

## АНОТАЦІЯ

*Кравець І. Б.* Методи оцінювання та підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна залізничної колії. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної задачі розробки методів оцінювання та підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна, армованого трубчастими дренажними конструкціями, при дії статичних і динамічних навантажень від транспортних засобів. Теоретичну сторону задачі вирішено шляхом удосконалення аналітичних методів оцінки несучої здатності неоднорідного земляного полотна із урахуванням комплексу факторів: фізико-механічних характеристик ґрунтів земляного полотна і трубчастих дренажних конструкцій та навантажень від транспортних засобів. Експериментальна та практична сторона – вирішується шляхом розробки інерційного пристрою для визначення несучої здатності неоднорідного земляного полотна та способу підвищення його несучої здатності.

Проаналізовано технічний стан земляного полотна залізничної колії та проблеми забезпечення його міцності при дії паводкових вод та перезволоження на ділянках колії у процесі експлуатації. Встановлено, що протяжність земляного полотна, схильного до деформацій складає 870,8 км (4 %), що призводить до зниження пропускної та провізної спроможності залізниць. Тому розробка методів підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна є вкрай необхідною і своєчасною.

Із аналізу науково-дослідних робіт встановлено, що дослідження, які спрямовані на вирішення задачі розробки методів визначення та підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна в умовах експлуатації, є актуальними і відповідають інтересам транспортної галузі та Національній

транспортній стратегії України і Стратегії АТ «Укрзалізниця», оскільки розробка дієвих методів підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна забезпечить підвищення стану безпеки руху поїздів.

Проведено георадіолокаційні дослідження проблемних ділянок земляного полотна залізничної колії, на основі яких знайдено розподіл характерних ознак неоднорідності земляного полотна у вертикальній площині та межі їх розташування.

Розроблено математичну модель для оцінки несучої здатності неоднорідного земляного полотна, армованого трубчастими дренажними конструкціями. Проведено оцінку напружено-деформованого стану неоднорідного земляного полотна із врахуванням фізико-механічних параметрів ґрунтів, трубчастих дренажних конструкцій і динамічних навантажень від рухомого складу залізничного транспорту.

Встановлено, що важливою характеристикою ґрунтів земляного полотна є їх щільність. Саме ступінь ущільнення ґрунту безпосередньо впливає на деформаційні характеристики земляного полотна. Зі збільшенням щільності зростають і характеристики опору зрушенню, що призводить до забезпечення стабільної роботи земляного полотна при вібродинамічній дії динамічного навантаження.

Розроблено методика розрахунку динамічних навантажень від транспортних засобів при неоднорідному земляному полотні, яка дозволяє враховувати вплив геометричних нерівностей на рейковій колії на несучу здатність земляного полотна. При розрахунку розподілу динамічних коливань у тілі неоднорідного земляного полотна, армованого трубчастими дренажними конструкціями, враховуються фізичні характеристики різних шарів ґрунтів, дренажних конструкцій та їх геометричні розміри. Отримано дані щодо розподілу динамічних навантажень на неоднорідне земляне полотно, які в подальшому використовуються для оцінки несучої здатності земляного полотна армованого трубчастими дренажами.

Розроблено методика для лабораторного визначення ступеня ущільнення земляного полотна на основі інерційних вимірювань прискорень в ґрунтах

земляного полотна. Яка дозволяє проводити оцінку ступеня ущільнення земляного полотна у залежності від швидкості поширення пружних хвиль удару.

Проведено експериментальні дослідження визначення швидкості поширення пружних хвиль в однорідному земляному полотні із крупнозернистого піску та неоднорідного земляного полотна із крупнозернистого піску із прошарками глини по висоті поперечного перерізу земляного полотна. Встановлено, що швидкість розповсюдження пружних хвиль ударів у неоднорідному земляному полотні має нижче значення, аніж швидкість розповсюдження хвиль в однорідному земляному полотні. Встановлено, що швидкість поширення пружних хвиль удару в неущільненому однорідному земляному полотні у центральній частині призми земляного полотна становить 422 м/с, при проміжному ущільненні – 485 м/с та при максимальному пошаровому ущільненні земляного полотна – 597 м/с. Швидкість поширення хвиль до крайніх датчиків, що розміщені на краях призми земляного полотна становить 390 м/с та 386 м/с при розущільненому стані однорідного земляного полотна. При проміжному ущільненні – 458 м/с та 463 м/с відповідно і при максимально ущільненому стані – 588 м/с та 575 м/с відповідно.

