

Дніпровський національний університет залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна
Міністерство освіти і науки України

Дніпровський національний університет залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

КРАВЕЦЬ ІВАН БОГДАНОВИЧ

УДК 625.123:625.745.2

ДИСЕРТАЦІЯ

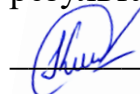
**МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ
НЕОДНОРІДНОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ**

192 – Будівництво та цивільна інженерія

19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 І. Б. Кравець

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
Лучко Йосип Йосипович

Дніпро – 2021

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.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ABSTRACT.....	9
ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА НА ЗАЛІЗНИЦЯХ УКРАЇНИ ТА КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОЦІНКИ ЙОГО НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ	22
1.1. Аналіз технічного стану земляного полотна на залізницях України ...	22
1.2. Аналіз характерних дефектів, деформацій та пошкоджень земляного полотна в експлуатації	27
1.3. Аналіз перспективних методів та засобів діагностики земляного полотна	31
1.3.1. Методи діагностики земляного полотна	31
1.3.2. Георадіолокаційний метод.....	35
1.3.3. Метод на основі імпульсного відклику	41
1.4. Методи підвищення несучої здатності дефектного земляного полотна	46
1.5. Експериментальні дослідження неоднорідного земляного полотна залізничної колії на Львівській залізниці	53
1.6. Теоретичні передумови, мета і задачі досліджень	58
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ОЦІНКИ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ НЕОДНОРІДНОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ПРИ ДІЇ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВІД РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ	61
2.1. Натурні експериментальні вимірювання прогинів рейок під дією рухомого складу залізниць	61
2.2. Методика проведення експериментальних вимірювань	63
2.3. Результати натурних експериментальних вимірювань земляного полотна	65
2.4. Методика визначення навантажень на основну площадку земляного полотна під дією рухомого складу	68

2.4.1 Розрахунок вертикальних сил, що виникають при русі поїздів....	68
2.5. Методика розрахунку динамічних навантажень на земляне полотно	72
2.5.1. Розрахунок ударно-вібраційних навантажень рухомого складу.....	72
2.6. Практичне застосування методики розрахунку динамічних навантажень на земляне полотно	77
2.7. Задання геометричних характеристик поперечного профілю та властивості ґрунтів земляного полотна	82
2.8. Визначення характеристик міцності ґрунтів земляного полотна із врахуванням вібродинамічної дії рухомого складу	84
2.9. Висновки до розділу 2.....	88
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕОДНОРІДНОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА	90
3.1. Розробка методу для лабораторного визначення ступеня ущільнення земляного полотна	90
3.2. Методика проведення лабораторних досліджень щільності ґрунтів неоднорідного земляного полотна	93
3.2.1. Програма експериментальних досліджень.....	93
3.2.2. Результати визначення швидкості та часу проходження хвилі удару.....	94
3.3. Висновки до розділу 3.....	101
РОЗДІЛ 4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ІЗ ПІДВИЩЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ПРОБЛЕМНОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ЙОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	103
4.1. Влаштування дренажних конструкцій у місцях хворого земляного полотна	103
4.1.1. Спосіб армування земляного полотна трубчастими дренажами.....	103

4.2. Оцінка напружено-деформованого стану земляного полотна армованого трубчастими дренажами	106
4.3. Результати багатоваріантних розрахунків напружено-деформованого стану армованого земляного полотна.....	110
4.4. Рекомендації із армування земляного полотна трубчастими дренажами	118
4.5. Економічна ефективність використання запропонованого пристрою для вимірювання ступеня ущільнення ґрунтів земляного полотна .	119
4.5.1. Розрахунок експлуатаційних витрат на проведення вимірювань ступеня ущільнення ґрунтів земляного полотна	119
4.5.2. Оцінка економічної ефективності від використання запропонованого пристрою для оцінки ступеня щільності земляного полотна.....	122
4.6 Висновки до розділу 4.....	125
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	127
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	130
ДОДАТОК А. РОЗРАХУНОК РОЗПОДІЛУ ВЕРТИКАЛЬНИХ СИЛ ДІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ НА РЕЙКИ	147
ДОДАТОК Б. ПАТЕНТИ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ.....	151
ДОДАТОК В. АКТИ ІЗ ПРАКТИЧНОГО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	154
ДОДАТОК Г. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	157

Вступ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Земляне полотно залізниць України було споруджено понад століття тому і проектувалось під інші навантаження та швидкості руху поїздів, у порівнянні із сьгоднішніми експлуатаційними умовами. Земляному полотну приділяється мало уваги, виконуються лише часткові роботи з укріплення та відновлення несучої здатності. Слід зазначити, що земляне полотно є основним елементом залізничної колії від якого безпосередньо залежить її геометрія, стабільна робота та безпечна експлуатація колії.

На сьгоднішній день є 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 з обмеженнями швидкості, зменшення пропускної спроможності (виникнення бар'єрних місць), як наслідок 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.

Часто при виконанні планових ремонтно-колійних робіт, відбувається пошкодження основної площадки земляного полотна. Далі у процесі відновлення контуру зливної призми з одночасним розрівнюванням старого щєбня відбувається його перемішування з ґрунтом основної площадки в результаті цього виникають неоднорідності, що веде до проблем із забезпеченням несучої здатності. У результаті підвищеної динамічної дії на неоднорідні ґрунти земляного полотна відбувається збільшення показника пластичних деформацій ґрунтів, що призводить до більш швидкого розладнання колії в цілому та обмеження швидкостей руху.

Очевидно, що дослідження, спрямовані на вирішення проблеми розробки методів визначення та підвищення несучої здатності неоднорідного земляного

полотна в умовах експлуатації, є актуальними і відповідають інтересам транспортної галузі, Національній транспортній стратегії України та Стратегії АТ «Укрзалізниця» на 2019–2023 роки.

Тому розробка методу визначення ступеня щільності ґрунтів неоднорідного земляного полотна дозволить попереджати розвиток наднормативних деформацій доріг в умовах експлуатації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у відповідності напрямку «Стратегії АТ «Укрзалізниця» на період 2019–2023 роки».

Тема дисертації відповідає актуальним напрямкам щодо управління експлуатаційною надійністю і довговічністю споруд та конструкцій, зокрема Постанові Кабінету Міністрів України від 5 травня 1997 р., № 409 «Про забезпечення надійності та безпечної експлуатації будівель, споруд та інженерних мереж», а також напрямкам і завданням державної науково-технічної програми «Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року» (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30. 05. 2018 р., № 430-р).

Дисертаційні дослідження проведенні в рамках науково-дослідної теми: «Наукове обґрунтування інноваційних технологій відновлення об'єктів транспортної інфраструктури України» (№ ДР 0119U001139).

Метою роботи є розробка методів оцінювання та підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна, яке зазнає дії статичних та динамічних навантажень від транспортних засобів і впливів навколишнього середовища. Для досягнення зазначеної мети необхідно розв'язати наступні **завдання**:

- провести аналіз науково-дослідних робіт стосовно методів оцінки та підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна;
- провести експериментальну оцінку технічного стану неоднорідного земляного полотна залізничної колії георадіолокаційним методом;
- удосконалити методику та провести визначення несучої здатності неоднорідного земляного полотна із врахуванням величин статичного та

динамічного навантажень від транспортних засобів;

– розробити пристрій для експериментальних досліджень ступеня ущільнення земляного полотна та провести експериментальні дослідження ступеня ущільнення однорідного та неоднорідного земляного полотна у лабораторних умовах і в умовах експлуатації;

– провести чисельний розрахунок напружено-деформованого стану армованого земляного полотна з різною комбінацією розташування трубчастих дренажів;

– розробити рекомендації із підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна в умовах експлуатації.

Об'єкт досліджень – неоднорідне земляне полотно.

Предмет досліджень – методи оцінювання та підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна, при дії статичних та динамічних навантажень від транспортних засобів і впливів навколишнього середовища.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань у дисертаційній роботі використано: методи аналізу та синтезу, метод скінченних елементів із використанням програмного комплексу Plaxis 3D.

Теоретичні розрахунки, експериментальні вимірювання і статистичну обробку даних виконано з використанням прикладного програмного забезпечення Matlab.

Для розробки пристрою із визначення ступеня щільності ґрунтів земляного полотна використано сучасні високочастотні мікроконтролери типу L-Card марки E14-140M, трьохосьові акселерометри ADXL 335.

При обробці результатів експериментальних досліджень щільності ґрунтів земляного полотна використано методи цифрової обробки сигналів та програмне забезпечення L-Graf.

Отримані в дисертації основні наукові положення, висновки й рекомендації обґрунтовані та достовірні, оскільки експериментальні дослідження достовірно поставлені та кваліфіковано виконані за участю сучасного лабораторного обладнання науково-дослідного інституту ризиків та

безпеки на транспорті Львівської філії Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

– удосконалено аналітичну модель оцінки напружено-деформованого стану неоднорідного земляного полотна, яка на відміну від існуючих методик дозволяє враховувати фізико-механічні властивості ґрунтів і дію динамічного навантаження від рухомого складу;

– вперше розроблено пристрій для проведення інерційних вимірювань ступеня ущільнення ґрунтів неоднорідного земляного полотна;

– вперше запропоновано спосіб підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна із використанням комбінованого розташування перфорованих труб;

– удосконалено методику моніторингу розвитку деформативності неоднорідного земляного полотна в умовах експлуатації із використанням інерційних вимірювань прискорень в ґрунтах земляного полотна.

Практичне значення отриманих результатів:

– методи та моделі, розроблені у рамках дисертаційної роботи, були використані при виконанні науково-дослідних робіт на кафедрі транспортна інфраструктура ДНУЗТ («Наукове обґрунтування інноваційних технологій відновлення об'єктів транспортної інфраструктури України» (Номер державної реєстрації: 0119U001139));

– розроблений метод із підвищення несучої здатності дефектного земляного полотна може бути використаний при ремонті та відновленні несучої здатності хворого земляного полотна, експлуатуючими організаціями дистанції колії та колійно машинними станціями залізниці;

– інерційну систему для визначення ступеня щільності ґрунтів земляного полотна рекомендується застосувати при натурних дослідженнях земляного полотна залізничної колії;

– більшість теоретичних положень, викладених у дисертаційній роботі, впроваджено у навчальний процес Львівської філії ДНУЗТ під час викладання

дисциплін «Механіка ґрунтів, основи та фундаменти» та «Залізнична колія»;

– розроблена методика оцінки напружено-деформованого стану хворого земляного полотна та інерційний метод оцінки його несучої здатності мали практичне впровадження при оцінці несучої здатності хворого земляного полотна на перегоні Підбірці-Борщовичі Підзамчівської дистанції колії Львівської залізниці.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення дисертаційної роботи, що виносяться на захист, сформульовані автором особисто. Формулювання мети і задач дисертації, планування експериментів та обговорення результатів виконано разом із науковим керівником.

У публікаціях, які відображають основні результати дисертації та написані в співавторстві, здобувачеві належать: у [25, 123] – проаналізовано світові дані науково-технічних джерел в області георадіолокаційних досліджень та проведено георадарні дослідження дефектного земляного полотна; у [29, 125] – виконано аналіз літератури та описано приклади застосування георадіолокаційних досліджень при дослідженні земляного полотна; у [46, 124] – проаналізував стан земляного полотна на залізницях України, вимоги до нього та методи моніторингу, також приведений світовий та вітчизняний досвід застосування георадіолокаційного методу для неруйнівного контролю за станом земляного полотна, баластного шару та штучних споруд; у [76] – навів існуючі методи та способи підвищення несучої здатності земляного полотна; у [77] – виконав георадіолокаційні дослідження неоднорідного земляного полотна ділянки залізничної колії та провів чисельний розрахунок напружено-деформованого стану земляного полотна підсиленого трубчастими дренажами; у [102] – запропонував пристрій оцінки технічного стану земляного полотна автомобільних доріг та залізничної колії, виконав його опис та подання; у [120] – запропонував спосіб та пристрій визначення ступеня щільності ґрунтів земляного полотна та провів лабораторні дослідження швидкостей поширення пружних хвиль ударів в однорідному та неоднорідному земляному полотні у залежності від ступеню ущільнення ґрунту; у [122] – запропонував спосіб

підсилення земляного полотна залізничної колії та автомобільних доріг також виконав його опис та подання. Праця [121] опублікована одноосібно.

Апробація дисертаційної роботи. Основні положення і результати досліджень представлено на міжнародних, всеукраїнських і регіональних конференціях та семінарах: 78-й та 81-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», (ДНУЗТ) (м. Дніпро, 17–18 травня 2018 р. та 22–23 квітня 2021 р.); Міжнародній конференції «Структурування, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій», (ОДАБА) (м. Одеса, 11–13 квітня 2018 р.); Міжнародній конференції «Актуальні проблеми ремонтів та утримання мостів» (УКРАВТОДОР, ДП «ДерждорНДІ») (м. Ужгород, 20–21 червня 2018 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села. Розробка інноваційних моделей екопоселень Прикарпаття та Карпат» (ЛНАУ) (м. Дубляни, 15-17 травня 2019 р.).

У повному обсязі дисертація доповідалася на: розширеному засіданні кафедри «Транспортна інфраструктура» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна 29.06.2021 р.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано в 13 наукових працях, з котрих 5 у фахових спеціалізованих виданнях України, 2 з яких у виданнях, що індексуються у наукометричній базі Scopus, 1 монографія (розділи), 2 патенти України на корисну модель та 5 тез доповідей у збірниках наукових конференцій, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та чотирьох додатків.

Основний текст роботи викладено на 108 сторінках. Дисертація містить усього 72 рисунки та 18 таблиць. Список літератури із 132 найменувань викладено на 17 сторінках та 4 додатки на 13 сторінках. Повний обсяг дисертації 159 сторінок. Дисертацію оформлено в одному томі.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА НА ЗАЛІЗНИЦЯХ УКРАЇНИ ТА КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОЦІНКИ ЙОГО НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ

1.1. Аналіз технічного стану земляного полотна залізниць України

Однією із основних проблем інфраструктури згідно Стратегії АТ «Укрзалізниця» на період 2019–2023 роки [1] є обмежена пропускна здатність окремих ділянок колії, відсутність можливості підвищення швидкостей руху пасажирських поїздів при суміщеному русі. Також зазначено, що значна частина колійної інфраструктури потребує різних видів ремонту (понад 2000 км) та має багато обмежень швидкості руху для поїздів (близько 350), що збільшує експлуатаційні витрати та зменшує пропускну і провізну спроможність дільниць. Одним із обмежуючих критеріїв збільшення швидкості руху є незадовільний технічний стан земляного полотна залізничної колії. Воно являє собою інженерну споруду, яка виконана з ґрунту, розташовується на ґрунтовій основі і виконує роль фундаменту для верхньої будови колії (рис. 1.1). Земляне полотно, як споруда, може бути виконано у вигляді насипів, виїмок, напіввиїмок, напівнасипів, що розташовані у смузі відводу залізничної колії [2].

Земляне полотно призначається, з одного боку, для безпосереднього укладання на ньому верхньої будови колії, а з іншого, для забезпечення безпечного і безупинного руху поїздів встановленої маси з встановленою максимальною швидкістю руху та із нормативним навантаженням на вісь рухомого складу. Щоб забезпечити всі ці умови земляне полотно має цілий ряд пристроїв у вигляді водовідвідних споруд різного роду, укріплень укосів, підпірних стінок, утримуючих основу земляного полотна на косогорах, захистів від дії снігу, дощу, вітру і т. п.

До земляного полотна ставиться ряд вимог, а саме: стійким; ремонтпридатним; під час експлуатації ефективно чинити опір різним впливам, не руйнуючись і не змінюючи своєї геометричної форми [3].



Рисунок 1.1 – Земляне полотно залізничної колії (Фото Facebook «Укрзалізниця»)

За даними АТ «Укрзалізниця» загальна протяжність земляного полотна на залізницях України становить 21872,2 км, у тому числі протяжність земляного полотна, схильного до деформацій складає 870,8 км (4 %) (рис. 1.2). Це є негативним фактором оскільки такі місця є бар'єрними, тобто на них діють обмеження швидкості, що в свою чергу впливає на пропускну і провізну спроможність залізниць.

Земляне полотно є основою транспортних магістралей. Крім постійного та тимчасового навантаження від транспортних засобів на земляне полотно діють природньо-кліматичні впливи (паводки, опади), які спричиняють зменшення, або втрату його несучої здатності, що негативно впливає на забезпечення безпеки руху. Одним із прикладів є повені у 2020 р. в Західних регіонах України відбулося руйнування та підмивання насипів земляного полотна протяжністю 150 м (рис. 1.3, *a*). У результаті цього було призупинено рух поїздів для здійснення міжнародних вантажних перевезень з країнами ЄС [4].

Крім цього фіксувалися зсуви ґрунту через переміщення ґрунтових вод у результаті невизначених змін геології гірських порід (рис. 3, *b*). Унаслідок природної стихії на вказаному місці, що розташоване на косогорі, було деформовано 30 м колії [5].

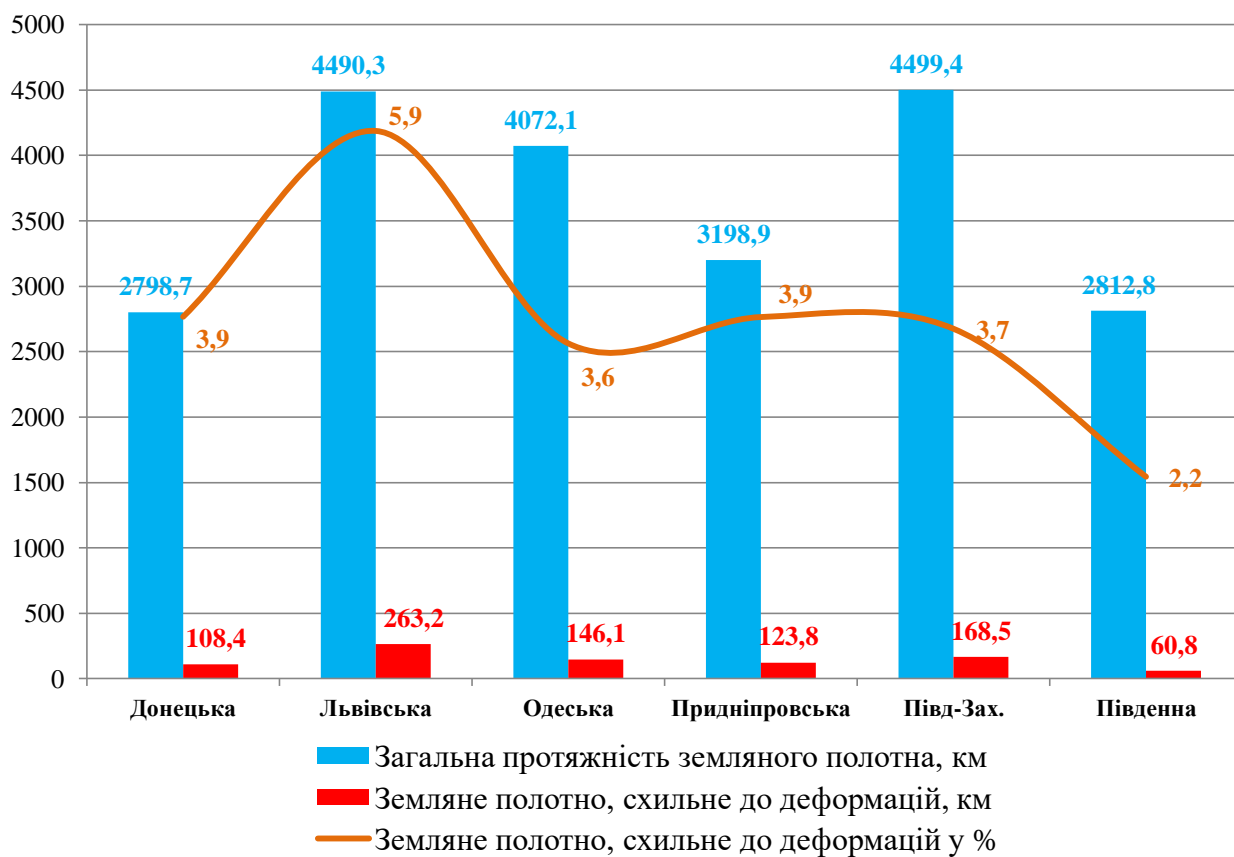


Рисунок 1.2 – Діаграма розподілу протяжності земляного полотна на залізницях України.

Такі руйнування є притаманні для транспортної інфраструктури у всьому світі, що відображено у роботах [6, 7, 8 та ін.] та є часто предметом дискусії інженерів-будівельників на наукових конференціях, круглих столах та ін. [9].



a

b

Рисунок 1.3 – Руйнування та розмив насипу залізничної колії під час паводків: *a* – на 224-й кілометрі перегону Заболотів – Видинів [4]; *b* – на 124 км ділянці Львів – Самбір – Ужгород [5]

Контури земляного полотна повинні бути сплановані так, щоб вода яка потрапляє на нього могла вільно потрапляти до спеціальних водовідвідних пристроїв чи всторону. Але часто при виконанні планових ремонтно-колійних робіт, відбувається пошкодження основної площадки земляного полотна. Далі у процесі відновлення контуру з одночасним розрівнюванням старого щебня відбувається перемішування з ґрунтом основної площадки в результаті цього виникають неоднорідності, що веде до проблем із забезпеченням несучої здатності.

Однією із важливих характеристик земляного полотна є його несуча здатність, яка залежить від фізико-механічних параметрів ґрунтів земляного полотна. Оскільки якщо сили, що виникають від поїзного навантаження не гасяться в елементах верхньої будови колії та ґрунтових шарах нижньої будови, то вважається, що несуча здатність земляного полотна є не забезпеченою, і як наслідок виникає потреба у відновленні земляного полотна.

Залізничні організації розвинених країн стикнулися з проблемами утримання та реконструкції колії, які є наслідком зростання осьових навантажень та швидкостей руху, через причину неналежного дослідження та підсилення земляного полотна, і обґрунтування несучої здатності відповідно.

З аналізу технічної літератури [10–15] 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 відносно слабких елементах баластному шарі та земляному полотні виникають граничні значення напружень. Відбувається проникнення ґрунту земляного полотна в баластний шар, внаслідок чого несуча здатність земляного полотна суттєво знижується.

Іншим важливим аспектом проблеми забезпечення несучої здатності земляного полотна є збільшення швидкостей руху через яке підвищується динамічний вплив на земляне полотно. У результаті підвищеної динамічної дії на неоднорідні ґрунти земляного полотна відбувається збільшення показника

пластичних деформацій ґрунтів, що призводить до більш швидкого розладнання колії в цілому та обмеження швидкостей руху.

У праці [10] автори описують дослідження роботи залізничної колії під вібродинамічним впливом різного за величиною поїзного навантаження, у якому зазначають, що інтенсивність руху поїздів в поєднанні з кліматичними та експлуатаційними факторами, без надійної основи можуть привести до значних деформацій земляного полотна та порушення геометрії залізничної колії.

Часті відмови земляного полотна є проблемою при організації руху і на їх ліквідацію витрачаються великі обсяги матеріально-технічних засобів. Крім цього, зупинення руху поїздів та автотранспорту наносить значних економічних втрат для держави, особливо на транскордонних ділянках.

