (107). P. 6–13.
11. Гуртіна Л. Г., Хлапук М. М., Шумінський В. Д. Застосування армування ґрунтових споруд в гідротехнічному та цивільному будівництві. *Гідроенергетика України: науково-виробничий журнал*. 2019. № 1–2. С. 72–75.
12. Забезпечення стійкості баластної призми на слабкій основі при модернізації залізничної колії / А. В. Ніколайчук та ін. *Наука та прогрес транспорту: вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2011. № 38. С. 157–161.
13. Баль О. М., Ковальчук В. В., Костик Б. В. Дослідження ефективності застосування геотекстилю в конструкції залізничної колії. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2014. № 148 (2). С. 162–170.
14. Скрипник Т. В., Малько М. М., Скрипник В. Ю. Доцільність армування земляного полотна геосинтетичними матеріалами. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2010. № 79. С. 27–32.
15. Утешбаева А., Жанабергенова Ж. Причины вызывающие деформации и разрушения земляного полотна. *Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика*. 2017. С. 218–221.
16. Торик Д. Р., Желновач В. С., Шахматов В. А. Применение геосинтетических материалов для борьбы с растительностью. *Науково-технічний збірник ХНАГХ*. 2010. № 97. С. 106–112.
17. Гармаш А. И., Костенко А. Н. Новая технология укрепления щебеночного балласта железнодорожного полотна. *Будівельні матеріали, виробництва та санітарна техніка*. 2012. Вип. 45. С. 141–143.
18. Малинин А. Г. Струйная цементация ґрунтов. Москва: ОАО Издательство «Стройиздат». 2010. 226 с.
19. Тер-Мартirosян З. Г., Струнин П. В. Усиление слабых ґрунтов в основании фундаментных плит с использованием технологии струйной цементации ґрунтов. *Вестник МГСУ*. 2010. С. 4–2.
20. Сайт компанії Railsystem. URL: <http://www.railsystem.net/jet-grouting/> (дата звернення: 15.04.2021).
21. Сайт компанії Geopier. URL: <http://www.geopier.com> (дата звернення: 15.04.2021).
22. Ланис А. Л. Способы усиления земляного полотна инъектированием. *Известия Транссиба*. Омск. 2016. № 3 (27). С. 117–124.
23. Problems with Railway Track Drainage in Finland / Latvala J. et al. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 14. P. 1051–1058.
24. Tasalloti A. Geocellular railway drainage systems: Physical and numerical modelling. / Tasalloti A. et al. *Transportation Geotechnics*. 2020. Vol. 22. P. 100–299.
25. Спосіб підвищення несучої здатності дефектного земляного полотна автомобільних доріг та залізничної колії: пат. 146420 Україна. № u 2020 06783; заявл. 22. 10.2020 р., опубл. 17.02.2021. Бюл. № 7.
26. Васильев С. Г., Лещенко А. В. Технологические процессы проведения горизонтальных выработок. Львов: Свит, 1993. 160 с.
27. Luchko J. J., Leshchenko A. A. Determination of a ground fluctuation zone caused by piping. *In processing of conference «Concrete bridges»*. Kosice, 1997. P. 298–303.

Стаття надійшла 17.05.2021