Встановлено, що при неоднорідному земляному полотні швидкість поширення пружної хвилі до датчика, який встановлено під джерелом удару, у розущільненому стані становить 570 м/с, при проміжному ущільненні – 588 м/с і при максимально ущільненому – 648 м/с. Швидкість поширення хвиль до крайніх датчиків становить 553 м/с та 558 м/с при розущільненому стані земляного полотна. При проміжному ущільненні – 544 м/с та 534 м/с відповідно і при максимально ущільненому стані – 587 м/с та 605 м/с відповідно.

При динамічній інтерпретації, із використанням статистичного аналізу, встановлено характерні особливості розподілу прискорень у тілі насипу однорідного та неоднорідного земляного полотна в залежності від ступеня їх ущільнення, що дозволить проводити моніторинг стану земляного полотна у процесі експлуатації. Оскільки, встановлено, що від ступеня ущільнення ґрунту

безпосередньо залежать деформаційні характеристики земляного полотна та технічний стан доріг вцілому.

Запропоновано спосіб підвищення несучої здатності хворого земляного полотна залізничної колії шляхом застосування комбінованого розташування дренажних труб у вертикальному та горизонтальному напрямках у конструкції земляного полотна, що є засобом усунення фактору, який спричиняє його деформації та дефекти, а саме відведення води.

Проведено оцінку і дослідження напружено-деформованого стану земляного полотна підсиленого конструкцією трубчастих дренажів методом скінченних елементів. У результаті багатоваріантних розрахунків напружено-деформованого стану армованого земляного полотна встановлено, що конструкція трубчастих дренажів підвищує 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. Встановлено, що 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.

У результаті чого доведено ефективність застосування конструкцій трубчастих дренажів для підвищення несучої здатності перезволоженого земляного полотна залізничної колії при дії постійних та тимчасових навантажень. Встановлено, що з однієї сторони деформативність земляного полотна підвищується при застосуванні трубчастих дренажів, але це тільки у початковий період їх експлуатації, проте в подальшому, коли вони відводять воду з тіла земляного полотна, навпаки буде підвищуватися несуча здатність земляного полотна за рахунок покращення фізико-механічних властивостей ґрунтів.

Розроблено рекомендації з підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна комбінованим способом укладання конструкції з трубчастих дренажів у тіло насипу перезволоженого земляного полотна та спосіб завчасного попередження розвитку деформацій доріг шляхом моніторингу розробленим інерційним пристроєм.

Проведено техніко-економічний розрахунок впровадження запропонованого методу вимірювання ступеня щільності ґрунтів земляного полотна. Встановлено, що приведені витрати на реалізацію заходів із експлуатації запропонованим пристроєм, менші від існуючого на 67 тис. грн., а термін окупності при використанні запропонованого пристрою складає 5 місяців.

*Ключові слова:* неоднорідне земляне полотно, несуча здатність, трубчасті дренажні конструкції, метод скінченних елементів, пружна хвиля удару, інерційні дослідження, швидкість поширення хвиль, щільність, напруження, деформації.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

**- у монографії:**

1. Лучко Й. Й. Мости і труби з гофрованих металевих конструкцій та моніторинг ґрунтових основ доріг і споруд [текст]: [Монографія] За ред. д.т.н., проф. Й. Й. Лучка / Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук, І. Б. Кравець. – Львів: Світ, 2020. – 272 с. ISBN 978-966-914-172-9.

**- у виданнях включених до фахових видань, затверджених МОН України:**

2. Лучко Й. Й. Застосування георадіолокаційного методу на залізницях України / Й. Й. Лучко, І. Б. Кравець // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса.: ОДАБА, 2018. – Вип. 71. – С. 169 – 175.

3. Кравець І. Б. Георадіолокація як неруйнівний метод моніторингу земляного полотна / І. Б. Кравець, Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук // Зб. наук.праць. ДерждорНДІ «Дороги і мости». – Київ, 2019. – Вип. 19. – С. 119–139.

4. Лучко Й. Й. Методи оцінки стійкості земляного полотна / Й. Й. Лучко, І. Б. Кравець, В. В. Ковальчук // Вісник ЛНАУ. Архітектура і сільськогосподарське будівництво. Львів: ЛНАУ, 2019. – Вип. 20. – С. 14–19.

*- у виданнях включених до міжнародної наукометричної бази «Scopus»:*

5. Luchko J. Determining patterns in the stressed-deformed state of the railroad track subgrade reinforced with tubular drains. / J. Luchko, V. Kovalchuk, I. Kravets, O. Gajda // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkov.: 5/7 (107), 2020. – P. 6–13. doi:10.15587/1729-4061.2020.213525.