Спеціальними структурними підрозділами залізниць, для зменшення кількості таких відмов передбачено різні відновлювальні заходи, але у більшості випадків вони допомагають лише певний час, згодом відмови знову повторюються у тих самих місцях. Все це зумовлено тим, що земляне полотно знаходиться під постійним впливом кліматичних та експлуатаційних чинників, дія яких порушує його геометричні розміри. Внаслідок цього виникає необхідність реконструкції земляного полотна (відсипання контрбанкетів, влаштування прижимних берм, влаштування додаткових пристроїв водовідводу, дренажів тощо), що дозволяє локалізувати значну частину дефектів і деформацій. Проте, зустрічаються так звані «хворі» ділянки, які, незважаючи на проведені заходи, продовжують деформуватися.

Щорічно на капітальний ремонт галузевою програмою підвищення експлуатаційної надійності земляного полотна залізниць передбачається виділення обсягів фінансування, що наведено у табл. 1.1. Проте, оздоровчі заходи лише підтримують земляне полотно в більш-менш стійкому стані при існуючих швидкостях та навантаженні на вісь рухомого складу, а з їх зростанням протяжність хворого земляного полотна може зрости у кілька разів. Дане припущення підтверджується дослідженням [11] де автор наголошує на тому, що в умовах збільшення інтенсивності перевезень та підвищення осьових

навантажень кількість деформованих ділянок земляного полотна неодмінно збільшується.

Таблиця 1.1

Обсяги фінансування на підвищення експлуатаційної надійності земляного полотна залізниць України

№	Орієнтовні обсяги фінансування	Од. виміру	План, тис.грн.
1	Капремонту земляного полотна	тис.грн.	1920458
2	Оснащення геобаз	тис.грн.	5400
3	Оснащення КМС по земполотну	тис.грн.	114529
Всього		тис.грн.	2040387

У дисертаційній роботі для підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна на залізничних та автомобільних дорогах України пропонується застосування дренажних конструкцій, а для моніторингу його стану метод георадіолокації та метод на основі імпульсного відклику.

Слід зазначити, що впровадження економічно доцільних методів моніторингу та конструкцій для підсилення земляного полотна, що експлуатується забезпечить ефективне капіталовкладення, яке дозволить, у межах існуючої інфраструктури та обмежених ресурсів, збільшити термін служби земляного полотна, а це, у свою чергу, – економію коштів АТ Укрзалізниця на ремонт та реконструкцію інфраструктури.

Отже, розробка і впровадження нових технологій ремонту та моніторингу існуючого неоднорідного земляного полотна на залізницях України, є актуальною на сьогоднішній день проблемою і потребує негайного вирішення.

1.2. Аналіз характерних дефектів, деформацій та пошкоджень земляного полотна в експлуатації

З вітчизняного та закордонного досвіду експлуатації земляного полотна [12–21] бачимо, що з часом в ньому утворюються (розвиваються) різні дефекти та пошкодження. Деформації земляного полотна і верхньої будови колії в значній мірі перешкоджають швидкісному руху поїздів та збільшують експлуатаційні витрати. На дільницях зі швидкісним рухом поїздів

Укрзалізницею встановлені додаткові вимоги по стану та утриманню колії. Основна особливість в утриманні колії, на якій реалізуються такі швидкості, полягає в підвищених вимогах до забезпечення плавності рейкових ниток [12].

Земляне полотно і його окремі частини знаходяться під дією власної ваги, рухомого поїзного навантаження, природньо-кліматичних чинників (температури, вітру, води, опадів та інші), внаслідок чого відбувається порушення стану ґрунту. Це порушення пов'язано з деформаціями і переміщеннями як частинок ґрунту, так і вологи всередині і на поверхні земляного полотна і його окремих частин. Зокрема, при різних значеннях температури в ґрунті земляного полотна наявна волога може бути у різних агрегатних станах, що веде до зміни об'єму та переміщенню частинок ґрунту (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Деформації і переміщення частинок ґрунту внаслідок дії вологи всередині земляного полотна

Як відомо деформації і переміщення в ґрунті можуть бути як пружними так і не пружними (залишковими). Деформації виникають і в правильно запроектованому та побудованому земляному полотні, але тільки вони в цьому випадку невеликі і не розвиваються до розмірів, що призводять до зниження міцності або стійкості земляного полотна. Якщо земляне полотно запроектоване та побудоване з допущенням помилок, то в такому земляному полотні навіть малі деформації і переміщення ґрунту та води можуть з часом досягти такої величини, що відбудеться втрата стійкості та міцності внаслідок виникнення напружень більших за несучу здатність ґрунтів з яких зведене земляне полотно (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Втрата стійкості земляного полотна

Як зазначає, професор Г. М. Шахунянц [22], деформації раніше “хвороб” існувати не можуть, але вони можуть розвиватись разом, а не тільки закінчувати собою “хворобу”. І навіть якщо відбулася деформація це не завжди кінець, це може бути і причиною зародження “хвороб” наступних ділянок земляного полотна. Для того, щоб зрозуміти механізм внутрішнього процесу у земляному полотні, а також правильно і вчасно зупинити руйнування потрібно чітко встановити причину деформації.

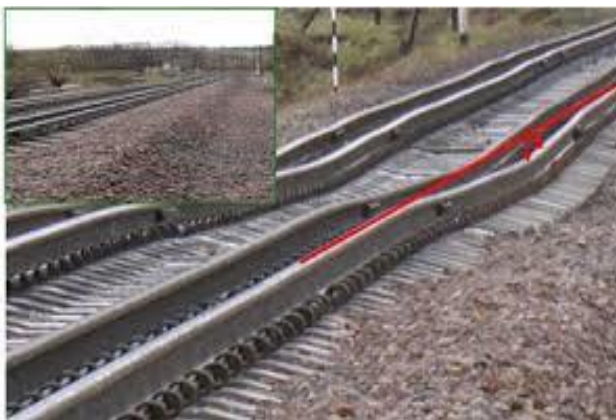
Деформації земляного полотна легко простежити простим натурним оглядом земляного полотна, ознаками є тріщини на схилах, поздовжні тріщини на узбіччях, обвалення укосів, розмиви та інше. А от хворі місця земляного полотна рідко вдається простежити натурним оглядом земляного полотна, і тому вони довгий час можуть залишатися прихованими, оскільки їм передують прихований розвиток, де руйнуються структурні зв'язки і знижується міцність ґрунтів, які накопичуючись переростають в деформацію. Для їх виявлення потрібне детальне вивчення перерізу наприклад зондування, шурфування, буріння, георадіолокація та інші відомі способи дослідження ґрунтів.

Одними з найпоширеніших дефектів, що призводять до виникнення деформацій є дефекти основної площадки земляного полотна, що проявляються у вигляді баластних заглиблень. Дані дефекти є небезпечними тому, що їх

наявність свідчить про те, що земляне полотно зазнає перезволоження та розуцільнення ґрунтів і як наслідок виникає порушення геометрії рейкової колії, можлива втрата стійкості та зниження потрібної міцності, що доведено дослідженнями [23].

Важливою характеристикою ґрунтів є їх щільність. Ступінь ущільнення ґрунту безпосередньо впливає на деформаційні характеристики земляного полотна. Чим вище щільність ґрунту, тим менші деформації земляного полотна. Зі збільшенням щільності зростають і характеристики опору зрушенню. У земляному полотні при вібродинамічній дії рухомого навантаження постійно відбуваються деформації, і важливо, щоб були пружними. У випадку виникнення залишкових деформацій можуть утворюватися заглиблення на основній площадці земляного полотна. У даних заглибленнях накопичується волога, яка призводить до розм'якшення глинистих ґрунтів та швидкого росту деформацій і утворення пошкоджень земляного полотна.

Розуцільнення під час експлуатації або неякісне ущільнення ґрунтів при будівництві земляного полотна призводить до зниження несучої здатності колії (доріг), і може призвести до втрати міцності та стійкості ділянки взагалі. Приклади деформативності колії та автомобільної дороги через неякісне земляне полотно наведено на рис. 1.6.



a



b

Рисунок 1.6 – Наслідки розуцільнення ґрунтів земляного полотна: *a* – залізничної колії; *b* – автомобільної дороги [24]

Для попередження раптових деформацій важливим завданням є своєчасне виявлення потенційно небезпечних для руху поїздів ділянок земляного полотна. Для цього необхідно здійснювати суцільну діагностику всіх насипів, що експлуатуються тривалий термін із залученням сучасних методів і технічних засобів.

У випадку утворення неоднорідного земляного полотна виникає проблема передчасного розладнання геометрії залізничної колії чи автомобільної дороги у вигляді накопичення вертикальних та горизонтальних нерівностей. Це впливає на подальший термін служби елементів доріг та передчасного їх виходу із експлуатації. Тому питання моніторингу та контролю якісного ущільнення неоднорідного земляного полотна є актуальним і потребує розробки експериментальної та теоретичної методик оцінки ступеня його ущільнення упродовж життєвого циклу роботи залізничної колії.

1.3. Аналіз перспективних методів та засобів діагностики земляного полотна

1.3.1. Методи діагностики земляного полотна

Найбільш поширені способи при обстеженні земляного полотна, які дають змогу визначити його внутрішню будову, властивості та склад ґрунтів, причини деформування, засновані на геологорозвідувальному бурінні та шурфування. Але у зв'язку з їх трудомісткістю, складністю виконання та високою вартістю проведення, вони виконуються працівниками інженерно-геологічних баз та колієобстежувальних станцій по земляному полотну, як правило, тільки на ділянках, що вже знаходяться на обліку, як ті, що деформуються або нестійкі. А в умовах швидкісного руху, до якого прагне Укрзалізниця, час між виявленням та взяттям на облік дефектних місць є загрозою безпеці руху поїздів. Це ще раз доводить, що своєчасний та суцільний моніторинг земляного полотна є важливим.

Крім традиційних способів вивчення геологічної будови земляного полотна впродовж останніх років все більшого значення набувають різні

геофізичні методи, які мають ряд переваг над традиційними. До геофізичних методів діагностики належать: електрометричний метод; електродинамічне зондування; сейсмічний метод; вібраційний метод; радіолокаційний метод [25].

Суть електрометричного методу полягає у розповсюдженні електричного струму, через досліджуваний об'єкт, від одного електроду до іншого (рис. 1.7). Цим методом вирішуються задачі: профілювання літологічного складу та стану ґрунту; визначення величини усадки і конфігурації підшови насипу, спорудженого на слабкій основі або мерзлих ґрунтах, визначення їх товщини і глибини залягання; пошук закарстованих зон і відшарування в ґрунтах основи насипу; виявлення неоднорідностей в тілі насипу (гнізда, лінзи льоду, мерзлі породи); визначення товщини баластного шару та баластних шлейфів [14].

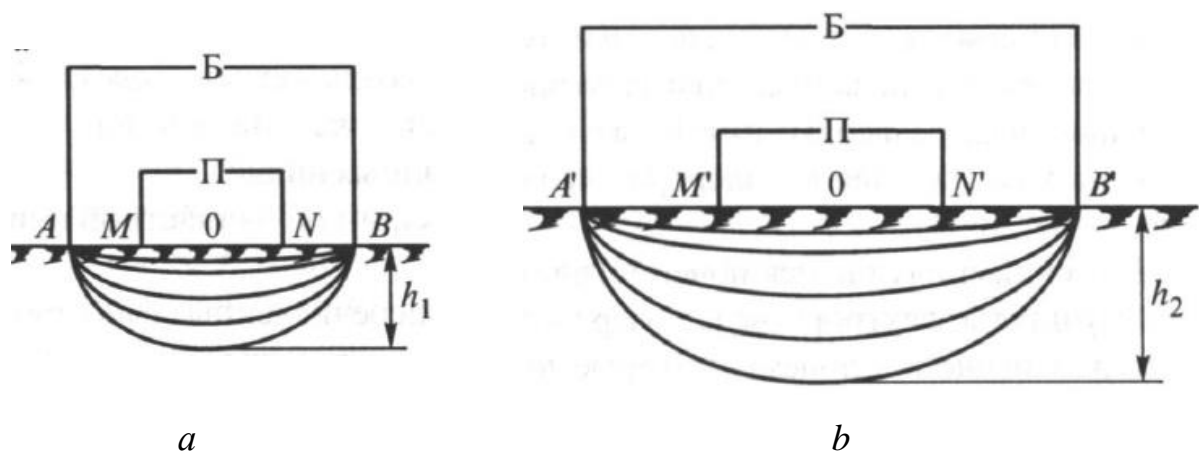


Рисунок 1.7 – Схема вимірювань електричного опору ґрунтів чотирьох електродною симетричною установкою $AMNB$: a – глибина дослідження h_1 ; b – глибина дослідження h_2 ; AB та $A'B'$ – живлячі електроди; MN та $M'N'$ – приймальні електроди; $Б$ – джерело живлення; $П$ – вимірювальний прилад [14]

Електродинамічне зондування виконується забиванням металевого зонду, що складається з декількох труб, еталонним вантажем у масив ґрунту, що досліджується (рис. 1.8). Під час забивання замірюється сила струму пропущена через електроди, що знаходяться на кінці зонду. Даний метод вирішує задачі: визначення товщини баластного шару, межі і товщину баластних шлейфів; виявлення баластних корит, мішків, гнізд та їх розмірів; профілювання літологічного складу та стану ґрунту; визначення величини

усадки і конфігурації підшви насипу, спорудженого на слабкій основі; визначення відносної щільності піщаних ґрунтів, зміну консистенції глинистих ґрунтів.

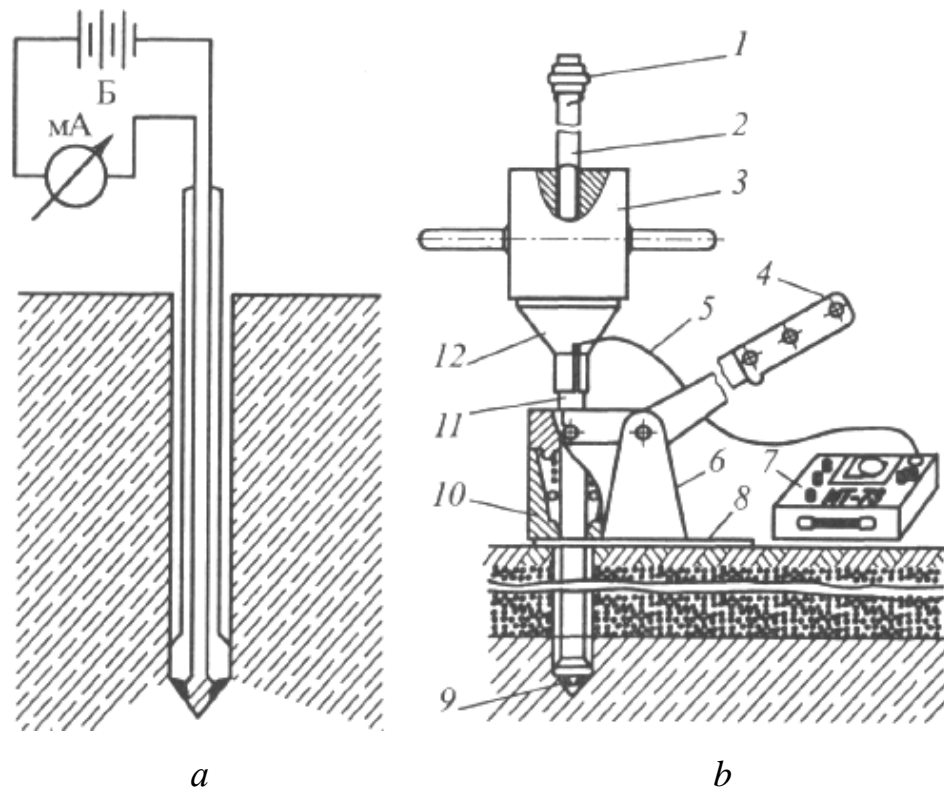


Рисунок 1.8 – Схема (а) та загальний вигляд установки для електродинамічного зондування (b): 1– обмежувач висоти підйому вантажу; 2 – направляюча штанга; 3 – вантаж; 4 – ричаг; 5 – провід, з’єднуючий ізольовані контакти з вимірювальним приладом; 6 – стійка; 7 – вимірювальний прилад; 8 – опорна плита; 9 – двоконтактний наконечник; 10 – самозахватуючий механізм; 11 – рухомий електрод; 12 – упор для вантажу [14]

Сейсмічний метод заснований на поширенні пружних хвиль під дією ударного навантаження. Для дослідження використовують апаратуру, що складається з сейсмоприймача, підсилювача сигналу і реєстратора (рис. 1.9). Даний метод вирішує практично всі задачі, що виникають при діагностиці земляного полотна: дослідження земляного полотна в складних інженерно-геологічних умовах; оцінка міцнісних характеристик ґрунту насипу та основи; дослідження внутрішньої будови земляного полотна; визначення водонасичених зон, т. і.

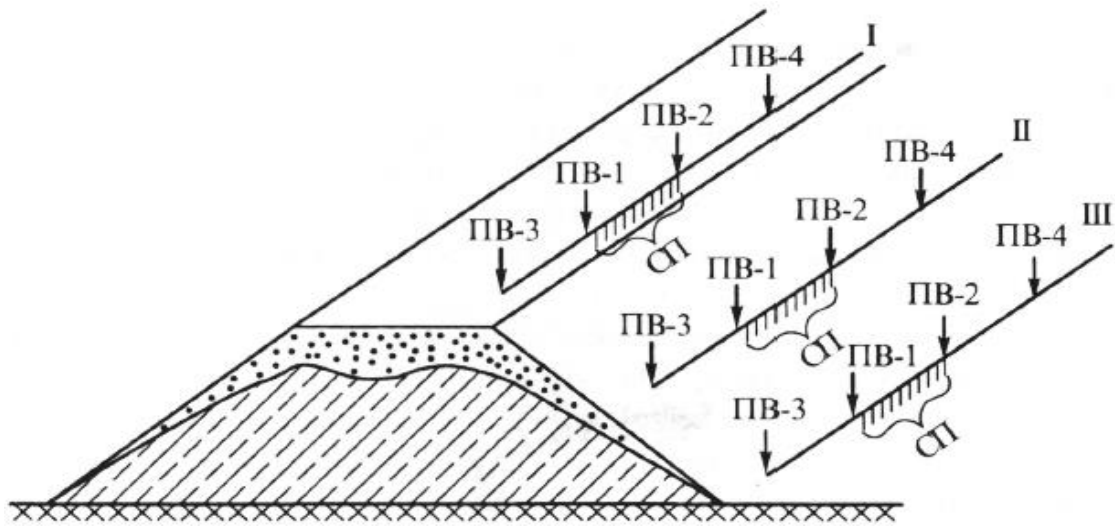


Рисунок 1.9 – Схема проведення сейсмічного профілювання: СП – сейсмоприймачі; ПВ – місця створення хвиль; I, II, III – сейсмічний профіль [14]

Вібраційний метод базується на дослідженнях взаємодії пружних хвиль під дією навантаження від рухомого складу, тобто оцінка роботи насипу відбувається в динамічному стані (рис. 1.10). Даний метод застосовують для: профілактичної діагностики і якісної оцінки стану насипів; оцінки ефективності влаштування протидеформаційних конструкцій в умовах динамічної роботи насипу; виявлення насипів на яких можливі виникнення аварійних деформацій під дією динамічного навантаження.

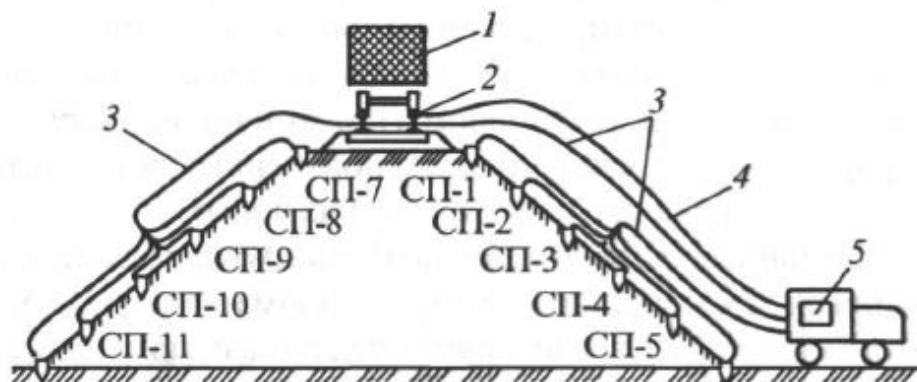


Рисунок 1.10 – Схема вимірювань коливань ґрунту при діагностиці насипів: 1 – динамічне поїздне навантаження; 2 – електромагнітний фіксатор проходження вісі екіпажу; 3 – з'єднуючий кабель; 4 – кабель фіксатора вісі; 5 – реєструвальна апаратура [14]

Вище перелічені геофізичні методи є трудомісткими та дорогими, оскільки для їх проведення потрібно залучати велику кількість людей, виділяти “вікна” у русі поїздів, що також несе за собою витрати.

1.3.2. Георадіолокаційний метод

В останні роки розвивається та застосовується метод георадіолокації, який є перспективним для оперативної діагностики земляного полотна на всій його протяжності. Даний метод характеризується великою роздільною здатністю, технологічністю та високими техніко-економічними показниками [13, 14], що в даний час є актуальним у зв’язку з фінансовим станом залізниці.

Дослідженнями в області застосування методу георадіолокації, як і інших геофізичних методів при діагностиці земляного полотна залізничних і автомобільних доріг займалися вчені: Ашпиз Е. С., Батракова А. Г., Коншин Г. Г., Круглый А. Г., Грицьк В. И., Кулижников А. М., Петренко В. Д., Явна В. А., [26–33 та інші].

При застосуванні даного методу на вході середовища генерується електромагнітний імпульс, а на виході приймальною антеною сприймається відгук середовища, що є сукупністю хвиль, які відрізняються між собою часом проходження, інтенсивністю і формою. У кінематичних і динамічних характеристиках цих хвиль міститься інформація про середовище. Прилад, в якому реалізовані принципи георадіолокації, називається георадаром. Принцип дії георадара заснований на випромінюванні надширококутних імпульсів метрового і дециметрового діапазону електромагнітних хвиль і прийомі відгуку – сигналу, що є суперпозицією амплітуд прямих, відображених і заломлених хвиль, які досягли прийомної антени.

У праці [34] наведено результати георадарних обстежень насипів при доповненні до традиційних технологій інженерних вишукувань, що дозволяє виявляти підтоплені місця і ступінь їх пошкодження, що є необхідним для призначення відповідних заходів щодо запобігання подальшого розвитку пошкоджень. Автор зазначає, що необхідно формувати електронну базу даних для систематизації та зберігання інформації, яка містить результати

георадіолокаційного обстеження насипу, для створення ефективної системи моніторингу за підтопленими насипами, потенційно схильними до руйнування.

У праці [35] зазначені результати обстеження земляного полотна за допомогою георадіолокаційного зондування. Автор зазначає, що застосування георадіолокаційного зондування створює передумови для обґрунтованого проектування заходів по оздоровленню земляного полотна. З аналізу радарограм можна визначати вологість як ґрунтів так і баластної призми, що дає змогу попереджувати деформації основної площадки земляного полотна.