6. Kovalchuk V. Devising a procedure for assessing the subgrade compaction degree based on the propagation rate of elastic waves. / V. Kovalchuk, I. Kravets, O. Nabochenko, A. Onyshchenko, O. Fedorenko, A. Pentsak, O. Petrenko, N. Hembara // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkov.: 1/5 (109), 2021. – P. 6–15. doi:10.15587/1729-4061.2021.225520.

*- у патентах:*

7. Патент № 146420 МПК (2021.01) E02B 11/00 E01B 1/00. Спосіб підвищення несучої здатності дефектного земляного полотна автомобільних доріг та залізничної колії / Ковальчук В. В., Лучко Й. Й., Кравець І. Б.; заявник Кравець І. Б. – № u 2020 06783; заяв. 22. 10. 2020 р., опублік. 17. 02. 2021. Бюл. № 7.

8. Патент № 146647 МПК G01B 5/30 (2006.01). Пристрій оцінки технічного стану земляного полотна автомобільних доріг та залізничної колії / Ковальчук В. В., Кравець І. Б., Сисин М.П.; заявник Кравець І.Б. – № u2020 04720; заяв. 24.07.2020 р., опублік. 10. 03. 2021. Бюл. № 10.

*- які засвідчують апробацію матеріалів дисертації на наукових конференціях та семінарах:*

9. Лучко Й. Й. Моніторинг земляного полотна георадіолокаційним методом. / Й. Й. Лучко, І. Б. Кравець // Тези 78 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпро, 2018. – С. 221–223.

10. Лучко Й. Й. Застосування георадіолокаційного методу для визначення дефектів штучних споруд та земляного полотна на залізниці / Й. Й. Лучко, І. Б. Кравець // Тези міжнародної конференції: «Структурутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій». – Одеса: ОДАБА, 2018. – С. 92–95.

11. Лучко Й. Й. Перспективи застосування георадіолокаційного методу для визначення дефектів споруд та земляного полотна на автомобільних дорогах України / Й. Й. Лучко, І. Б. Кравець // Тези міжнародної конференції: «Актуальні проблеми ремонтів та утримання мостів». – Ужгород, 2018. – С. 45–48.

12. Лучко Й. Й. Підвищення стійкості земляного полотна. / Й. Й. Лучко, І. Б. Кравець, В. В. Ковальчук // Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села. Розробка інноваційних моделей екопоселень Прикарпаття та Карпат: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції. Дубляни. 15-19 травня 2019 р. – Львів: СПОЛОМ, 2019. – С. 85–87.

13. Кравець І. Б. Метод визначення щільності ґрунтів земляного полотна / І. Б. Кравець // Тези 81 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпро, 2021. – С. 184–185.

## ABSTRACT

*Kravets Ivan.* Methods for assessing and improving the load-bearing capacity of a non-uniform roadbed of a railway track – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for PhD. degree in specialty 192 “Construction and civil engineering”. – Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, 2021.

The dissertation is devoted to the decision of an actual problem of development of methods of estimation and increase of bearing capacity of the inhomogeneous earth cloth reinforced by tubular drainage designs, at action of static and dynamic loadings from vehicles. The theoretical side of the task was solved by improving analytical methods for assessing the bearing capacity of a non-uniform roadbed, taking into account a set of factors: physical and mechanical characteristics of subsoil soils and tubular drainage structures and loads from vehicles. Experimental and practical side - is solved by developing an inertial device for determining the bearing capacity of inhomogeneous earth and a way to increase its bearing capacity.

The technical condition of the railway track and the problems of ensuring its strength under the action of floodwaters and waterlogging in sections of the track during operation are analyzed. It is established that the length of the roadbed prone to deformation is 870.8 km (4%), which leads to a decrease in the capacity and carrying capacity of railways. Therefore, the development of methods to increase the bearing capacity of a non-uniform roadbed is extremely necessary and timely.

From the analysis of research works, it is established that researches that are directed on the decision of a problem of development of methods of definition and increase of bearing capacity of a non-uniform roadbed in operating conditions. They are actual and correspond to the interests of transport branch and National transport strategy of Ukraine and Strategy of Ukrzaliznytsia, development of effective methods to increase the bearing capacity of a non-uniform roadbed will ensure the safety of trains.



The georadar studies of problem areas of the railway track have been carried out, on the basis of which the distribution of characteristic signs of a non-uniform roadbed in the vertical plane and the boundaries of their location have been found.

A mathematical model for estimating the bearing capacity of a non-uniform roadbed reinforced with tubular drainage structures has been developed. The stress-strain state of a non-uniform roadbed is estimated taking into account the physical and mechanical parameters of soils, tubular drainage structures and dynamic loads from the rolling stock of railway transport.

It is established that an important characteristic of soils is their density. The degree of soil compaction directly affects the deformation characteristics of the subsoil. With increasing density, the characteristics of shear resistance increase, which leads to stable operation of the subsoil under the vibrodynamic action of dynamic loading.

A method for calculating the dynamic loads from vehicles with a non-uniform roadbed, which allows to take into account the influence of geometric irregularities on the rail track on the bearing capacity of the subsoil. When calculating the distribution of dynamic oscillations in the body of a non-uniform roadbed reinforced with tubular drainage structures, the physical characteristics of different soil layers, drainage structures and their geometric dimensions are taken into account. Data on the distribution of dynamic loads on the non-uniform roadbed, which are then used to assess the bearing capacity of the subsoil reinforced with tubular drainages.

A method for laboratory determination of the degree of compaction of the subsoil based on inertial measurements of accelerations in the soils of the non-uniform roadbed has been developed. Which allows you to assess the degree of compaction of the ground depending on the speed of propagation of elastic shock waves.

Experimental researches of determination of speed of propagation of elastic waves in a homogeneous earth cloth from coarse-grained sand and inhomogeneous earth cloth from coarse-grained sand with layers of clay on height of cross section of an earth cloth are carried out. It is established that the speed of propagation of elastic

shock waves in an inhomogeneous ground is lower than the speed of propagation of waves in a uniform roadbed. It is established that the speed of propagation of elastic shock waves in the uncompacted a uniform roadbed in the central part of the prism of the ground is 422 m/s, with intermediate compaction – 485 m/s and with maximum layer-by-layer compaction of the ground – 597 m/s. The speed of wave propagation to the extreme sensors located on the edges of the prism of the ground is 390 m/s and 386 m/s in the dissolved state of a homogeneous ground. With intermediate compaction – 458 m/s and 463 m/s, respectively, and with the most compacted state – 588 m/s and 575 m/s, respectively.

It is established that with an inhomogeneous ground the speed of propagation of the elastic wave to the sensor, which is installed under the source of impact, in the decompressed state is 570 m/s, with intermediate compaction – 588 m/s and with the most compacted – 648 m/s. The speed of wave propagation to the extreme sensors is 553 m/s and 558 m/s when the ground is loose. With intermediate compaction – 544 m/s and 534 m/s, respectively, and with the most compacted state – 587 m/s and 605 m/s, respectively.

During the dynamic interpretation, using statistical analysis, the characteristic features of the distribution of accelerations in the body of the embankment of the uniform and non-uniform roadbed depending on the degree of their compaction, which will monitor the condition of the subsoil during operation. Because, it is established that the degree of soil compaction directly affects the deformation characteristics of the ground and the technical condition of roads in general.

A method is proposed to increase the bearing capacity of the diseased railway bed by applying a combined arrangement of drainage pipes in vertical and horizontal directions in the construction of the roadway, which is a means of eliminating the factor that causes its deformation and defects, namely water drainage.

An assessment and study of the stress-strain state of the subsoil reinforced by the design of tubular drainages by the finite element method. As a result of multivariate calculations of the stress-strain state of the reinforced earth, it was found that the design of tubular drainages increases the deformability of the earth by

14.93% when installing one pipe, 13.63% – two, and 7.79% – three drainage pipes relative to the calculation results. of a ground cloth without the device of tubular drainages. The stresses that occur in the body of the ground without tubular drainage are higher than the stresses that occur in the body of the ground in which the drainage pipes are located. It is established that the voltage difference is up to 3.65% when installing one pipe, 3.12% – two, and 2.92% – three drainage pipes, which proves the effectiveness of tubular drainage with a diameter of 600 mm to strengthen the wet ground of the railway track.

As a result, the effectiveness of the use of tubular drainage structures to increase the bearing capacity of the wet ground of the railway track under constant and temporary loads is proved. It is established that on the one hand the deformability of the ground increases with the use of tubular drainage, but only in the initial period of their operation, but later, when they drain water from the body of the ground, on the contrary will increase the bearing capacity of the ground by improving physical and mechanical soil properties.

Recommendations for increasing the bearing capacity of a non-uniform roadbed by a combined method of laying a structure of tubular drainage in the body of the embankment of wet soil and a method of early prevention of road deformations by monitoring the developed inertial device.

The technical and economic calculation of introduction of the offered method of measurement of degree of density of soils of a ground cloth is carried out. It is established that the costs for the implementation of measures for the operation of the proposed device are less than the existing 67 thousand UAH, and the payback period when using the proposed device is 5 months.

Keywords: a non-uniform roadbed, bearing capacity, tubular drainage structures, finite element method, elastic shock wave, inertial investigated