У роботах [36, 37] окреслені результати контролю якості закріплення просадочних ґрунтів за допомогою георадіолокаційного обстеження масиву з подальшою обробкою отриманих даних в автоматизованому режимі з побудовою розрізів добротності поля зворотнього розсіювання. Розглянуто результати натурних спостережень при ін'єкційному зміцненні ґрунту основи в режимі гідророзриву. Автори зазначають, що розрахунок геоелектричних моделей з урахуванням георадіолокаційних даних дозволив знизити неоднозначність розв'язання оберненої задачі, обумовленої впливом техногенних перешкод, на ділянці смуги відведення діючої залізниці, тим самим підвищивши достовірність геологічної інтерпретації геофізичних даних.

У праці [38] запропонована методика безперервного визначення властивостей конструкційних шарів, що базується на георадіолокаційному методі. Розглянуто різні методи визначення діелектричної проникності піщано-гравійної суміші і її змін, пов'язаних зі зміною характеристик ґрунту в процесі ущільнення. Також визначено значення усадки ґрунту в процесі ущільнення з урахуванням змінного значення діелектричної проникності, отримано залежність щільності ґрунтів в різних шарах по глибині від кількості проходів катка.

Способи проведення георадіолокаційного обстеження.
Георадіолокаційне обстеження може проводитися за двома основними схемами: георадарне профілювання і георадарне зондування. При георадарному профілюванні задається напрямок профілювання по якому потім проходить

оператор з георадаром, антени передавача та приймача знаходяться на фіксованій відстані одна від одної рис. 1.11. При георадарному зондуванні відстань між антенами поступово збільшують. При цьому залишається фіксованим положення осі георадара при одночасному переміщенні обох антен в різні сторони рис. 1.12, *a*, або положення передавача рис. 1.12, *b*.

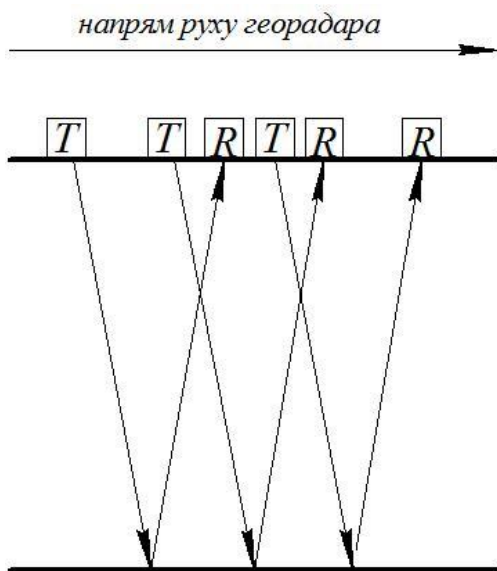


Рисунок 1.11 – Схема георадарного профілювання: *T* – передавальна антена, *R* – приймальна антена. (відстань між антенами фіксована).

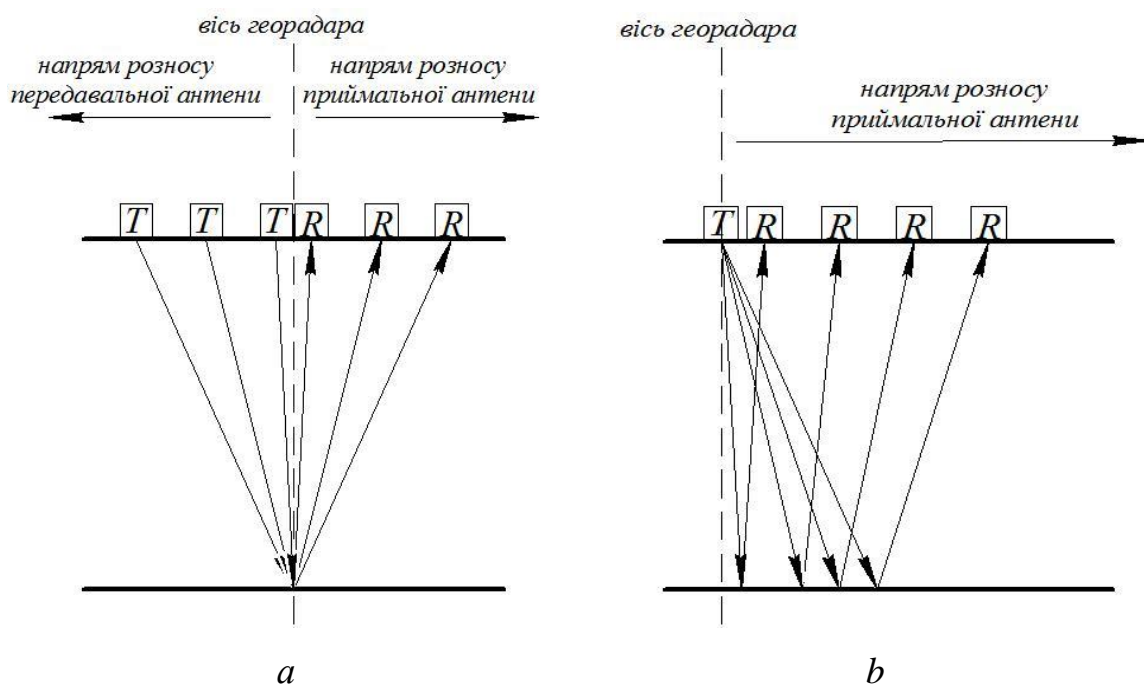


Рисунок 1.12 – Схема георадарного зондування: *a* – положення осі георадара не міняється; *b* – положення передавальної антени не міняється; *T* – передавальна антена, *R* – приймальна антена

Приклади застосування георадарного обстеження. Як зазначено у [40–42] однією з проблем експлуатації доріг є ліквідація просадок і провалів дорожнього полотна, що викликають, як правило, порушення режимів руху, а в деяких випадках і серйозні аварії. Виявлення конкретних причин просадок дорожнього полотна сприяють прийняттю найбільш раціональних інженерних рішень для їх ліквідації.

На рис. 1.13 приведено приклад георадіолокаційного зондування ділянки провалу на автодорозі та результат обробки.

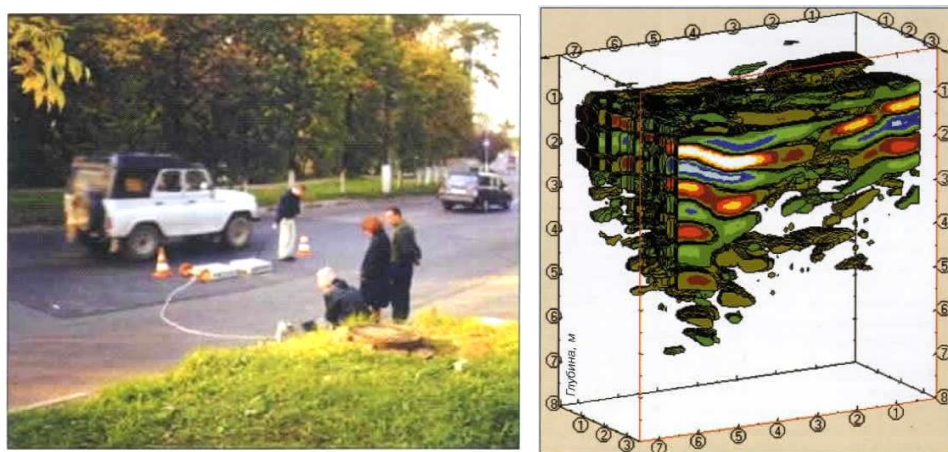


Рисунок 1.13 – Зондування місця провалу на автодорозі та його результат [42]

Із матеріалів приведених у [39] видно, що використання антен з різною частотою дозволяє успішно визначати причини деформацій покриттів і за необхідності проводити моніторинг як дорожнього так і злітно-посадкового полотна.

У процесі експлуатації земляного полотна залізниці та підвищення навантаження в ньому виникають деформаційні процеси. Метою георадіолокаційних досліджень є пошук та попередження причин деформаційних процесі для їх уникнення та усунення.

Поширеним дефектом баластної призми є утворення грязевих гнізд або лінз, що в подальшому веде до перезволоження. І під дією динамічного навантаження від рухомого складу утворюється виплеск [39, 43–46]. На рис. 1.14. наведено забруднений баласт та радарограму із якої видно місця

забрудненого баласту (стрілкою на радарограмі показано верх забрудненого баласту, що відповідає лінії на фото).

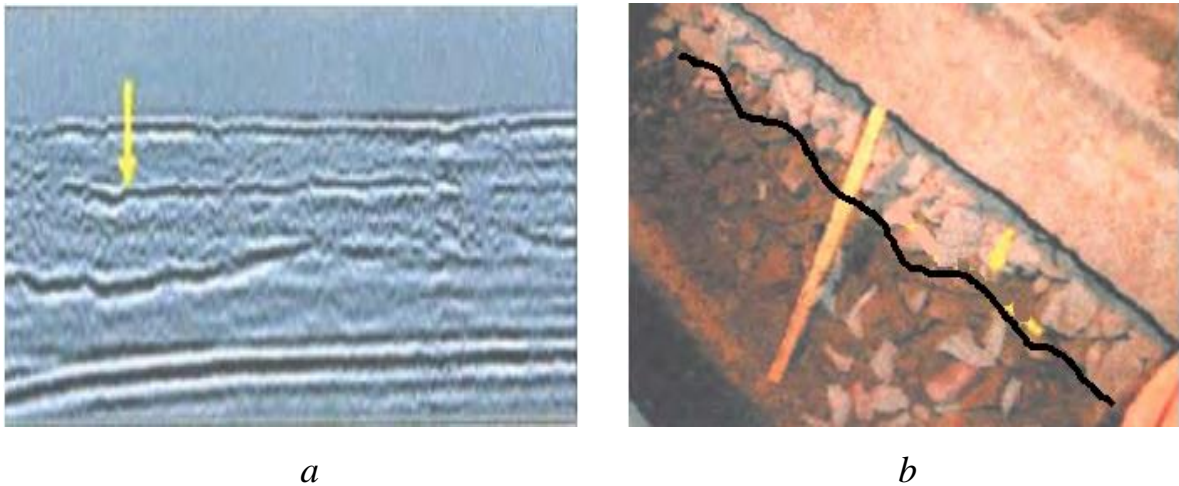


Рисунок 1.14 – Фрагмент радарограми і розкопаний забруднений баластний шар [39]: *a* – радарограма; *b* – забруднений баластний шар

Однією з головних переваг георадіолокації у порівнянні з бурінням є можливість вести неперервну зйомку, тобто отримані дані [45] становлять просторово-часовий переріз ділянки неоднорідного земляного полотна рис. 1.15.

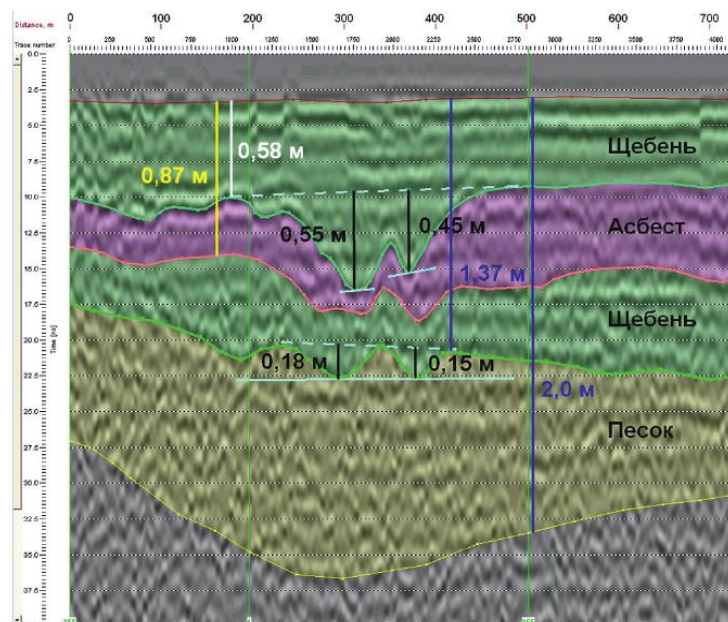


Рисунок 1.15. – Фрагмент радарограми насипу залізничної колії після інтерпретації і обробки [45]

Це дозволяє простежити стан і потужність ґрунтів насипу вздовж усього профілю, а не в його окремих точках. На даній ділянці наявні деформації земляного полотна, що становлять, в основному, просадки залізничної колії та

розповзання насипу. Дані деформації усувались шляхом підсипання щебеню, що добре простежується на радарограмі. Щоб отримати дані про товщину щебеню класичним методом довелося б пробурити не один десяток свердловин, які потребують значних витрат коштів і часу [45].

Отже, на даний момент, як на автомобільних так і на залізничних дорогах найпоширенішими методами оцінки їх стану є натурні огляди, які не завжди ефективні та надійні, їх результати у значній мірі залежать від кваліфікації особи яка проводить огляд.

Дані світового та вітчизняного досвіду показують, що георадари можуть ефективно використовуватися для загального обстеження протяжних ділянок. Їх основними перевагами є оперативність проведення робіт і низька трудоемкість. Вони сприяють підвищенню достовірності інженерно-геологічної інформації і тим самим покращують якість і знижують вартість як проектної документації, так і будівельних, ремонтних і експлуатаційних робіт [46].

Економічний ефект при виконанні інженерно-геологічних вишукувань із застосуванням георадарів для обстеження земляного полотна залізниць досягається за рахунок скорочення бурових робіт і підвищення якості одержуваної інформації за результатами досліджень.

Але слід зазначити, що вартість георадарних досліджень хоч є нижчою у порівнянні з проведенням бурових робіт та всеодно залишається високою, на нашу думку її можна скоротити шляхом проведення досліджень методом на основі імпульсного відклику. Тому у даному дисертаційному дослідженні увага приділяється методу георадіолокації та розробці сучасного економічно-вигідного методу, що заснований на основі імпульсного відклику.

1.3.3. Метод на основі імпульсного відклику

Даний метод заснований на реєстрації хвильових процесів, що виникають у ґрунтовому середовищі. Маючи дані про параметри хвиль під час їх проходження через ґрунтове середовище, можна оцінити його ступінь ущільнення. Все частіше провідними науковцями [47–59] розробляються та

удосконалюються неруйнівні методи дослідження стану різних середовищ, одним з таких є земляне полотно залізничної колії чи автомобільної дороги.

Пружність земляного полотна дозволяє виміряти метод Falling Weight Deflectometer (FWD) [47], що заснований на вимірюванні коливань ґрунту яке спричинено імпульсним навантаженням за допомогою падаючого вантажу.

Останнім часом дані аналізу динамічного відклику на імпульсне навантаження набувають актуальності. Велика увага приділяється спектральним методам динамічної інтерпретації, наприклад, параметр Rail Road Response Factor (RRRF) [48], що використовується для встановлення стану земляного полотна на основі хвиль, які збуджуються транспортними одиницями при різних швидкостях руху. Також слід зазначити, що неруйнівні методи на основі динамічного відклику ґрунтового середовища застосовуються у широко відомому методі Hammer Test [49].

Дослідженнями [50, 52] встановлено, що на характер поширення хвиль у ґрунті земляного полотна впливає його поперечний профіль та типи ґрунтових мас, що беруть участь у процесі ущільнення.

При збудженні коливань у пружному середовищі джерелом, що знаходиться поблизу поверхні, утворюються два основних види хвиль – об'ємні і поверхневі. Об'ємні хвилі в пружних твердих середовищах поширюються у вигляді двох типів коливань в залежності від напрямку зсуву частинок – поздовжні і поперечні. При проходженні поздовжньої *P*-хвилі частинки середовища коливаються вздовж напрямку поширення хвилі, відбуваються деформації середовища. При проходженні поперечної *S*-хвилі частинки коливаються у площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі, виникають деформації форми [51, 52].

Поверхневі хвилі в залежності від площини коливання частинок поділяються на два типи – хвилі Лява і хвилі Релея. Хвилі Лява є поляризовані хвилі, в якій частинки коливаються вздовж поверхні середовища перпендикулярно напрямку поширення хвилі (рис. 1.16). Ці хвилі виникають у

шаруватому середовищі в разі, коли швидкість хвилі в нижньому шарі нижче, ніж у верхньому шарі [51, 53].

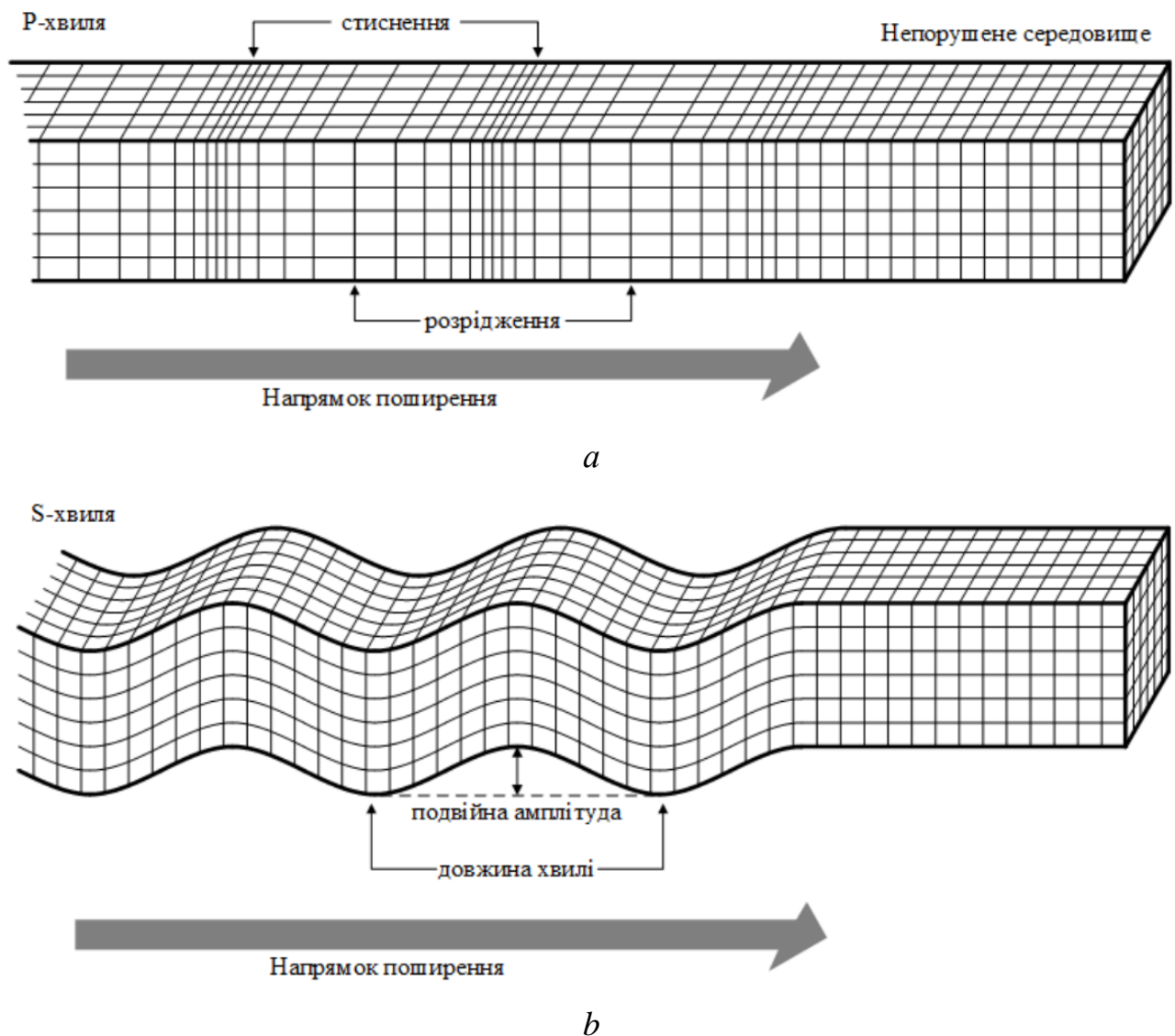


Рисунок 1.16. – Характер зміни частинок в повздовжніх та поперечних хвилях

Хвилі Релея виникають поблизу вільної поверхні середовища. Коливання часток відбувається у напрямку поширення хвилі в площині, перпендикулярній поверхні [51]. Обидва зазначених типи хвиль мають дисперсію, тобто залежність фазової швидкості від частоти [50]. Глибина поширення коливань поверхневої хвилі прямо пропорційна довжині хвилі (обернено пропорційна частоті). Хвиля з високою частотою коливань швидко згасає і має невелику глибину поширення, а зменшення частоти дозволяє збільшити глибину поширення [50, 51].

В останні роки у країнах Європейського Союзу активно застосовується і розвивається метод визначення швидкостей розповсюдження поперечних хвиль, оснований на аналізі дисперсійних характеристик поверхневих хвиль [54, 55]. Даний метод був розроблений у 1983 р. і отримав назву SASW (Spectral Analysis Surface Waves – спектральний аналіз поверхневих хвиль).

До теперішнього часу було розроблено багато варіантів методу SASW, що розрізняються типом хвиль, що досліджуються, режимом проведення спостережень (активний, пасивний) і частотним діапазоном вимірювань. Рішення поставленої задачі можливе при використанні методу Монте-Карло і статистичного методу максимальної правдоподібності.

Швидкість поперечних хвиль тісно пов'язана з деформаційними характеристиками ґрунтів, такими як модуль пружності і модуль зсуву [51, 52, 56], які визначаються за формулами:

$$G = \rho c_s^2, \quad (1.1)$$

$$E = \rho c_s^2 \frac{3 \left(\frac{c_p}{c_s} \right)^2 - 4}{\left(\frac{c_p}{c_s} \right)^2 - 1}, \quad (1.2)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (1.3)$$

де: c_s – швидкість розповсюдження поперечних хвиль S -хвилі; c_p – швидкість розповсюдження поздовжньої хвилі P -хвилі; ν – коефіцієнт Пуансона; ρ – щільність ґрунту.

Для побудови теоретичної кривої дисперсії використовуються різні методи. Відомо, що хвиля Релея має декілька форм розповсюдження (гармонік) з різними значеннями фазових швидкостей. Прогресивні методи інверсії враховують вплив вищих гармонік хвиль Релея [57]. У деяких випадках необхідно враховувати ефект об'ємних хвиль із застосуванням методів спектрального аналізу.

Метод багатоканального аналізу поверхневих хвиль (Multichannel Analysis of Surface Waves – MASW) був вперше представлений в 1999 р. і опублікований

в журналі Geophysics [57]. Проводиться реєстрація поверхневих коливань хвиль Релея від різних джерел, потім аналіз цих швидкостей і побудова профілю швидкостей поперечних хвиль. Загальна схема методу MASW приведена на рис. 1.17 [58].

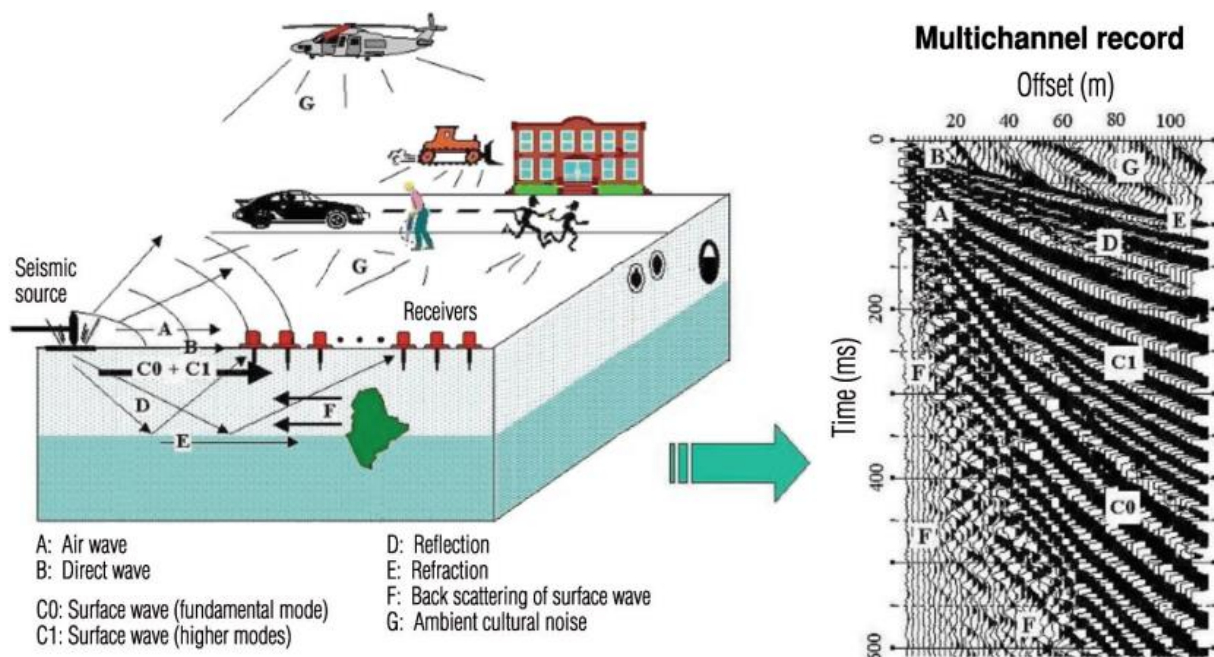


Рисунок 1.17. – Схема вимірювань сейсмічних хвиль методом MASW та їх багатоканальний запис [58]

Вище згадані методи SASW і MASW мають ряд переваг – неруйнівні та не надто трудоміські, що робить їх затребуваними при виконанні робіт із оцінки ступеня ущільнення ґрунтів земляного полотна [59], але слід зазначити, що обладнання для реалізації цих методів є дорогівартісним.

У роботах [60, 61] наведено результати дослідження ступеня ущільнення баластного шару після роботи баластоущільнюючих машин різних конструкцій. Удосконалено сейсмічний метод шляхом комплексної динамічної та кінематичної інтерпретації імпульсного відклику. При динамічній інтерпретації, із використанням кластерного та дискримінантного статистичного аналізу, встановлено характерні спектральні ознаки, що відповідають ступеню ущільнення баластного шару. Натурні виміри ступеня ущільнення баластного шару після роботи різної послідовності

баластоущільнюючих машин дозволили встановити ефективність ущільнення та доцільність їх застосування.

У роботі [62] виконано дослідження розподільчих властивостей баластної призми в залежності від ущільнення баластного шару динамічним навантаженням. Результати вимірів показали значний вплив ущільнення баластного шару на розподіл напружень під шпалою. Виконане дослідження відкриває нові можливості практичного покращення існуючих конструкції колії та технології підбивки і ущільнення баластного шару з точки зору забезпечення оптимальних умов роботи баластного шару.

У праці [63] виконана розробка та застосування методу визначення ущільнення баластного шару. Експериментальні дослідження показали значну зміну властивостей баласту у процесі його деформації під шпалою. У дослідженні було доведено можливість застосування багатосенсорного виміру датчиками звуку поля поширення фронту хвилі замість складного способу на основі акселерометрів. Результати вимірів показали значне локальне збільшення швидкості проходження поздовжніх хвиль у баластному шарі.

У роботі [64] наведено теоретичну методику визначення поля проходження пружної акустичної хвилі через композитне тверде тіло із неоднорідними включеннями. В результаті доведено, що на межі двох різних тіл хвилі гармонік мають різні значення, що пов'язано із різними модулями пружності конструкцій та матеріалів.

У роботі [65] наведено лабораторні експериментальні дослідження розповсюдження пружних хвиль у залежності від величини динамічного ущільнення щебеневого баласту залізничної колії. У результаті проведених досліджень встановлено, що значне динамічне навантаження частотою більше 30 Гц призводить до розущільнення баласту колії, проте баластна призма стає однорідною. І швидкості поширення хвиль по довжині призми є однаковими. Також запропоновано новий теоретичний механізм розвитку нерівності колії, який враховує не тільки залишкові осідання баластного шару, а також виникнення люфтів під шпалами. Дані фактори призводять до локальної зміни

пружності колії і формування зони із неоднорідним ущільненням баластного шару.

Проходження пружних хвиль через зернисте середовище визначається мінералогічним та гранулометричним складом зерен і, в значній мірі, кількістю контактів між зернами, тобто щільністю ґрунтового шару. Як показують дослідження, що наведені у роботі [66], ця залежність лінійна. Таким чином, вимірюючи швидкість поширення пружних хвиль після кожного ущільнення ґрунту, можна зробити висновок про ступінь його ущільнення.

Отже, проаналізовані методи оцінки ступеня ущільнення ґрунтів земляного полотна мають свої переваги та певні недоліки. Більшість методів застосовується для дослідження відносно однорідних ґрунтів. Потрібно зазначити, що земляне полотно за своєю будовою є складною спорудою за конфігурацією шарів, та не завжди є однорідним.

Тому у даній дисертаційній роботі розробляється пристрій для вимірювання ступеня ущільнення ґрунтів земляного полотна, який ґрунтується на кінематичній та динамічній інтерпретації імпульсного відклику при дослідженні ущільнення ґрунтів земляного полотна. Оскільки, імпульсний метод на основі MASW може відігравати значну роль у моніторингу та пошуку прогресування будь-яких внутрішніх процесів в ґрунтовому середовищі, перш ніж вони можуть бути ідентифіковані шляхом візуального огляду.

1.4. Методи підвищення несучої здатності дефектного земляного полотна

Збільшення осьового навантаження, швидкості та інтенсивності руху, призводить до додаткового зносу об'єктів залізничної інфраструктури. Одним із таких об'єктів є земляне полотно у якому наростає кількість дефектів та деформацій, що вимагає розробки та обґрунтування способів і методів посилення ґрунтів та ремонту існуючого земляного полотна.

Для забезпечення нормальної експлуатації земляного полотна передбачаються відповідні заходи, що відповідають механізму порушення міцності і стійкості кожного його елемента. У число таких заходів входять –

забезпечення правильного розташування і необхідного ступеня ущільнення ґрунту, відповідний вибір ґрунтів для насипів, захист ґрунту від зволоження шляхом влаштування дренажів, гідроізоляції та інш., захист від небезпечних температурних впливів, ерозії, хвильових впливів, правильне призначення геометричних параметрів. Зазначені заходи необхідно проводити комплексно з урахуванням місцевих та експлуатаційних умов [6].

У наш час наука розвивається досить швидко і є багато розробок і в напрямку армування, який включає все різні види (геотекстилі, полімерні плівки, тканинні матеріали, металеві стержні та пластини, анкери, набивні, буронабивні, ґрунтові і буроінекційні палі), в залежності від типу (жорсткі, рідкі розчини), пружні, пластичні), характеру влаштування (застеляння, забивання, вдавлювання, вібровдавлювання, інектування, попередньо підготовлені скважини) і ін.

Дослідженнями та розробкою способів армування земляного полотна присвячені праці Алхдур А. М. М., Ашпиз Е. С., Блажко Л. С., Гольдштейн М. Н., Даніленко Е. І., Джоунс К. Д., Ковальчук В. В., Ланис А. Л., Лучко Й. Й., Петренко В. Д., Тимофєєва Л. М., Тютькін О. Л., Фрішман М. А., Шахунянц Г. М., Яковлева Т. Г., [3, 21, 22, 67–81] та інші.

Як видно з аналізу науково-технічної літератури [15, 82] основними заходами по стабілізації та покращення фізико-механічних властивостей ґрунтів земляного полотна є відсипання поверх слабкої основи шару щебеню, суцільна вирізка з улаштування прижимних берм, бортова вирізка по торцях шпал. Але з часом внаслідок динамічного поїзного навантаження значна частина щебеневого баласту зміщується зі слабким ґрунтом, що знову призводить до втрати міцності основи щебеневої призми, виникнення її осідання, і, як наслідок, зменшення швидкості руху поїздів [82] тобто ефект від такого виду робіт є недовготривалим (короткочасним). Суцільна вирізка з улаштування прижимних берм та бортова вирізка по торцях шпал є дієвим але досить дорогим видом робіт [15] оскільки тягне за собою використання великої кількості будівельних матеріалів (ґрунт, щебінь, пісок), збільшення розмірів

земляного полотна та подовження штучних споруд, також всі ці роботи виконуються з тривалим закриттям руху так зване довгострокове “вікно”.

Армування ґрунтів земляного полотна є актуальним досить давно але в Україні широкого розповсюдження набули лише геосинтетичні армуючі елементи, як в залізничній [79, 83] так і в автомобільній [84, 85] галузі. А от закордоном досить активно застосовуються більш прогресивні методи такі як ін’єктування, рис. 1.18, у хворе земляне полотно різного роду розчинів, що покращують фізико-механічні властивості ґрунтів [86].



Рисунок 1.18 – Ін’єктування розчину у хворе земляне полотно [86]

Новим методом підсилення неоднорідного земляного полотна є Geopier GeoSpikeSM (рис. 1.19) [87], що запатентований в Канаді у 2018 році. Дана система передбачає встановлення міцних елементів у неоднорідних ґрунтах та виконується без зняття залізничних колій, шпал або баласту. Заздалегідь виготовлені полімерні оболонки вводяться попарно між шпалами. 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. Після встановлення до проектних глибин заповнювач поміщається в оболонку GeoSpike та ущільнюється. Динамічні навантаження від транспортних одиниць

передаються через баласт до оболонки, а далі через оболонку та щільно ущільнений заповнювач до відповідного несучого шару.

Було проведено експериментальні дослідження роботи ділянки колії де присутнє неоднорідне земляне полотно з осіданнями рис. 1.20, *a* які продовжувались після виконання ремонту. Відповідно до моніторингу за станом ділянки, з часу попереднього ремонту відбулося відхилення більше 75 мм рис. 20, *b*. Система Geopier GeoSpikeSM, яка була використана для посилення неоднорідного земляного полотна на проблемній ділянці колії, зменшила динамічні прогини залізничної колії більш ніж на 60 % без демонтажу рейок, шпал та баласту.

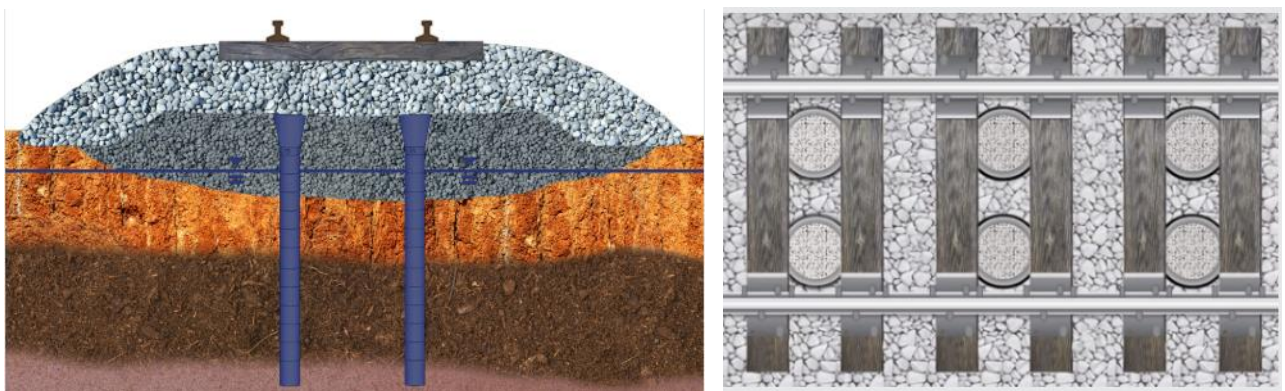
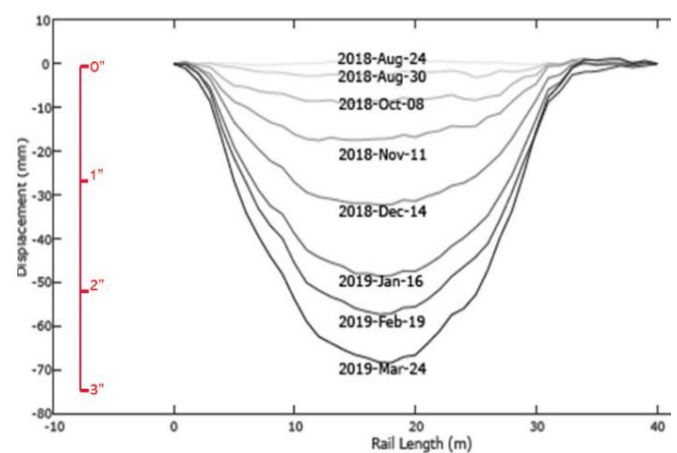


Рисунок 1.19 – Метод Geopier GeoSpikeSM для підсилення неоднорідного земляного полотна [87]



a



b

Рисунок 1.20 – Дослідна ділянка колії [87]: *a* – осідання залізничної колії; *b* – графік осідань за результатами моніторингу

Отже, як бачимо із проведеного аналізу на сьогоднішній день існує багато наукових робіт у напрямку досліджень підвищення міцності та стійкості земляного полотна. Але всі вони направлені на застосування геотекстилів [79, 83], геосинтетиків [80], ін'єкційних розчинів [72]. Слід зазначити, що залишилось невирішеним питання ефективного відведення води з тіла земляного полотна. Оскільки практика показує, що тривала експлуатація геотекстилю у 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 проміжними результатами досліджень проведених на фінських залізницях [88]. 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 [89] 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. Також у праці [90] 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.

Дослідження впливу вібраційного навантаження на дренажну конструкцію приведено у роботі [91]. Авторами на експериментальній установці дорожньої конструкції, яка імітувала вібрації від руху транспорту, проведено серію випробувань. Вони полягали у дослідженні роботи двох типів дренажних конструкцій мілкового 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. Встановлено, що на інтенсивність водовідведення води по конструкції з трубчастим дренажем, вібрація майже не впливає.

У роботах [92, 93] проведено оцінку несучої здатності підсилених 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 [94]. Проте для підвищення несучої здатності дефектних місць земляного полотна, які простягаються на невеликих ділянках колії, вони є економічно не вигідними.

У роботах [53, 60] доказано, що підвищення динамічної дії рухомих транспортних одиниць на земляне полотно відбувається через нерівномірні осідання баласту залізничної колії. Також у роботі [95] доведено, 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 [9, 23] 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 [65] 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 [9, 23, 53, 65, 95] 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 [96]. 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 [12], 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.

Підсумовуючи матеріали з вище проведеного аналізу науково-технічної літератури зауважимо наступне.

Практика показує, що тривала експлуатація геотекстилю в конструкції залізничної колії негативно впливає на її технічний стан через скупчення води.

Методи ін'єктування хоч і впроваджуються але є дороговартісними через застосування дорогих вяжучих матеріалів. Також слід зазначити, що немає досліджень, як присутність цих матеріалів вплине на проведення робіт з очищення баласту залізничної колії, яке виконується періодично для відновлення рівнопружності підрейкової основи.

Метод Geopier GeoSpikeSM для підсилення неоднорідного земляного полотна є новим та недостатньо вивченим, а саме невідомо як вібраційні дії, від рухомого складу залізниць, з часом будуть впливати на стійкість та міцність такої конструкції.

Тому у даній дисертаційній роботі розробляється та обґрунтовується спосіб армування проблемних ділянок земляного полотна трубчастими дренажами.

1.5. Експериментальні дослідження неоднорідного земляного полотна залізничної колії на Львівській залізниці

Для встановлення технічного стану земляного полотна на ділянці Львів–Стрий на ПК 1941+00-ПК 1942+00 та 309 км ПК 5 ділянки Чернівці – Вадул Сирет Регіональної філії Львівська залізниця АТ Укрзалізниця використано георадіолокаційний метод [25, 29, 46].

Георадіолокаційне обстеження виконувалося методом профільного зондування за допомогою георадара «Лоза-В» з кроком 1 м та довжиною антен – 1 м.

Георадар «Лоза-В» (рис. 1.21) складається з блоку формування зондуючих імпульсів – БФЗИ-1, блоку реєстрації – БР-1 і блоку управління та індикації – БУИ-В, до якого приєднано акумуляторний субблок СА-1. Заряд БФЗИ-1 здійснюється від вбудованої акумуляторної батареї напругою 12-14 В ємністю 1,2 А/год. Заряд БР-1 і БУИ-В здійснюється від акумуляторної батареї напругою 12-14 В акумуляторного субблока – СА-1 ємністю 3,2 А/год, який входить в склад БУИ-В.

При вимірюваннях приймаються кінематичні моделі середовища: однорідно-слоїсте середовище, неперервне середовище, однорідне середовище з локальними неоднорідностями.



Рисунок 1.21 – Георадар «Лоза-В»

Наведемо результати досліджень земляного полотна на ділянці Львів–Стрий. Для проведення обстеження земляного полотна виконано поздовжні електромагнітні профіля по ходу кілометрів загальною протяжністю 240 м (рис. 1.22):

- по осі непарної колії (ПП 1 ПК 1941+00-ПК 1942+00);
- по узбіччю земляного полотна непарної колії (ПП 2 ПК 1941+00-ПК 1942+00);
- по підшві насипу непарної колії (ПП 3 1941+20-ПК 1942+60).

Процес проведення експериментальних досліджень земляного полотна наведено на рис. 1.22.

Із проведених досліджень встановлено (рис. 1.23 – 1.25), що на **ПП 1.** ПК 1941+20-ПК 1941+60 (глибина до 3,0 м) – розташовані зони розуцільнення ґрунту. **ПП 2.** На ПК 1941+20-ПК 1941+60 (глибина до 1,5 м) – розташовані зони розуцільнення ґрунту. **ПП 3.** На ПК 1941+20-ПК 1942+60 (глибина 2,0–4,2 м) – розташовані зони перезволоженого ґрунту.

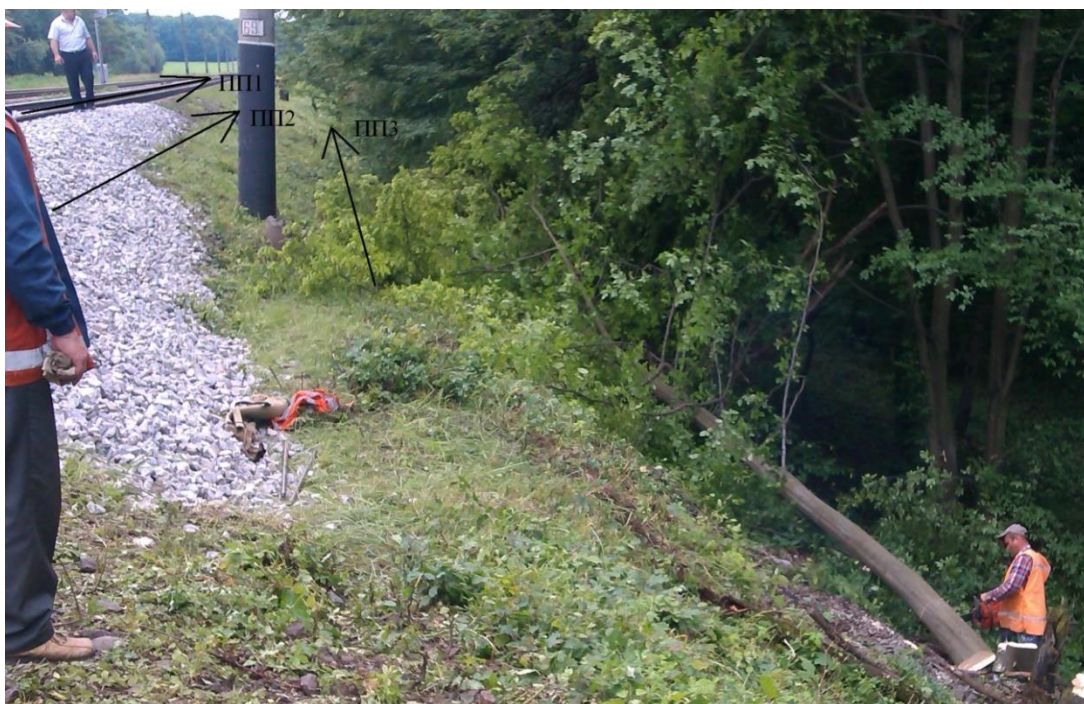


Рисунок 1.22 – Схема георадіолокаційного профілювання

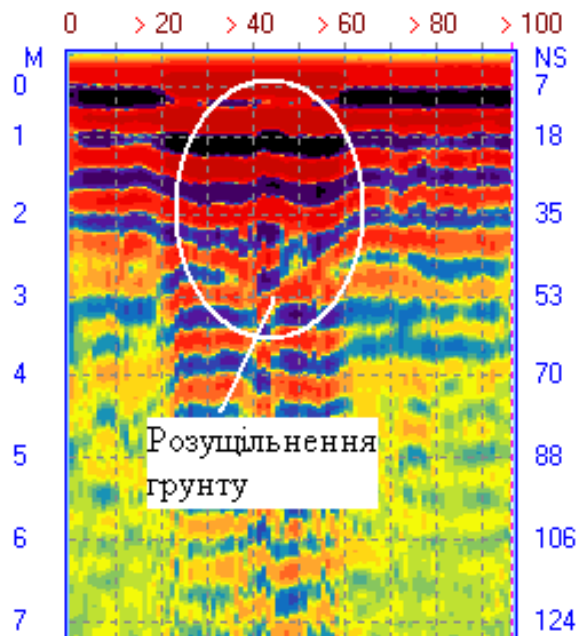


Рисунок 1.23 – Радарограма на ПК 1941+20-ПК 1941+60 – розташовані зони розуцільнення ґрунту (глибина до 3,0 м)

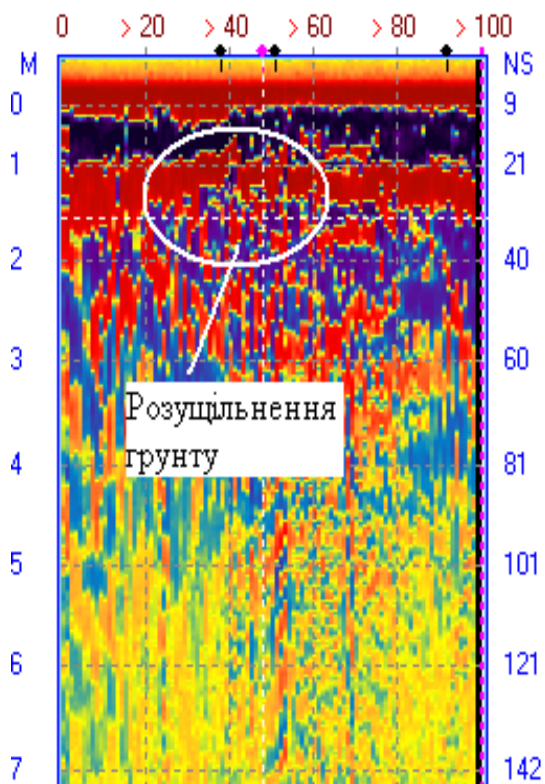


Рисунок 1.24 – Радарограма на ПК 1941+20-ПК 1941+60 – розташовані зони розуцільнення ґрунту (глибина до 1,5 м).

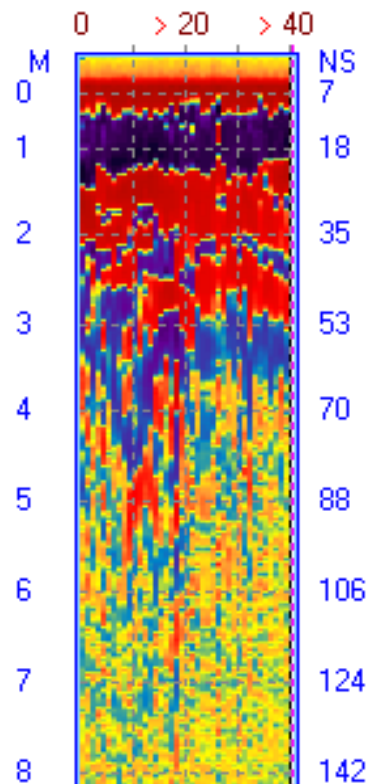


Рисунок 1.25 – Радарограма на ПК 1941+20 – ПК 1942+60 – розташовані зони перезволоженого ґрунту (глибина 2,0–4,2 м)

Результати досліджень земляного полотна на ділянці Чернівці – Вадул Сирет. Для проведення обстеження земляного полотна виконано поздовжнє по ходу кілометрів та поперечне електромагнітне профілювання: ПП 1 – по лівій підшві насипу (ПК 3084+00 – ПК 3085+20); ПП 2 – по лівому узбіччю насипу (ПК 3084+00 – ПК 3085+20); ПП 3 – над дренажним прорізом із з.б. трубою отв. 0,5 м в якості дрени (ПК 3084+60); ПП 4 – по правому узбіччі насипу (ПК 3084+40 – ПК 3085+40); ПП 5 – по правій підшві насипу (ПК 3084+40 – ПК 3085+00).

Із проведених досліджень встановлено (рис. 1.26 – 1.29):

ПП 1. На ПК 3804+20 – ПК 3804+40 (L=20 м), ПК 3805+00 – ПК 3805+10 (L=10 м) – на глибині від 0,3 м до 3 м наявні зони розуцільнення ґрунту. ПК 3804+60 – ПК 3804+65 (L=5 м) – на глибині 2,3 м сигнал від залізобетонної труби (дрени). ПК 3804+55 – ПК 3804+85 (L=30 м) – на глибині від 0,3 м до 2,3 м наявна зона розуцільнення ґрунту над залізобетонною трубою (рис. 1.26).

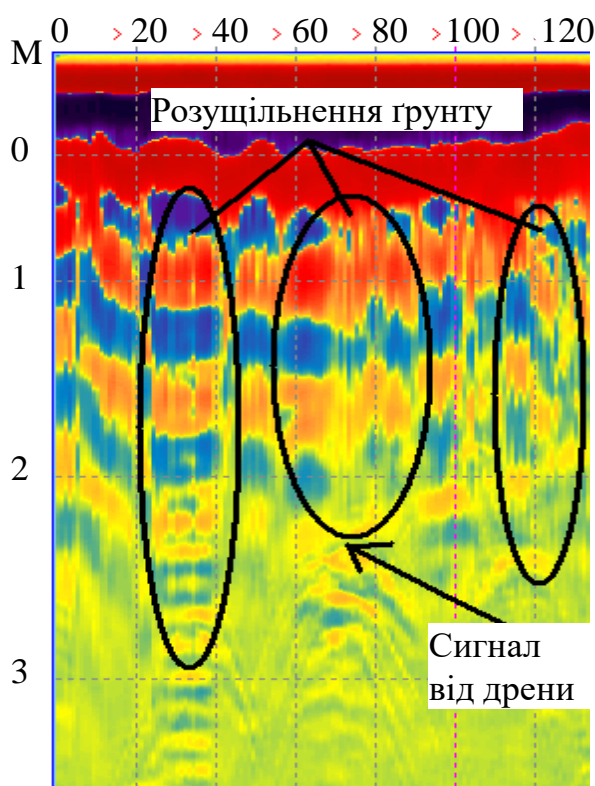


Рисунок 1.26 – Радарограма поперечного електромагнітного профілювання: ПП 1 – по лівій підшві насипу

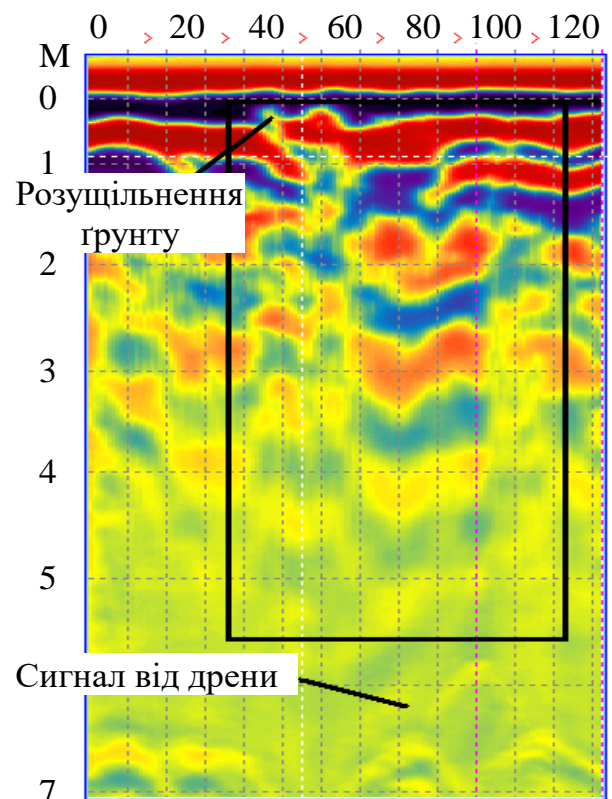


Рисунок 1.27 – Радарограма поперечного електромагнітного профілювання: ПП 2 – по лівому узбіччю насипу

ПП 2. На ПК 3804+35 - ПК 3805+20 (L=85 м) – на глибині від 0,3 м до 5,6 м наявні зони розуцільнення ґрунту над залізобетонною трубою (дреною), особливо спостерігається на ПК 3804+40 – ПК 3804+60 (L=20 м). ПК 3804+65 – на глибині 6,0 м сигнал від залізобетонної труби-дрени (рис 1.27).

ПП 3. На всій протяжності поперечного електромагнітного профілю виявлено розуцільнення ґрунту глибиною від 0,3 до 2,5 м.

ПП 4. На ПК 3804+55 – ПК 3804+75 (L=20 м), ПК 3804+85 – ПК 3805+20 (L=35 м) – на глибині від 0,5 до 5 м наявні зони розуцільнення ґрунту. ПК 3804+60 – на глибині 5,0 м сигнал від залізобетонної труби-дрени (рис. 1.28).

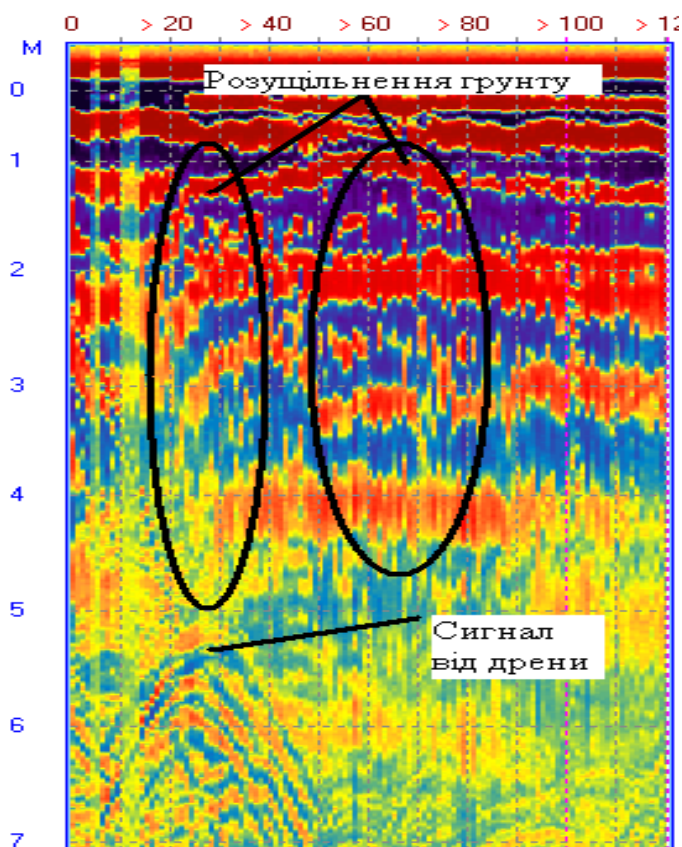


Рисунок 1.28. – Радарограма поперечного електромагнітного профілювання: ПП 4 – по правому узбіччі насипу

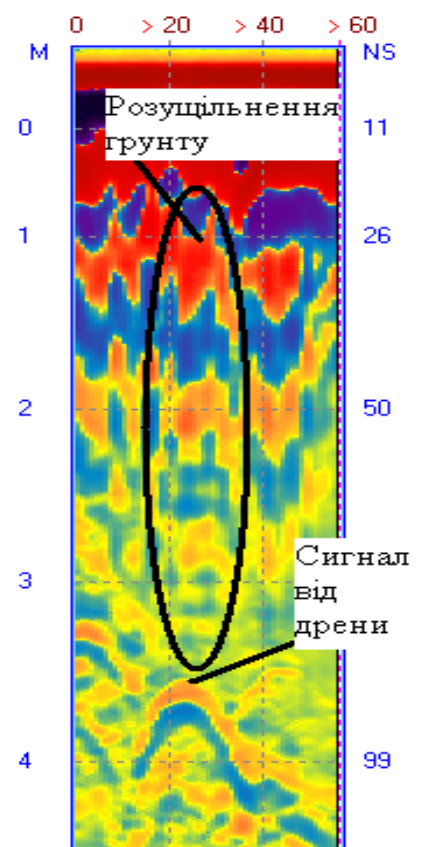


Рисунок 1.29. – Радарограма поперечного електромагнітного профілювання: ПП 5 – по правій підшві насипу

ПП 5. На ПК 3804+55 – ПК 3804+75 (L=20 м) – на глибині від 0,5 м до 3,5 м наявні зони розуцільнення ґрунту. ПК 3804+60 – на глибині 3,5 м сигнал від лінійно протяжного об'єкта, тобто залізобетонної труби (дрени) рис 1.29.

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 та вибору ефективного способу підвищення несучої здатності земляного полотна.

Тому, якісний аналіз георадіолокаційних даних може бути використаний для подальшого більш детального дослідження виявленої неоднорідності ґрунтового шару земляного полотна, із залученням інших геофізичних методів, що дасть можливість мінімізувати кількість робіт та втручань по усуненню неоднорідності земляного полотна, а також забезпечити моніторинг технічного стану.

1.6. Теоретичні передумови, мета і задачі досліджень

Аналіз науково-технічної літератури показує, що значна кількість ділянок земляного полотна залізниць знаходиться у технічно несправному стані, що збільшує експлуатаційні витрати та зменшує пропускну спроможність залізниць. Встановлено, що на сьогоднішній день протяжність земляного полотна, схильного до деформацій складає 870,8 км. А додаткове збільшення швидкості руху чи осьового навантаження призведе до збільшення кількості ділянок із недостатньою несучою здатністю земляного полотна.

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 і забезпечується стабільна робота земляного полотна при вібродинамічній дії рухомого навантаження.

Для попередження раптових деформацій важливим завданням є своєчасне виявлення потенційно небезпечних для руху поїздів ділянок земляного полотна. Для цього необхідно здійснювати діагностику всіх проблемних насипів, що експлуатуються тривалий термін із залученням сучасних методів і технічних засобів.

Тому питання моніторингу та контролю якісного ущільнення неоднорідного земляного полотна є актуальним і потребує розробки експериментальної та теоретичної методики оцінки ступеня його ущільнення упродовж всього циклу роботи земляного полотна.

Із аналізу науково-дослідних робіт встановлено, що на сьогоднішній день відсутні методики достовірного визначення ущільнення неоднорідного земляного полотна залізничної колії.

Отже, питання моніторингу та контролю якісного ущільнення ґрунтів засипки є актуальним і потребує розробки експериментальних методів оцінки ступеню ущільнення.

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 та місця встановлення дренажів пропонується виконувати георадіолокаційним методом та методом на основі імпульсного відклику.

Отже, розробка і впровадження нових технологій ремонту та моніторингу існуючого неоднорідного земляного полотна на залізницях України, є актуальною на сьогоднішній день задачею дисертаційної роботи. Тому **метою роботи** є розробка методів оцінювання та підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна, яке зазнає дії статичних та динамічних навантажень від транспортних засобів і впливу надмірного перезволоження. Для досягнення зазначеної мети необхідно розв'язати наступні **завдання**:

- провести аналіз науково-дослідних робіт стосовно методів оцінки та підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна;
- провести експериментальну оцінку технічного стану неоднорідного земляного полотна залізничної колії георадіолокаційним методом;
- удосконалити аналітичну методику та провести визначення несучої здатності неоднорідного земляного полотна із врахуванням величини статичного та динамічного навантажень від транспортних засобів;
- розробити пристрій для експериментальних досліджень ступеня ущільнення земляного полотна та провести експериментальні дослідження ступеня ущільнення однорідного та неоднорідного земляного полотна у лабораторних умовах і в умовах експлуатації;
- провести чисельний розрахунок напружено-деформованого стану армованого земляного полотна з різною комбінацією розташування трубчастих дренажів;
- розробити рекомендації із підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна в умовах експлуатації.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ОЦІНКИ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ НЕОДНОРІДНОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ПРИ ДІЇ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВІД РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

2.1. Натурні експериментальні вимірювання прогинів рейок під дією рухомого складу залізниць

Як вже зазначалось у першому розділі, земляне полотно є найвідповідальнішою спорудою залізничної колії, від його технічного стану залежить безпека руху, геометричний стан рейкової колії та експлуатаційні витрати на її поточне утримання.

При визначенні несучої здатності земляного полотна слід враховувати зниження міцнісних характеристик ґрунтів, під дією вібродинамічного впливу, інерційних сил, що виникає при коливанні ґрунтів [97].

На несучу здатність земляного полотна одночасно впливають ряд факторів: виконання робіт по його утриманню, стан водопропускних споруд, атмосферні опади, навантаження транспортних засобів. Крім цих факторів важливим також є той фактор стану земляного полотна внаслідок неоднорідної геологічної будови та слабких ґрунтів земляного полотна насипу й основи, тобто наявності «хворого» земляного полотна.

Вплив транспортних засобів полягає у створенні статичного та динамічного навантаження на шпали, баластну призму та земляне полотно. З однієї сторони, статичне динамічне навантаження приводить до збільшення зсувних напружень, яке при перевищенні допустимого значення викликає пластичні деформації, а з іншої сторони, динамічне вібраційне навантаження приводить до втрати між частинками ґрунту реакції тертя та зчеплення.

Величина навантаження рухомого складу, залежить від різних факторів рухомого складу та колії, швидкостей руху та інших. Тому для оцінки несучої здатності земляного полотна виконується розрахунок вертикальних сил, що виникли при русі поїздів.

Якщо сили, що виникають від поїзного навантаження не гасяться в елементах верхньої будови колії та ґрунтових шарах нижньої будови, то вважається, що несуча здатність земляного полотна є не забезпеченою, і як наслідок виникає потреба у відновленні земляного полотна.

Із збільшенням навантаження на земляне полотно кількість осідань, деформацій, зсувів і ін., збільшується особливо на ділянках, які експлуатуються досить довгий термін, що підтверджується в праці [98].

У праці [99] автором запропоновано модель напружено-деформованого стану залізничної колії на основі хвильової теорії поширення напружень, яка може бути використана для обґрунтування конструкції колії або встановлення відповідних допустимих значень швидкості руху.

У праці [100] авторами розроблено метод розрахунку напружено-деформованого стану земляного полотна та залізничної колії при їх спільній роботі на основі осесиметричної стовбчастої моделі ґрунтової основи, яка враховує неоднорідність (шаруватість) по глибині. При цьому запропонований алгоритм дозволяє визначати як переміщення основи, так і напружений стан, що, в свою чергу, дозволяє оцінити несучу здатність неоднорідного земляного полотна.

Залишкові деформації неминучі з урахуванням початкової неоднорідності ґрунтового шару та динамічних навантажень від руху поїздів. Першими признаками погіршення стану підшпальної основи є просідання шпал. Наслідком цього є виникнення неоднорідностей та дефектів земляного полотна. Отже, розробка методу діагностики підшпальної основи, моніторинг і подальше планування технічного обслуговування є правильним напрямком у зниженні затрат на поточне утримання залізничної колії.

Підхід до моніторингу стану підшпальної основи з використанням інерційних вимірювань представлений у праці [101]. Даний підхід пропонує ідентифікацію прогину шпали, модуля пружності колії та положення спокою.

Приведений вище літературний аналіз показує широкий спектр досліджень впливу розущільнення земляного полотна та баластного шару на динамічну поведінку та геометрію колії. Однак більшість досліджень ґрунтуються на

теоретичних дослідженнях з низьким експериментальним обґрунтуванням, оскільки неоднорідне земляне полотно через складну конфігурацію фізико-механічних властивостей потребує спеціальних методів дослідження. Більше того, фізико-механічні властивості неоднорідного земляного полотна схильні швидко змінюватись при дії на нього різних чинників таких як волога, вібрації, замерзання і т. д.

2.2. Методика проведення експериментальних вимірювань

Одним із проявів перезволоженого розущільненого земляного полотна є просідання рейко-шпальної решітки та забруднення баласту частинками ґрунту внаслідок динамічної роботи конструкції. Також важливим індикатором є тертя частинок матеріалу баласту між собою або подрібнення, яке видно у вигляді білих плям на баласті. Таке явище спостерігається у місцях де присутнє дефектне земляне полотно на значній протяжності у декілька шпал, що спричиняє великі прогини колії та знос баластного матеріалу. Тому для досліджень було проведено експериментальні дослідження земляного полотна ділянці Львів–Красне Львівської залізниці. Натурні експериментальні вимірювання прискорень виконувались на ділянці залізничної колії в межах якої є дефектне місце. Одне з таких проблемних місць показано на рис. 2.1.

Для отримання точної інформації про стан залізничної колії, з метою подальшої оцінки несучої здатності земляного полотна, потрібен надійний та швидкий спосіб вимірювання певних її параметрів.

Тому для проведення експериментальних вимірювань у роботі запропоновано інерційну систему. Суть якої полягає в тому, що в її основі лежить вимірювання прискорень п'ятьма акселерометрами у п'ятьох точках залізничної колії при русі рухомих транспортних засобів за допомогою аналого-цифрового перетворювача та персонального комп'ютера (рис. 2.2).

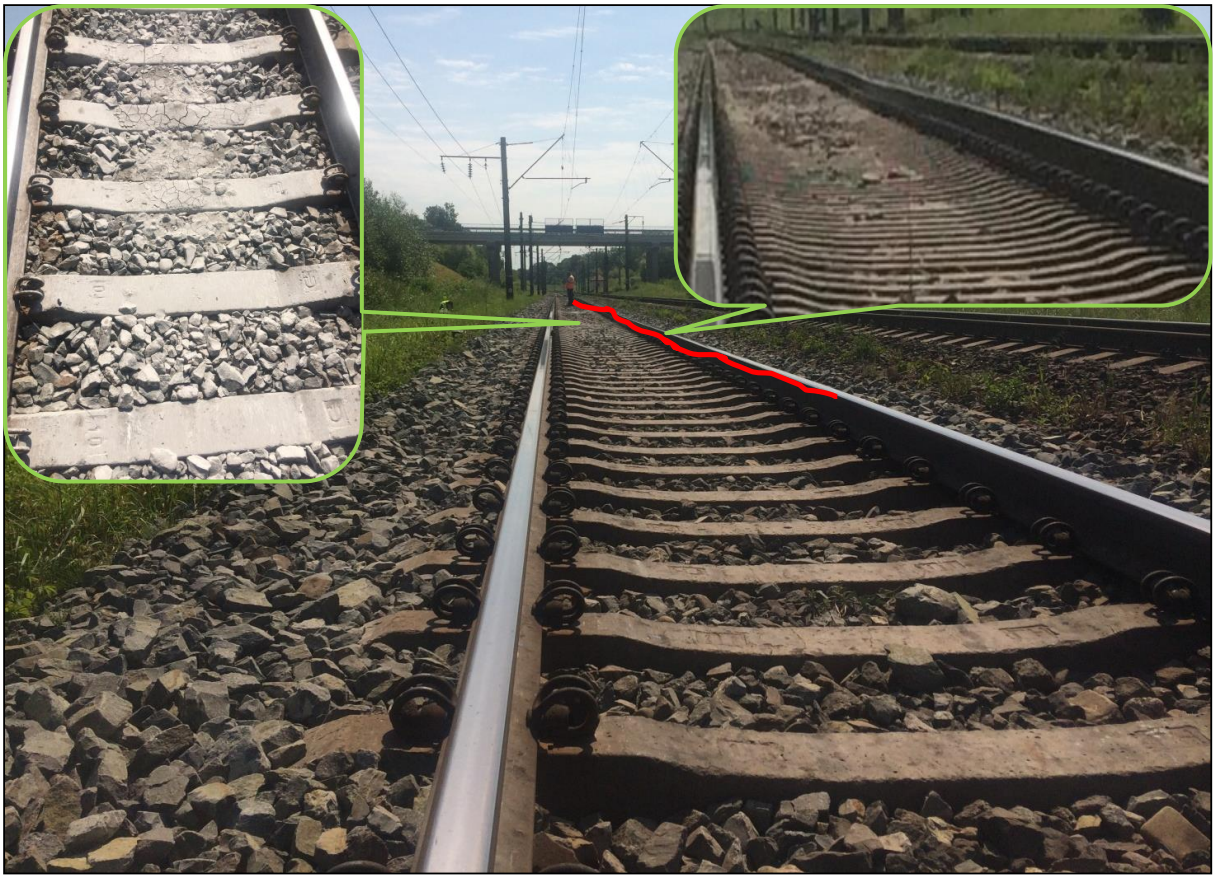


Рисунок 2.1 – Дефектна ділянка залізничної колії

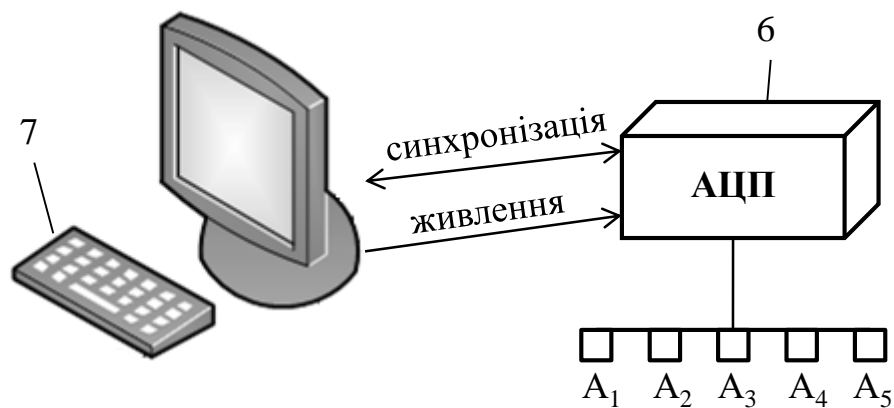


Рисунок 2.2 – Запропонована схема інерційних вимірювань земляного полотна

При проведенні вимірювань сигнал від аналогових датчиків прискорень 1-5 надходить на вхід АЦП, де визначаються параметри вимірюного сигналу і засобами програмного забезпечення виводяться на екран ПК 7 та, з метою подальшого використання та опрацювання, накопичуються у пам'яті ПК 7. Живлення для забезпечення роботи акселерометрів та АЦП 6 використовується від ПК 7 (рис. 2.2) [102].

2.3. Результати натурних експериментальних вимірювань земляного полотна

Одна частина датчиків прискорень розташовувалась поза межами дефектного місця, інша – в дефектному (рис. 2.3), з метою порівняння результатів і отримання залежностей.

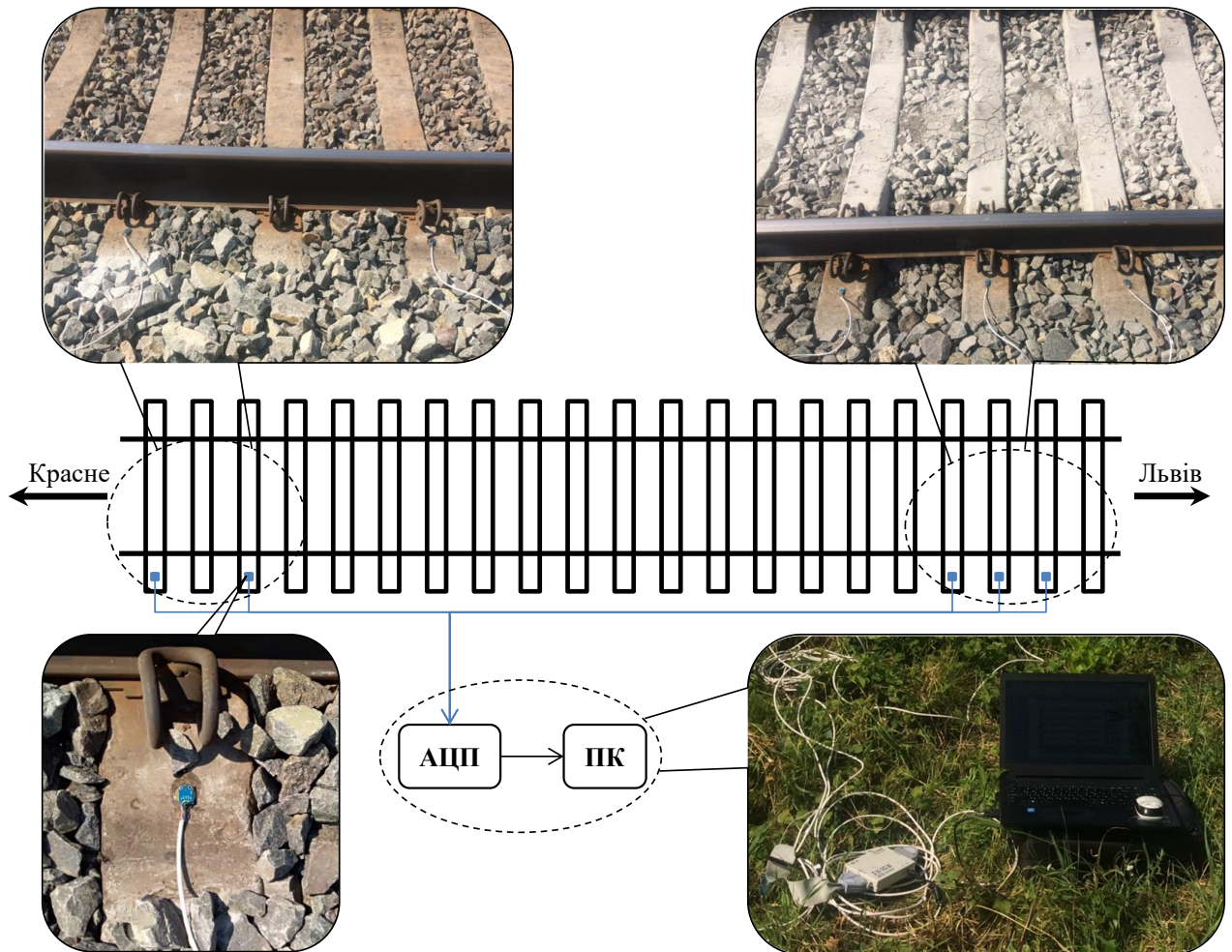


Рисунок 2.3 – Схема експериментальних вимірювань земляного полотна на ділянці колії Львів–Красне

Вимірювання прискорень здійснювалось при проходженні різних типів поїздів: вантажний поїзд та пасажирський поїзд. Програма експериментальних досліджень наведена у табл. 2.1.

Результати експериментальних вимірювань, прискорень та переміщень земляного полотна, приведені на рис.2.4 – 2.7. Для отримання переміщень використано метод подвійного інтегрування сигналу прискорень.

Програма експериментальних досліджень

№ п/п	Тип рухомого складу	Швидкість
1	Вантажний поїзд	50
2	Пасажирський поїзд	60
3	Колійна техніка (дрезина)	55
4	Маневровий тепловоз (ЧМЕЗ)	60

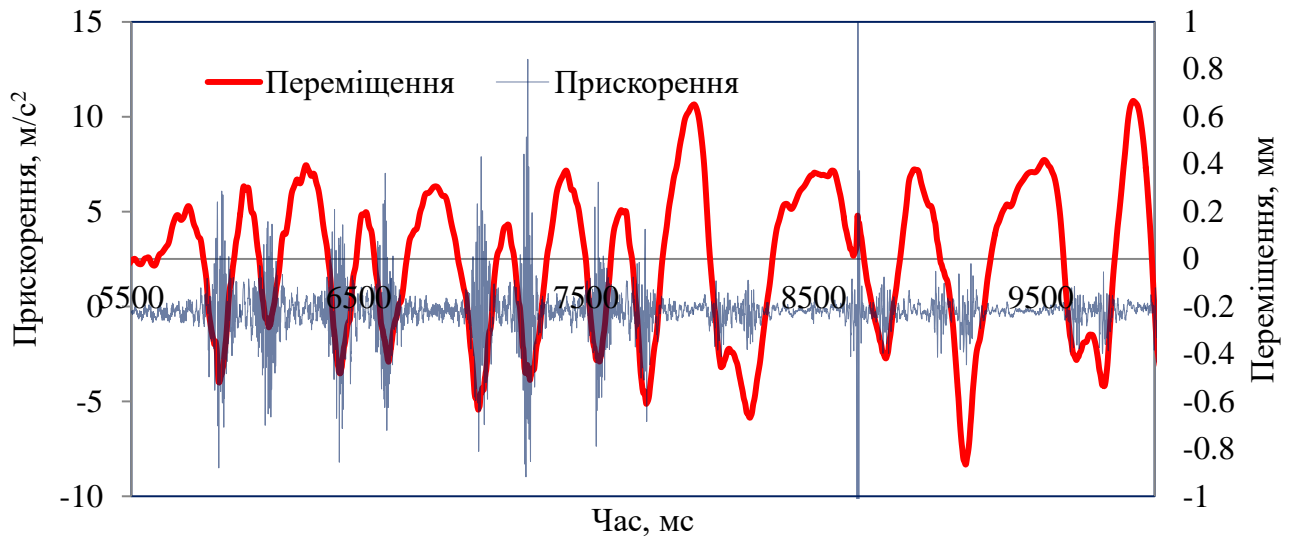


Рисунок 2.4 – Результати запису прискорень та прогинів земляного полотна у технічно справному земляному полотні при проходженні вантажного поїзда

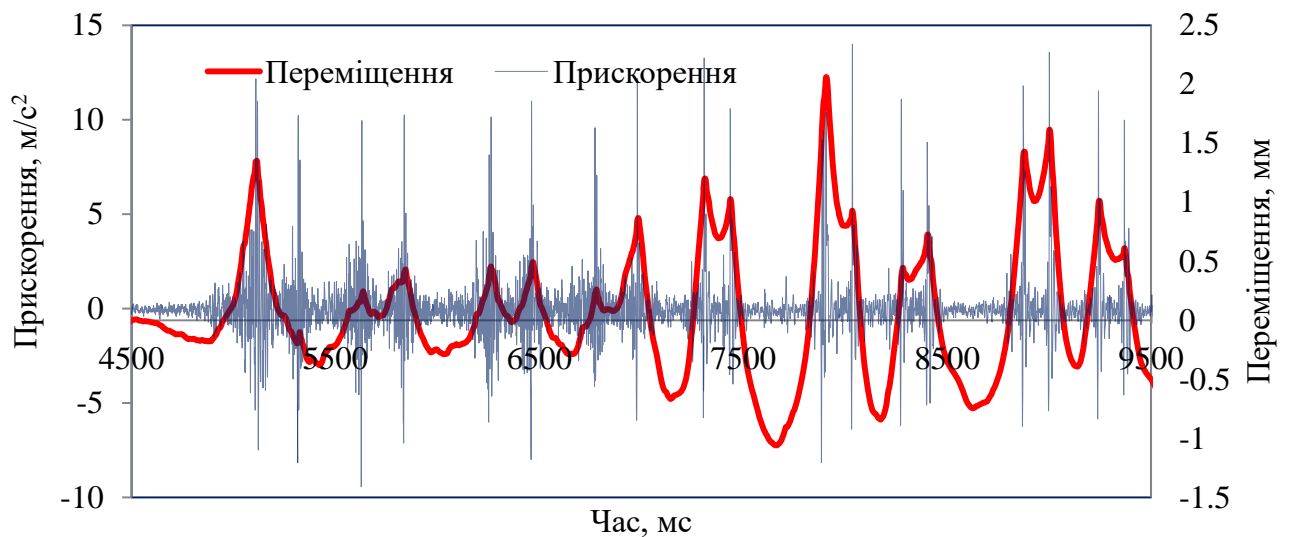


Рисунок 2.5 – Результати запису прискорень та прогинів земляного полотна у технічно несправному (дефектному, “хворому” місці) земляному полотні при проходженні вантажного поїзда

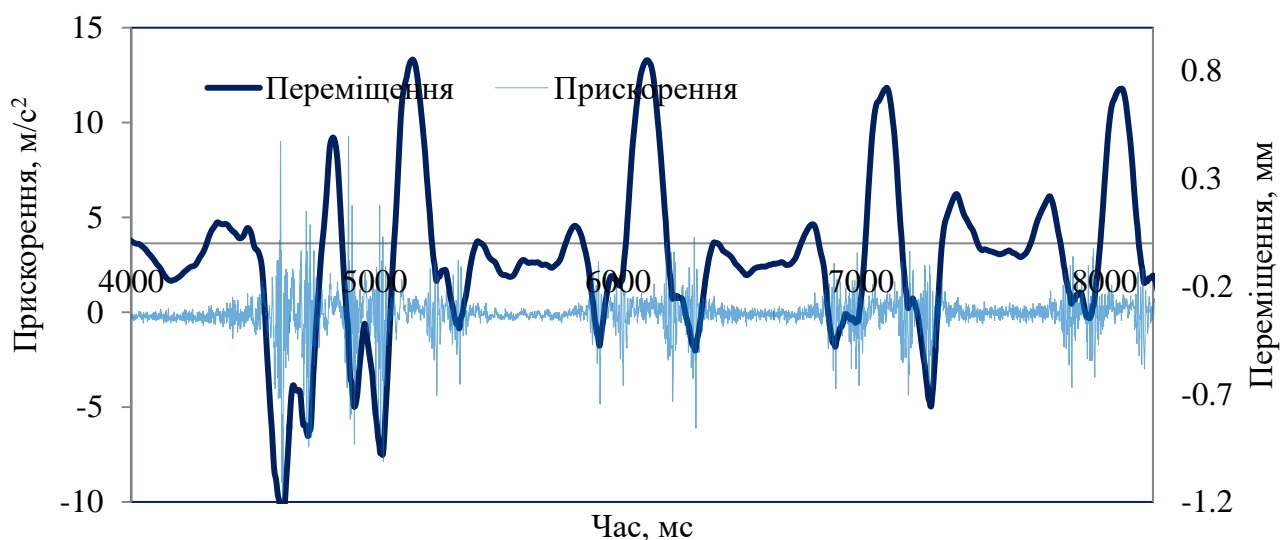


Рисунок 2.6 – Результати запису прискорень та прогинів земляного полотна у технічно справному земляному полотні при проходженні пасажирського поїзда

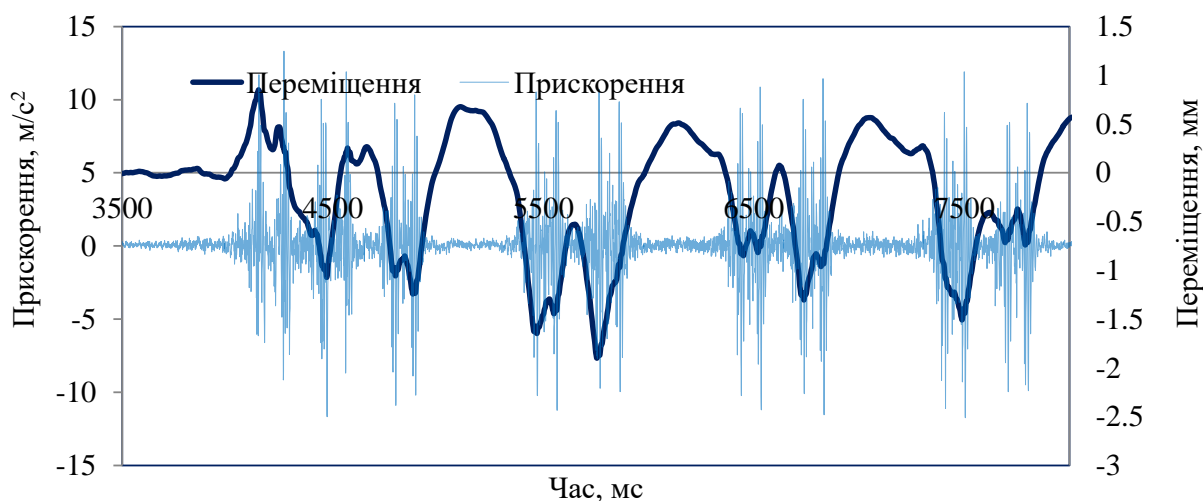


Рисунок 2.7 – Результати запису прискорень та прогинів земляного полотна у технічно несправному (дефектному хворому місці) земляному полотні при проходженні пасажирського поїзда

Аналіз експериментальних даних показує, що ділянки з дефектним (неоднорідним) земляним полотном характеризуються великим значенням прогинів рейки, що пов'язано із збільшенням динамічного впливу. Динамічну дію можна чітко побачити на результатах виміру прискорень рейки, на ділянці з неоднорідностями прискорення швидко зростають. Також для прогнозування розвитку поведінки неоднорідностей земляного полотна потрібно розглянути різні варіанти розрахунку за допомогою математичного моделювання з метою

визначення навантажень від колеса на рейку.

Проаналізувавши записи прискорень при проходженні вантажного поїзда рис. 2.4 – 2.5 бачимо, що величина прискорень у технічно справному земляному полотні становить до 9 м/с^2 , а максимальне переміщення $0,9 \text{ мм}$. У технічно несправному (дефектному, “хворому” місці) земляному полотні величина прискорень становить 13 м/с^2 , а максимальне переміщення $2,1 \text{ мм}$.

Проаналізувавши записи прискорень при проходженні пасажирського поїзда рис. 2.6 – 2.7 бачимо, що величина прискорень у технічно справному земляному полотні становить до 7 м/с^2 , а максимальне переміщення $0,8 \text{ мм}$. У технічно несправному (дефектному, “хворому” місці) земляному полотні величина прискорень становить 13 м/с^2 , а максимальне переміщення $1,9 \text{ мм}$.

2.4. Методика визначення навантажень на основну площадку земляного полотна під дією рухомого складу

2.4.1 Розрахунок вертикальних сил, що виникають при русі поїздів

Рухомий склад, що рухається по залізничній колії, передає динамічне навантаження на рейки, шпали баласт та земляне полотно. Сили дії рухомого складу залежать від ряду факторів, серед яких найважливішими є вага рухомого складу, швидкість руху, механічні характеристики підвіски та ходових частин рухомого складу, геометричний стан залізничної колії та її механічні характеристики. Вертикальні сили дії рухомого складу на колію та розподіл цих сил в елементах колії визначаються згідно діючих на залізницях України Правил [103]. Розподіл вертикальних сил від рухомого складу на рейки визначається за методами ряду авторів [104, 105, 106].

Розрахунок вертикальних сил дії шпали на баласт складається із розрахунку вертикальних динамічних навантажень дії рухомого складу на рейки та розрахунку розподілу вертикальних сил на рейки в елементах колії [103].

Відомо, що напруження всередині баластного шару і на основній площадці земляного полотна залежать від величини тиску шпал на баласт та місця розташування розрахункової точки [103]. Розрахункова схема для визначення

напружень в баласті і на основній площадці земляного полотна наведена на рис. 2.8 і рис. 2.9 [103].

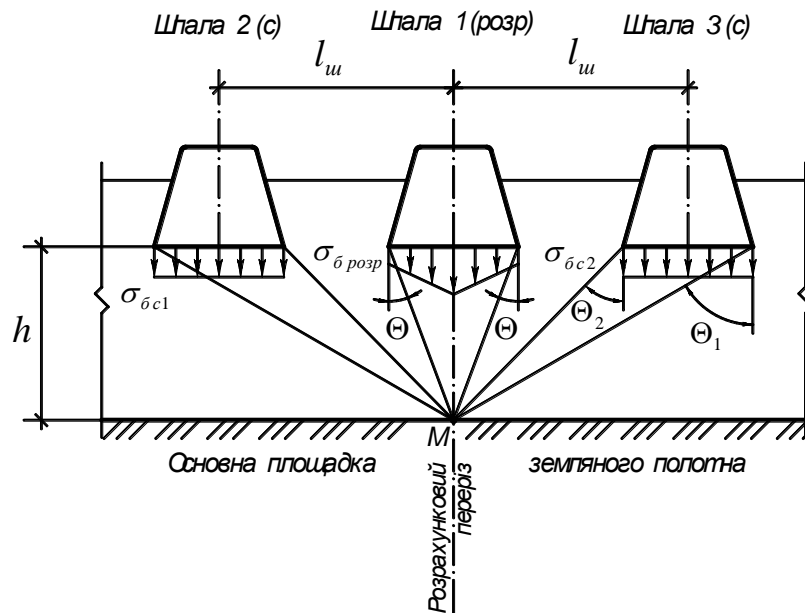


Рисунок 2.8 – Схема передачі тиску на земляне полотно від трьох суміжних шпал [103].

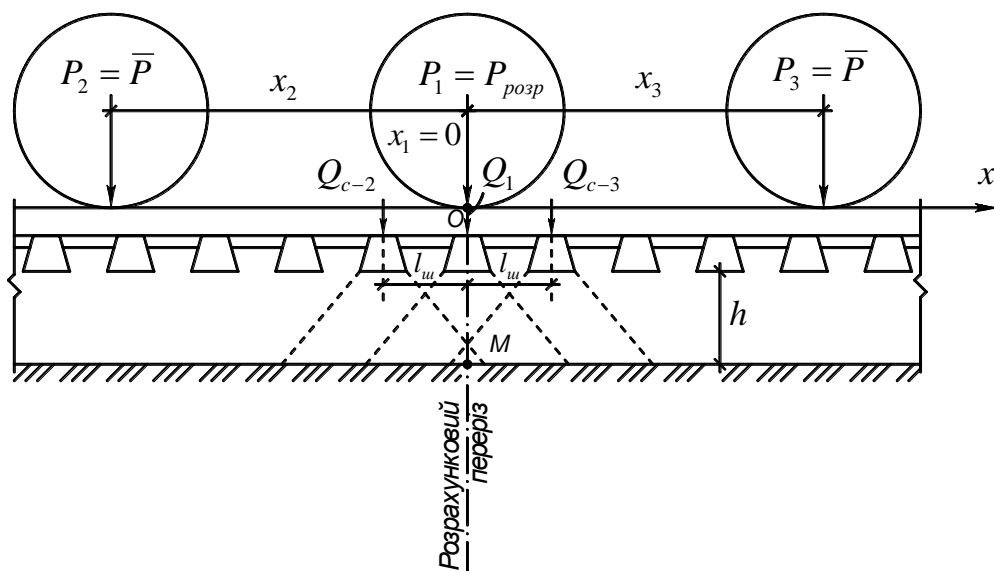


Рисунок 2.9 – Розрахункова схема для визначення напружень в баласті і на основній площадці земляного полотна [103]

Розрахунок розподілу вертикальних сил дії рухомого складу на рейки у елементах колії виконується згідно [103]. Для розрахунку вертикальних сил приймали найбільш поширені типи рухомого складу в АТ “Укрзалізниця”, а

саме тяговий рухомий склад ВЛ10, ВЛ60, ВЛ80, ЧС-7, ЧС200, ТЭ10, ТЭП70, М62, ЧМЕЗ та вагон вантажний на візках типу ЦНИИ-ХЗ-0. Результати розрахунку вертикальних сил дії рухомого складу наведені на рис. 2.10 та у табл. А.1 Додатку А дисертаційної роботи.

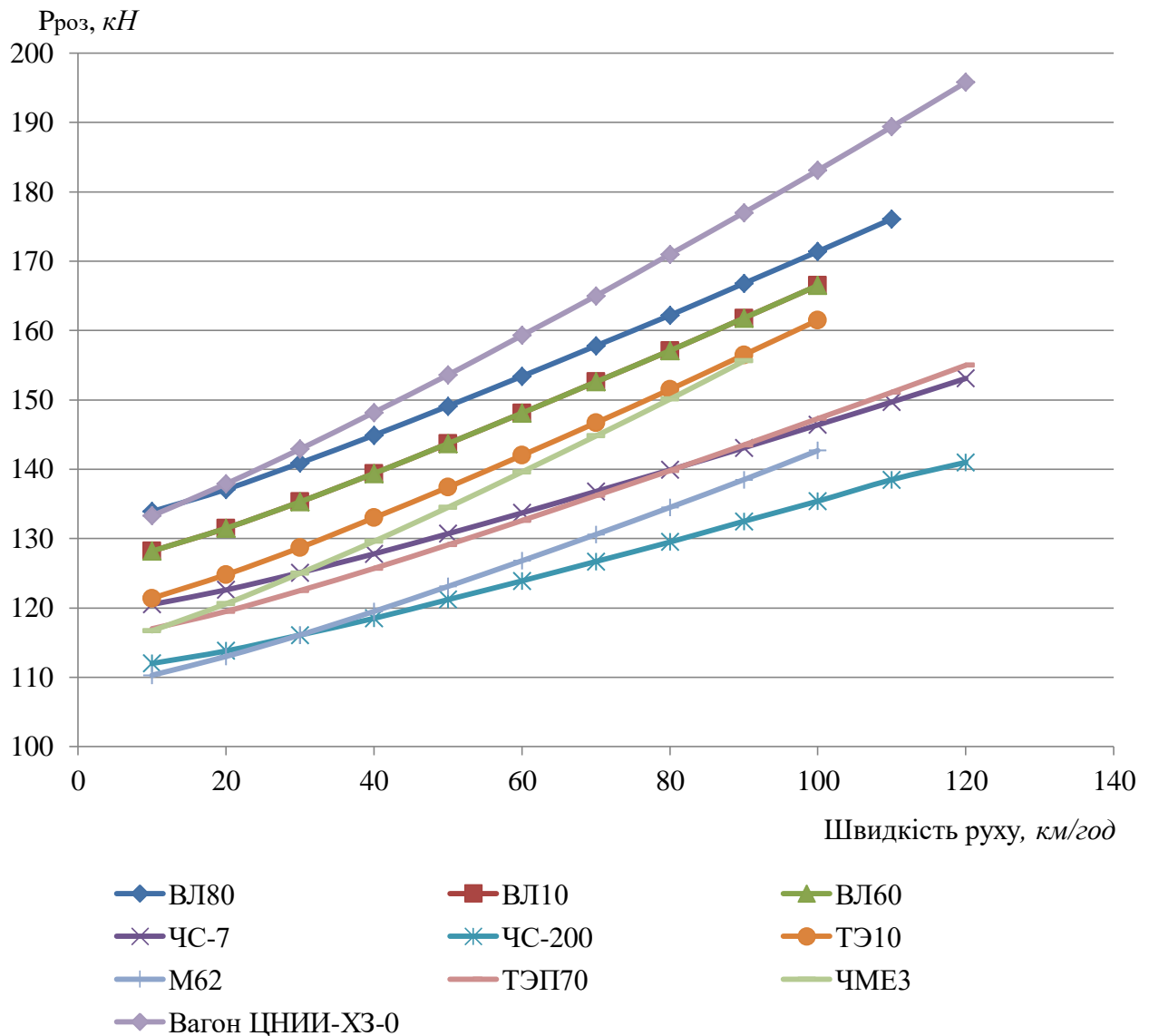


Рисунок 2.10 – Значення розрахункових вертикальних сил дії рухомого складу в залежності від його типу та швидкості руху

Як видно з графіку на рис. 2.10 при зміні швидкості рухомого складу від 10 до 120 км/год значення розрахункової сили зростає. Найменші значення розрахункової сили, виникає від електровоза ЧС-200 і становить 110 кН при швидкості 10 км/год та 141 кН при швидкості 120 км/год. При зростанні

швидкості від 10 до 120 км/год значення розрахункової сили збільшується на 28,1 %.

Найбільші значення розрахункової сили виникає від електровоза ВЛ80 і становить 133,9 кН при швидкості 10 км/год та 176,1 кН при швидкості 110 км/год (110 км/год є максимальною швидкістю для цього типу локомотива). При зростанні швидкості від 10 до 110 км/год значення розрахункової сили збільшується на 31,5 %. Якщо порівнювати значення максимальної розрахункової сили при швидкості 110 км/год для ЧС-200 та ВЛ80 різниця становить 27,1 %.

Також слід зазначити, що значення розрахункової сили, яка виникає від вантажного вагона ЦНИИ-ХЗ-0 є більшим за всі значення від тягового рухомого складу. Як видно з рис. 2.10 при швидкості 10 км/год значення цієї сили навіть менше за значення від локомотива ВЛ-80 і становить 133,3 кН для вагона, та 133,9 кН для локомотива. Але зі зростанням швидкості значення розрахункової сили вантажного вагона ЦНИИ-ХЗ-0 суттєво зростає і при швидкості 110 км/год становить 189,4 кН, що є більшим на 7,5% для локомотива ВЛ80 при такій же швидкості.

Тому в подальших розрахунках для визначення навантажень на земляне полотно будемо застосовувати параметри та характеристики рухомого складу залізниць який створює найбільше навантаження, а саме локомотив ВЛ80 та вагон ЦНИИ-ХЗ-0.

При визначенні несучої здатності земляного полотна важливою є кількісна оцінка взаємозв'язків впливу факторів стану та характеристик, як самого земляного полотна, так і верхньої будови колії із врахуванням навантажень транспортних засобів.

На даний час на практиці найбільш застосовується модель пружних та пластичних деформацій земляного полотна на основі методу кінцевих елементів та критеріїв пластичності Мора-Кулона чи Друкера-Прагера. Виходячи із практичної можливості отримання інформації про характеристики ґрунтів та особливості земляного полотна залізниць, а також необхідної

точності розрахунків, оптимальною є задача пружності та пластичності у плоскій постановці. Крім розробки моделі, важливим є врахування впливу на механічні характеристики ґрунтів у поперечному перерізі тіла земляного полотна вібраційного навантаження транспортних засобів.

2.5. Методика розрахунку динамічних навантажень на земляне полотно

Для розрахунку вібраційного розладнання ґрунтів виконується розрахунок ударно-вібраційного навантаження колеса рухомого складу та динамічних напружень, що передаються на баластну призму. У розрахунку ударно-вібраційного навантаження враховуються основні складові вібраційних коливань при можливій їх комбінації та заданому рівні статистичної надійності. Для визначення розподілу коливань у поперечному перерізі насипу розробляється модель динамічних коливань із використанням методу кінцевих елементів. Вплив розрахованого розподілу амплітуд коливань ґрунтів на їх параметри міцності розраховується із використанням методик описаних у працях [107, 108, 109].

2.5.1. Розрахунок ударно-вібраційних навантажень рухомого складу

Даний розрахунок проводиться для визначення розподілу амплітуди коливань A у земляному полотні та подальшої оцінки впливу ударно-вібраційних навантажень на параметри міцності $C_{дн}$ та $\varphi_{дн}$ для кожного ґрунту земляного полотна. Для цього використовується розроблена модель динамічних коливань земляного полотна у поперечній площині. Вихідними даними розрахунку є:

1) механічні властивості ґрунтів, що отримані з результатів геологічної зйомки та довідкової літератури: модуль деформації U , питома вага m та коефіцієнт Пуассона ν ;

2) зовнішні вібраційні навантаження на баластний шар при заданій швидкості рухомого складу: приймається у вигляді суми імпульсів гармонійних функцій:

$$F(t) = F_p(t) + F_{нк}(t) + F_{інк}(t) + F_{бнк}(t), \quad (2.1)$$

Згідно [103] сумарне середнє відхилення динамічного вертикального навантаження колеса на рейку \bar{S} , кН, визначається за формулою композиції законів розподілу його складових:

$$S = \sqrt{S_p^2 + S_{нк}^2 + 0,05S_{інк}^2 + 0,95S_{бнк}^2}. \quad (2.2)$$

де: S_p – середньоквадратичне відхилення сили динамічного навантаження від коливань надресорної ваги екіпажу; $S_{рн}$ – середньоквадратичне відхилення динамічного навантаження колеса при проході ізольованої нерівності на рейковій нитці; $S_{інк}$ – середньоквадратичне відхилення динамічного навантаження колеса від наявності на поверхні кочення ізольованих нерівностей; $S_{бнк}$ – середньоквадратичне відхилення динамічного навантаження колеса на рейку від наявності на колесі безперервної нерівності.

Із врахуванням (2.2) та виходячи з умови, що результуюче динамічне навантаження на баластний шар повинно відповідати розрахованому по формулі $p_{ш}^{\text{дин}} = k_d p_{ш}$, отримуємо:

$$F(t) = p_{ш}^{\text{дин}} \left(\begin{array}{l} \frac{S_p^2}{S^2} \sin\left(\frac{2\pi}{T_p} t\right) + \frac{S_{нк}^2}{S^2} \sin\left(\frac{2\pi}{T_{нк}} t\right) + \\ + 0,05 \frac{S_{інк}^2}{S^2} \sin\left(\frac{2\pi}{T_{інк}} t\right) + 0,95 \frac{S_{бнк}^2}{S^2} \sin\left(\frac{2\pi}{T_{бнк}} t\right) \end{array} \right), \quad (2.3)$$

де: $p_{ш}^{\text{дин}}$ – амплітуда динамічної сили дії шпал на баласт на 1 пог.м колії обчислюється згідно правил розрахунку колії на міцність [103]; S_p^2 , $S_{нк}^2$, $0,05S_{інк}^2$, $0,95S_{бнк}^2$ – компоненти композиції законів розподілу середнього відхилення динамічного вертикального навантаження (2.2); T_p , $T_{нк}$, $T_{інк}$, $T_{бнк}$ – період ударно-вібраційного навантаження, обчислюється з наступних міркувань.

В основі обчислень величини динамічного навантаження рухомого складу на колію, що розраховується за [103], покладено правило суперпозиції сил, яке враховує сумарну дію усіх динамічних навантажень різного періоду коливань: від 10-50 м при коливаннях надресорної маси вагона, 3-5 м від нерівностей

залізничної колії до 15-20 см при ізольованих нерівностях коліс рухомого складу. Для даного розрахунку є важливими лише ті частоти коливань, які відповідають експериментальним дослідженням вібраційного розладнання ґрунтів – 11-50 Гц [107, 108]. Складова коливань надресорної будови у формулі (2.1) у діапазоні швидкостей до 55 км/год відповідає частотам 0,5-2 Гц, тому із розрахунку завідома відкидається.

Період коливань для складової від нерівності колії $T_{нк}$ визначається у залежності від швидкості рухомого складу V та довжини $L_{нер}$ хвилі нерівності:

$$T_{нк} = \frac{L_{нер}}{V}. \quad (2.4)$$

Дослідженнями [110] було показано, що вертикальні нерівності осідання при певних параметрах механічних властивостей колії мають певне переважаюче значення, що наближається до довжини пружної лінії рейки. Автори Гудехус, Хольцендорф [110] наводять формулу (2.5) для визначення переважаючої довжини хвилі нерівності $L_{нер}$, що також враховує характеристики рухомого складу:

$$L_{нер} = 2\pi \sqrt{\frac{q_k V_g^2}{2gU_z} + \sqrt{\left(\frac{q_k V_g^2}{2gU_z}\right)^2 + \frac{EI}{U_z}}}, \quad (2.5)$$

де: q_k – невідресорена вага рухомого складу, кН; V_g – переважна швидкість руху на ділянці, м/с; EI – згинальна жорсткість рейки; U_z – модуль пружності підрейкової основи, МН/м на 1 п.м. колії.

Період коливань для складової формули (2.1) від безперервної нерівності колеса $T_{бнк}$ визначається у залежності від швидкості рухомого складу V та довжини поверхні кочення колеса:

$$T_{бнк} = \frac{\pi d}{V}, \quad (2.6)$$

де d – діаметр колеса.

Період коливань для складової формули (2.1) від ізольованої нерівності колеса $T_{інк}$ визначається виходячи з того, що максимальний динамічний прогин

виникає при наступному співвідношенні періодів вимушених коливань за час обертання колеса з нерівністю T_0 до періоду власних вільних коливань системи “колесо-колія” T_ψ :

$$\frac{T_0}{T_\psi} = 0,71. \quad (2.7)$$

При цьому згідно праць [111, 112] відомо, що період власних вільних коливань системи “колесо-колія” T_ψ визначається:

$$T_\psi = 2\pi \sqrt{\frac{m_q + m_k}{K_{Zo}}}, \quad (2.8)$$

де m_q, m_k – приведені маси відповідно колеса та колії.

Приймаючи до уваги, що $m_k = \alpha_n \cdot m_q$, [103] то формула (2.8) набуває вигляду:

$$T_\psi = 2\pi \sqrt{\frac{m_q(1 + \alpha_n)}{K_{Zo}}} = 2\pi \sqrt{\frac{q_k(1 + \alpha_n)}{gK_{Zo}}}. \quad (2.9)$$

Згідно [103] рекомендується приймати $\alpha_n = 1,48$ для колії із залізобетонними шпалами. Результати розрахунку складових формули (2.2 та 2.1) $S_{нк}^2$, $0,05S_{нк}^2$, $0,95S_{онк}^2$ та їх періодів коливань $T_{нк}$, $T_{інк}$, $T_{онк}$ у діапазоні швидкостей 10-80 км/год для чотиривісного вантажного вагона на візках ЦНІИ-Х3-0 наведено у табл. 2.2, а для електровоза ВЛ80 – у табл. 2.3.

Розраховані значення складових динамічних сил та їх періодів використовуються для побудови функції ударно-вібраційного навантаження $F(t)$ (2.1), що далі застосовується при моделюванні коливань у земляному полотні. Функція $F(t)$ представлена одним імпульсом навантаження і для забезпечення достатньо плавної її деталізації вибирається такий крок часу, щоб в межах найменшого періоду коливань знаходилось щонайменше 10 точок розрахунку. З багатократним запасом приймається дискретизація часу Δt рівна 0,001 с.

Таблиця 2.2

Компоненти композиції динамічних навантажень та їх періоди коливань для чотиривісного вантажного вагона на візках ЦНІІ-Х3-0

Швидкість руху, км/год	Компоненти композиції навантажень, кН ²				Періоди коливань, с		
	$S_{нк}^2$	$0,05S_{інк}^2$	$0,95S_{онк}^2$	\bar{S}^2	$T_{нк}$	$T_{інк}$	$T_{онк}$
10	0,52	6,77	0,00	8,74	0,356	0,052	0,298
15	1,19	6,77	0,00	9,87	0,237	0,052	0,199
20	2,17	6,77	0,01	11,38	0,178	0,052	0,149
25	3,48	6,77	0,01	13,28	0,142	0,052	0,119
30	5,14	6,77	0,03	15,59	0,119	0,052	0,099
35	7,17	6,77	0,05	18,35	0,102	0,052	0,085
40	9,59	6,77	0,08	21,58	0,089	0,052	0,075
45	12,43	6,77	0,13	25,31	0,079	0,052	0,066
50	15,72	6,77	0,20	29,56	0,071	0,052	0,060
55	19,47	6,77	0,29	34,36	0,065	0,052	0,054
60	23,71	6,77	0,41	39,75	0,059	0,052	0,050
65	28,48	6,77	0,56	45,75	0,055	0,052	0,046
70	33,78	6,77	0,76	52,40	0,051	0,052	0,043
75	39,66	6,77	1,00	59,73	0,047	0,052	0,040
80	46,13	6,77	1,30	67,77	0,044	0,052	0,037

Таблиця 2.3

Компоненти композиції динамічних навантажень та їх періоди коливань для електровоза ВЛ80

Швидкість руху, км/год	Компоненти композиції навантажень, кН ²				Періоди коливань, с		
	$S_{нк}^2$	$0,05S_{інк}^2$	$0,95S_{онк}^2$	\bar{S}^2	$T_{нк}$	$T_{інк}$	$T_{онк}$
10	1,44	3,33	0,00	5,51	0,356	0,087	0,393
15	3,27	3,33	0,00	7,44	0,237	0,087	0,262
20	5,87	3,33	0,01	10,15	0,178	0,087	0,196
25	9,24	3,33	0,01	13,65	0,142	0,087	0,157
30	13,42	3,33	0,03	17,96	0,119	0,087	0,131
35	18,42	3,33	0,05	23,11	0,102	0,087	0,112
40	24,26	3,33	0,08	29,12	0,089	0,087	0,098
45	30,96	3,33	0,13	36,01	0,079	0,087	0,087
50	38,54	3,33	0,20	43,81	0,071	0,087	0,079
55	47,01	3,33	0,30	52,53	0,065	0,087	0,071
60	56,40	3,33	0,42	62,21	0,059	0,087	0,065
65	66,73	3,33	0,58	72,87	0,055	0,087	0,060
70	78,02	3,33	0,78	84,54	0,051	0,087	0,056
75	90,29	3,33	1,03	97,23	0,047	0,087	0,052
80	103,55	3,33	1,34	110,99	0,044	0,087	0,049

$$F_{нк}(t) \quad F_{інк}(t) \quad F_{бнк}(t)$$

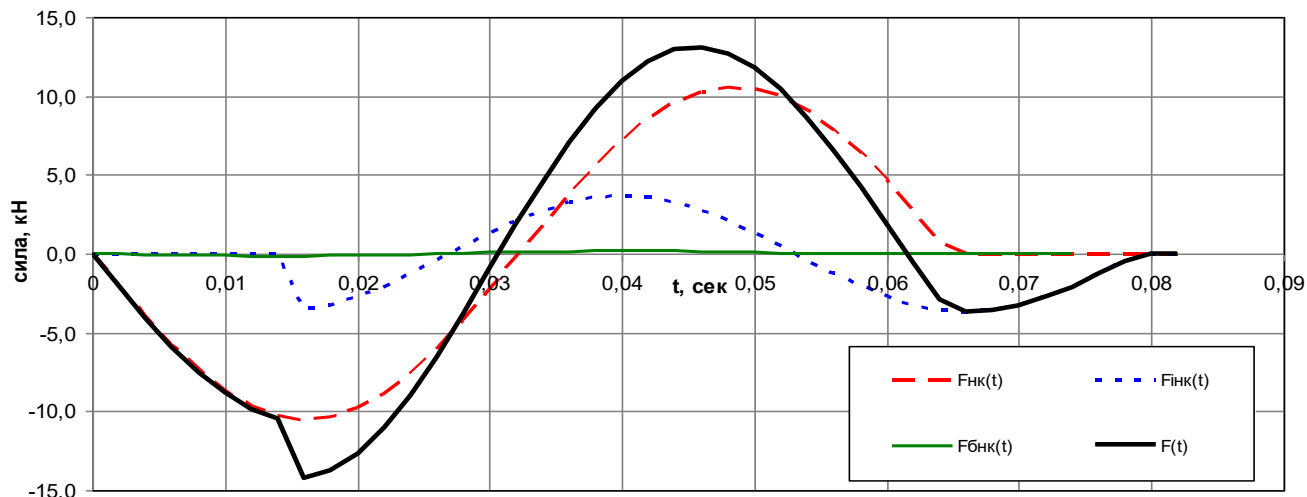


Рисунок 2.11 – Графік зміни у часі сумарного динамічного навантаження на баластний шар та його складових

На графіку (рис. 2.11) наведено зміну у часі сумарного динамічного навантаження на баластний шар та його складових при швидкості рухомого складу 55 км/год.

2.6. Практичне застосування методики розрахунку динамічних навантажень на земляне полотно

Проведемо розрахунок вертикальних динамічних навантажень дії рухомого складу на рейки та вертикальних сил дії шпали на баласт, що можуть виникнути при русі вантажного поїзда по одній із колій залізниці із «хворим» земляним полотном. Навантаження розраховуються при швидкостях руху від 10 до 80 км/год. Вихідні дані до розрахунку наступні.

Розрахункові характеристики рухомого складу зведені в табл. 2.4 і приймаються з [103] та довідкової літератури. Поїзд складається з навантажених чотирьохвісних вагонів на ЦНИИ-ХЗ-0, та одного восьмивісного локомотива ВЛ80. Вага поїзда становить 4800 т, та містить усього 244 осі.

Розрахункові характеристики верхньої будови колії для кривої зведені в табл. 2.5 і приймаються з [103]. Верхня будова колії: конструкція колії – безстикова із рейок Р65 на залізобетонних шпалах.

Таблиця 2.4

Характеристики рухомого складу

№ п/п	Параметри	Рухомий склад	
		електровоз ВЛ80	вантажний вагон на візках ЦНИИ-ХЗ-0
1	Конструктивна швидкість, км/год	110	120
2	Осьова формула	2(2 ₀ -2 ₀)	2 ₀ -2 ₀
3	Статичне навантаження від колеса на рейку, кН:		
	- повне $P_{ст}$ - невідресорене q_k	120 27,6	116,2 9,95
4	Діаметр колеса, d см	125	95
5	Статичний прогин ресор, $f_{ст}$ мм	128	48,0
6	Послідовні відстані між осями, см	300-450-300- 592-300-450- 300	185-660-185
7	Розрахункова глибина ізольованої нерівності на колесі, e_0 , см [16]	0,047	0,067
8	Коефіцієнт f для кривої R=1191 м	1,262	1,241
9	Коефіцієнт $m_{2-к}$ для кривої R=1191 м	1,264	1,256

Таблиця 2.5

Характеристики верхньої будови колії

№ п/п	Параметри	Одиниці виміру	Крива R=1191м, літо
1	2	3	4
1	Коефіцієнт α_1		0,931
2	Коефіцієнт β		0,87
3	Коефіцієнт α_0		0,403
4	Коефіцієнт γ		1,0
5	Коефіцієнт ε		0,322
6	Ширина нижньої постелі залізобетонної шпали	см	27,5
7	Відстань між осями шпал (2000 шт./км)	см	50
8	Момент інерції рейки I (рейки Р65 без зносу)	см ⁴	3548
9	Момент опору Wn (рейки Р65 без зносу)	см ³	436
10	Ефективна опорна площа напівшпали з поправкою на вигин (залізобетонна шпала, літо)	см ²	3380
11	Коефіцієнт впливу роду шпал на напруження на основній площадці земляного полотна r_1		0,7
12	Опорна площа рейкових підкладок	см ²	490
13	Товщина баластного шару	см	45
14	Модуль пружності підрейкової основи, U , (для літа та епюри шпал 2000 шт./км, табл. 5 [103])	МПа	73,5

Для розрахунку несучої здатності земляного полотна необхідно знайти повне динамічне навантаження на баластний шар, приведене до одного погонного метра колії. Для цього по розрахованих напруженнях у баластному шарі визначається середня сила дії напівшпали на баласт $Q_{дин}$:

$$\sigma_{\sigma} = \frac{Q_{дин}}{\Omega \cdot \alpha}; Q_{дин} = \sigma_{\sigma} \cdot \Omega \cdot \alpha. \quad (2.10)$$

Середня сила дії шпали на баласт дорівнює:

$$\sigma_{\sigma} = \frac{Q_{дин}}{\Omega \cdot \alpha}; Q_{ш} = 2Q_{дин}. \quad (2.11)$$

Погонне навантаження від шпал на баластний шар:

$$P_{ш} = \frac{Q_{ш}}{l_{ш}}. \quad (2.12)$$

У табл. 2.6 та 2.7 наведено результати розрахунку сил дії шпали на баласт та погонного навантаження від шпал на баластний шар.

Таблиця 2.6

Результати розрахунку сил дії шпали на баласт та погонного навантаження від шпал на баластний шар для електровоза ВЛ-80

Швидкість руху, км/год	Напруження в баласті, МПа	Середня сила дії напівшпали на баласт, кН	Середня сила дії шпали на баласт, кН	Середня сила дії шпал на баласт на 1 пог,м колії, кН/м
1	2	3	4	5
10	0,119	40,2	80,4	160,9
15	0,121	40,9	81,8	163,6
20	0,123	41,6	83,1	166,3
25	0,125	42,3	84,5	169,0
30	0,127	42,9	85,9	171,7
35	0,129	43,6	87,2	174,4
40	0,130	43,9	87,9	175,8
45	0,132	44,6	89,2	178,5
50	0,134	45,3	90,6	181,2
55	0,136	46,0	91,9	183,9
60	0,138	46,644	93,3	186,6
65	0,14	47,32	94,6	189,3
70	0,142	47,996	96,0	192,0
75	0,144	48,672	97,3	194,7
80	0,146	49,348	98,7	197,4

Результати розрахунку сил дії шпали на баласт та погонного навантаження від шпал на баластний шар для чотиривісного вантажного вагона на візках

ЦНИИ-ХЗ-0

Швидкість руху, км/год	Напруження в баласті, МПа	Середня сила дії напівшпали на баласт, кН	Середня сила дії шпали на баласт, кН	Середня сила дії шпал на баласт на 1 пог,м колії, кН/м
10	0,122	41,2	82,5	164,9
15	0,125	42,3	84,5	169,0
20	0,128	43,3	86,5	173,1
25	0,13	43,9	87,9	175,8
30	0,133	45,0	89,9	179,8
35	0,136	46,0	91,9	183,9
40	0,139	47,0	94,0	187,9
45	0,141	47,7	95,3	190,6
50	0,144	48,7	97,3	194,7
55	0,146	49,3	98,7	197,4
60	0,149	50,4	100,7	201,4
65	0,152	51,4	102,8	205,5
70	0,154	52,1	104,1	208,2
75	0,157	53,1	106,1	212,3
80	0,16	54,1	108,2	216,3

Визначені у табл. 2.7 сили дії шпали на баласт підсумовують усі можливі види коливань рухомого складу із врахуванням їх максимально-ймовірного значення, та використовуються для подальших розрахунків несучої здатності земляного полотна. Окрім впливу максимальних значень навантажень на несучу здатність земляного полотна, його механічні властивості, впливає вібродинамічне навантаження від рухомого складу. Для цього виконується розрахунок динамічної складової навантажень на баластний шар по результатах виконаних розрахунків колії на міцність. Динамічна складова навантажень виражається коефіцієнтом динаміки у наступному вигляді:

$$k_d = \frac{P_{розр} - \bar{P}}{P_{розр}}. \quad (2.13)$$

Маючи значення коефіцієнта динаміки, розраховується динамічна складова погонних навантажень на баластний шар за формулою:

$$P_{ш}^{дин} = k_d P_{ш} \quad (2.14)$$

У табл. 2.8 та 2.9 наведено результати розрахунку динамічної складової погонних навантажень на баластний шар від електровоза ВЛ-80 та чотиривісного вантажного вагона на візках ЦНІІІ-ХЗ-0.

Таблиця 2.8

Результати розрахунку динамічної складової погонних навантажень на баластний шар для електровоза ВЛ80

Швид- кість руху, км/год	Середнє динамічне навантаження, кН	Розрахункове динамічне навантаження, кН	Коефіцієнт динаміки	Динамічна сила дії шпал на баласт на 1 пог,м колії, кН/м
10	128,0	132,1	0,031	4,99
15	128,6	134,3	0,042	6,94
20	129,1	136,6	0,055	9,13
25	129,6	138,8	0,066	11,20
30	130,2	140,9	0,076	13,04
35	130,7	142,9	0,085	14,89
40	131,3	144,9	0,094	16,50
45	131,8	147,0	0,103	18,45
50	132,3	149,1	0,113	20,41
55	132,9	151,2	0,121	22,25
60	133,4	153,4	0,130	24,33
65	134	155,5	0,138	26,17
70	134,5	157,8	0,148	28,35
75	135,1	160	0,156	30,30
80	135,6	162,2	0,164	32,37

Результати розрахунку динамічної складової погонних навантажень на баластний шар від чотиривісного вантажного вагона на візках ЦНИИ-ХЗ-0

Швидкість руху, км/год	Середнє динамічне навантаження, кН	Розрахункове динамічне навантаження, кН	Коефіцієнт динаміки	Динамічна сила дії шпал на баласт на 1 пог,м колії, кН/м
10	127,5	131,3	0,029	4,77
15	129,1	134,1	0,037	6,30
20	130,8	137,0	0,045	7,83
25	132,5	139,9	0,053	9,30
30	134,1	142,8	0,061	10,96
35	135,8	145,8	0,069	12,61
40	137,4	148,8	0,077	14,40
45	139,1	151,8	0,084	15,95
50	140,8	154,5	0,089	17,26
55	142,4	157,2	0,094	18,58
60	144,1	160	0,099	20,02
65	145,8	162,8	0,104	21,46
70	147,4	165,6	0,110	22,88
75	149,1	168,5	0,115	24,44
80	150,7	171,5	0,121	26,24

2.7. Задання геометричних характеристик поперечного профілю та властивості ґрунтів земляного полотна

Геометричні характеристики поперечного профілю та властивості ґрунтів земляного полотна прийнято згідно матеріалів геологічної зйомки.

Для даного розрахунку прийнято, що тіло насипу складається з наступних інженерно-геологічних елементів (далі – ІГЕ):

ІГЕ–1. Основа насипу: глина щільної консистенції та напівтвердої консистенції із наступними характеристиками: щільність ґрунту $m = 17,8$ кН/м³; модуль деформації $U = 16$ МПа; показник текучості (консистенція) становить $I_L = 0,08$; число пластичності $I_p = 0,27$. Кут внутрішнього тертя та питоме зчеплення приймаються згідно [3, 113] і відповідно становлять $\varphi = 16^\circ$, $c = 36$ кПа.

ПГЕ–2. Тіло насипу: суглинок з прошарками глини, консистенція від напівтвердої до м'якопластичної з наступними характеристиками: щільність ґрунту $m = 17,5 \text{ кН/м}^3$; число пластичності становить $I_p = 0,14$; показник текучості (консистенція) становить $I_L = 0,28$. Кут внутрішнього тертя та питоме зчеплення приймаються згідно [2, 113] відповідно до показника текучості та числа пластичності становлять $\varphi = 22^\circ$, $c = 25 \text{ кПа}$; модуль деформації приймається згідно [113] та підтверджується рядом літературних джерел [73, 114] $U = 13 \text{ МПа}$.

ПГЕ–3. Підбаластний шар: пісок баластний з включенням щебеню, неоднорідний, середньої щільності – щільний. Характеристики приймаються згідно літературних джерел та нормативних документів [113–117] по класифікації SE, SU кут внутрішнього тертя $\varphi = 32\text{--}38^\circ$, приймається $\varphi = 38^\circ$ та щільність $m = 19,0 \text{ кН/м}^3$ (у стані природної вологості); модуль деформації може коливатися у межах 48–100 МПа (від середньо-ущільненого стану до ущільненого), приймається $U = 75 \text{ МПа}$; питоме зчеплення може коливатися в межах 2–6 кПа, приймається $c = 6 \text{ кПа}$.

ПГЕ–4. Баластний шлейф: пісок кварцовий з включенням щебеню, кременистого гравію та суглинку, неоднорідний, крупний-середньої крупності, рихлий. Характеристики приймаються згідно [113–117] по класифікації SI, SU, SW кут внутрішнього тертя $\varphi = 28\text{--}35^\circ$, приймається $\varphi = 32^\circ$ та щільність $m = 18,0 \text{ кН/м}^3$ (у стані природної вологості); модуль деформації може коливатися в межах 18–50 МПа (у розпушеному стані), приймається $U = 30 \text{ МПа}$; питоме зчеплення 2–4 кПа, приймається $c = 2 \text{ кПа}$.

ПГЕ–5. Баластний шар: щебінь баластний. Характеристики приймаються згідно літературних джерел та нормативних документів, враховуючи той факт, що щебенекий баласт знаходиться в ущільненому стані та без забруднювачів – згідно [113–117] по класифікації GE кут внутрішнього тертя $\varphi = 37\text{--}65^\circ$, приймається $\varphi = 63^\circ$ (для підбаластного шару $\varphi = 58^\circ$) та щільність $m = 20,0 \text{ кН/м}^3$; модуль деформації може коливатися в межах 150–300 МПа (у розпушеному

стані), приймається $U = 150$ МПа; властивість питомого зчеплення у матеріалі щебеню відсутній, однак цей матеріал має аналогічну властивість іншої природи – зубчате зчеплення, яке становить $0,8–0,92$ кПа та приймається $c = 0,9$ кПа (для підбаластного шару $c = 0,5$ кПа).

Можлива схема розподілу ґрунтів у поперечному перерізі насипу показана на рис. 2.12

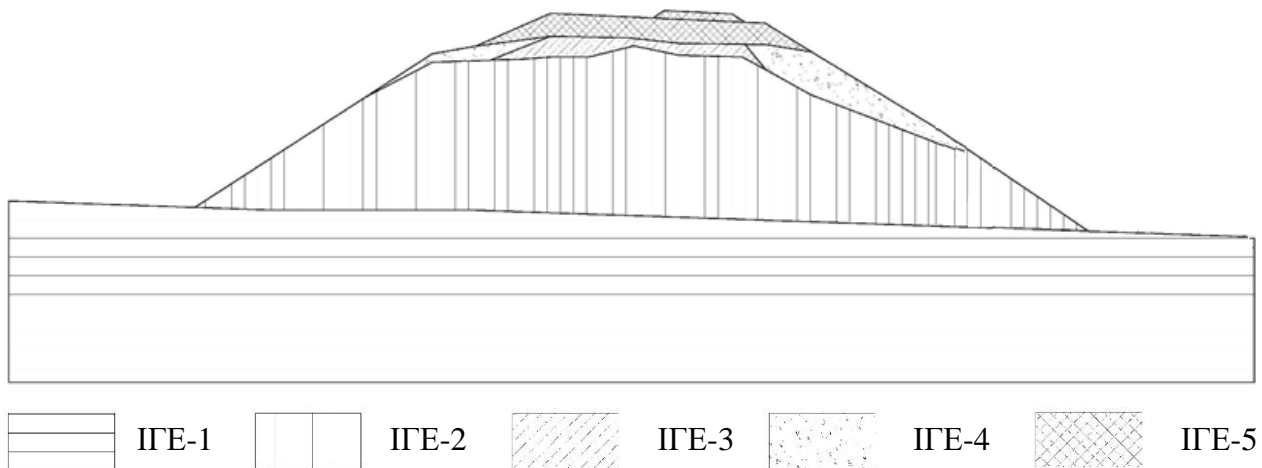


Рисунок 2.12 – Схема розподілу інженерно-геологічних елементів у поперечному перерізі насипу неоднорідного земляного полотна

2.8. Визначення характеристик міцності ґрунтів земляного полотна із врахуванням вібродинамічної дії рухомого складу

Під дією вібраційних динамічних навантажень рухомого складу у ґрунтах земляного полотна відбувається суттєве зменшення величини їх механічних властивостей, кута внутрішнього тертя, питомого зчеплення, пластичності та текучості (консистенція) і відповідно несучої здатності. Для оцінки впливу вібродинамічної дії рухомого складу на характеристики міцності ґрунтів використовується методика, розроблена вченими Прокудіним І. В., Колосом А. Ф. та ін. [107], для оцінки якості основи залізничної колії. Дана методика покладена в основу багатьох сучасних досліджень земляного полотна [118, 119]. Згідно з цією методикою, для оцінки впливу вібродинамічної дії на міцнісні і деформативні характеристики ґрунтів, використовуються показники відносного зниження питомого зчеплення і кута внутрішнього тертя ґрунту, які визначаються в частках або відсотках за формулами:

$$K_c = \frac{C_{cm} - C_{\partial n}^{\min}}{C_{cm}} K_\varphi = \frac{\varphi_{cm} - \varphi_{\partial n}^{\min}}{\varphi_{cm}}, \quad (2.15)$$

$$K'_c = \frac{C_{\partial n}^{\min}}{C_{cm}} K'_\varphi = \frac{\varphi_{\partial n}^{\min}}{\varphi_{cm}}, \quad (2.16)$$

де: C_{cm} , φ_{cm} – питоме зчеплення і кут внутрішнього тертя ґрунту, що визначені при дії статичного навантаження; $C_{\partial n}^{\min}$, $\varphi_{\partial n}^{\min}$ – питоме зчеплення і кут внутрішнього тертя ґрунту, що визначені при дії максимального вібродинамічного навантаження.

Найважливішими факторами, що впливають на міцність ґрунтів, є вологість ґрунту, його щільність, величина пульсації напружень або амплітуда коливань, чутливість ґрунту до вібродинамічного впливу і напружений стан ґрунту земляного полотна. Закономірності зміни питомого зчеплення, кута внутрішнього тертя і модуля деформації при зростанні вібродинамічного впливу є основними, що визначають стан і здатність ґрунтів чинити опір дії зовнішнім навантаженням.

Враховуючи пропорційну залежність амплітуд коливань від пульсації напружень, закономірність зміни міцності і деформативних характеристик від величини амплітуд коливань ґрунтів описується наступними формулами:

$$C_{\partial n} = C_{cm} \left[K'_c + K_c \exp(-K(A - A^n)) \right], \quad (2.17)$$

$$\varphi_{\partial n} = \varphi_{cm} \left[K'_\varphi + K_\varphi \exp(-KA) \right], \quad (2.18)$$

де: K_c , K'_c , K_φ , K'_φ – граничні значення показників відносного зниження характеристик, що визначають чутливість ґрунту до вібродинамічних навантажень; K , K' – коефіцієнти віброруйнування і вібродеформації; A – результуюча амплітуда коливання, при якій визначаються характеристики; A^n – початкова амплітуда коливань, при якій зниження характеристики не перевищує 3–5%.

У даній задачі значення питомого зчеплення C_{cm} і кута внутрішнього тертя φ_{cm} , що визначені при дії статичного навантаження, змінюються у залежності від виду ґрунту поперечного перерізу насипу земляного полотна. На рис. 2.13

показано, що кут внутрішнього тертя є найбільшим у баластному шарі і зменшується по глибині насипу. На рис. 2.14 показано, що питоме зчеплення ґрунтів у поперечному перерізі насипу є найбільшим в основі насипу і найменшим у баластному шарі.

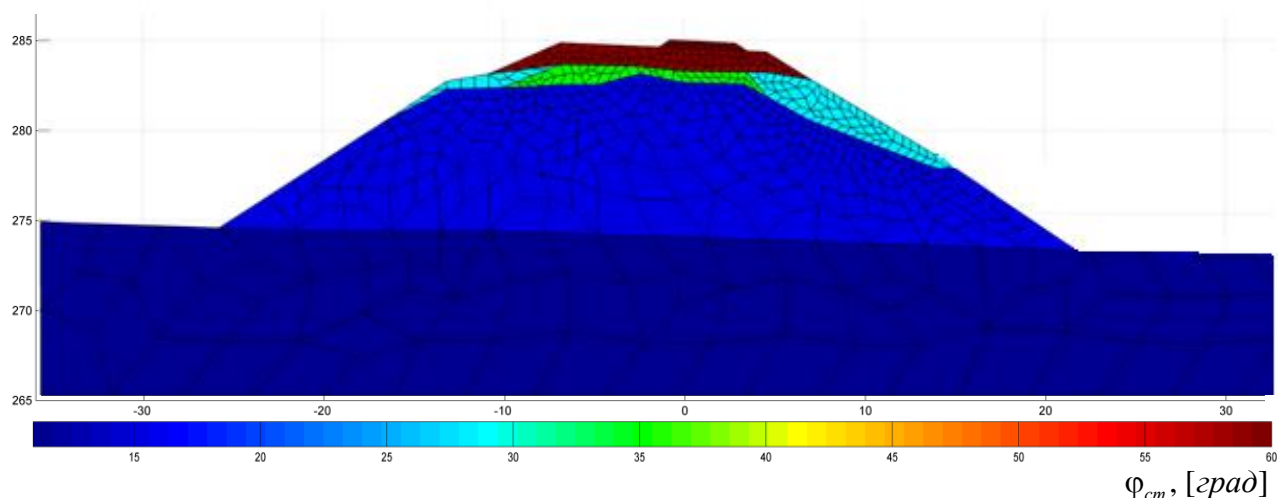


Рисунок 2.13 – Розподіл кута внутрішнього тертя ґрунтів у поперечному перерізі насипу

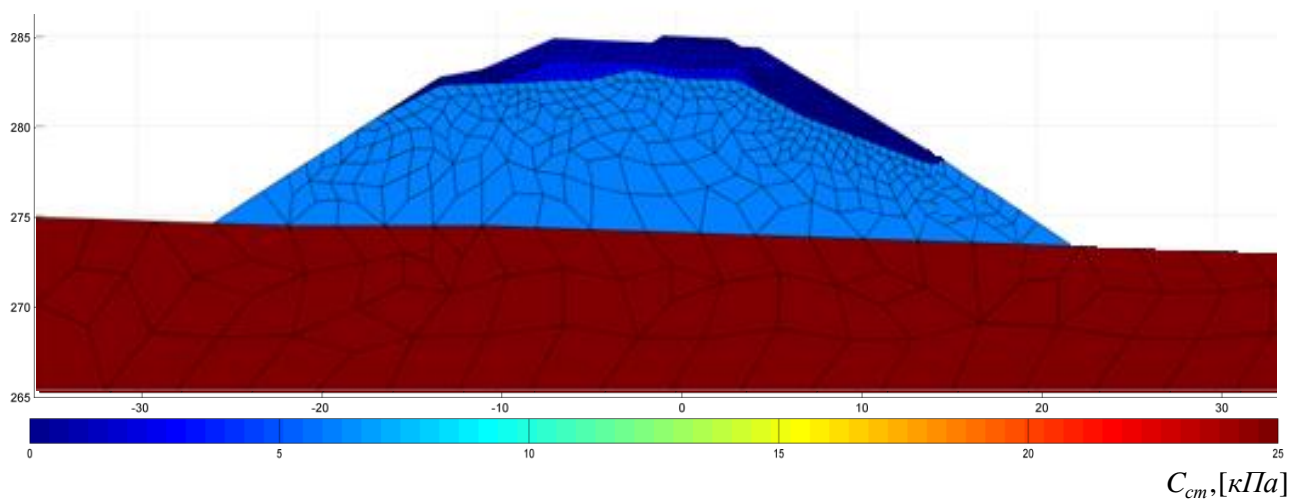


Рисунок 2.14 – Розподіл питомого зчеплення ґрунтів у поперечному перерізі насипу

Дослідження ґрунтів різного складу і стану з найбільшою об'ємною масою, одержаною в стандартному ущільненні, з вологістю, що відрізняється від оптимальної, при величині вібродинамічного впливу, відповідного коливань ґрунту з амплітудою 220 мк, дозволили виявити значення показників зниження характеристик, їх співвідношення, коефіцієнти віброруйнування і

вібродеформації, а також початкові амплітуди [107]. Дані про них наведено в табл. 2.10 [107].

Таблиця 2.10

Показники зниження характеристик ґрунтів [107]

Показники	Найменування ґрунту и його консистенція							
	глини з I_L			суглинки з I_L			супісок	
	0-0,15	0,15 - 0,45	0,45	0 - 0,15	0,15 - 0,45	0,45	тверді	пластичні
K_c	0,15	0,55	0,13	0,2	0,5	0,15	0,1	0,60
K'_c	0,85	0,45	0,87	0,80	0,50	0,85	0,90	0,4
K_ϕ	0,09	0,45	0,10	0,10	0,40	0,08	0,07	0,4
K'_ϕ	0,81	0,55	0,90	0,90	0,60	0,92	0,93	0,60
K'	0,005	0,01	0,015	0,006	0,011	0,02	0,006	0,025
K	0,01	0,012	0,018	0,008	0,012	0,015	0,007	0,02
A^H	10	15	0	15	20	0	10	20

Для розрахунку параметрів $C_{\text{дн}}$ та $\phi_{\text{дн}}$ для кожного ґрунту земполотна та їх розподілу в межах його поперечного перерізу, виконується розрахунок розподілу результуючої амплітуди коливань A у земляному полотні із використанням розробленої моделі динамічних коливань земполотна у поперечній площині. Динамічні навантаження від рухомого складу на баластний шар визначаються згідно [103] із врахуванням основних чинників вібраційного навантаження.

На рис. 2.15 та рис. 2.16 показано результати розрахунків розподілу параметрів ґрунтів $C_{\text{дн}}$ та $\phi_{\text{дн}}$ із врахуванням вібраційного впливу.

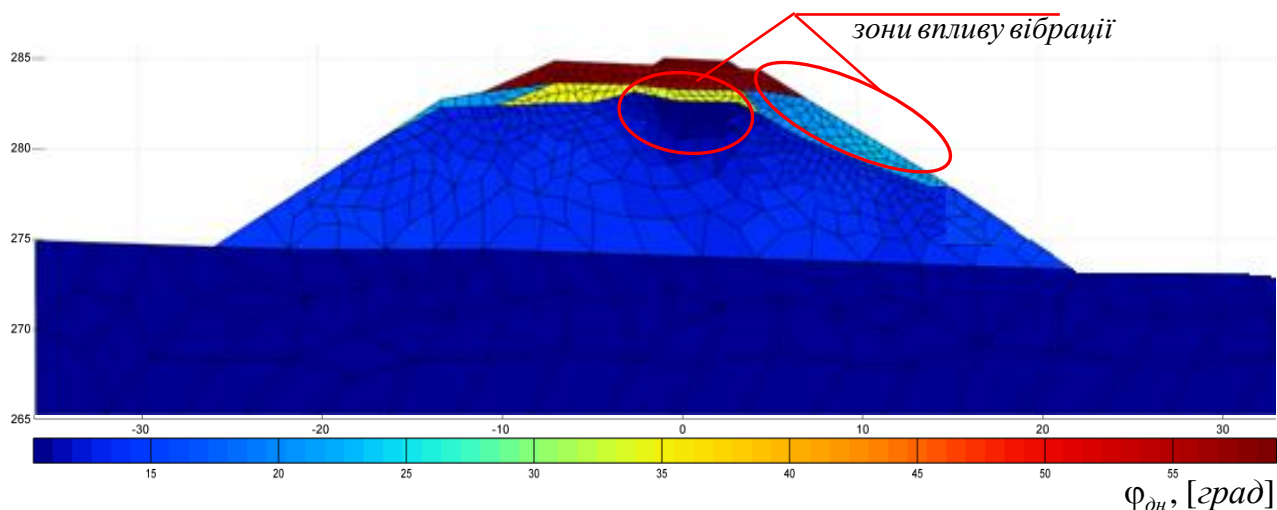


Рисунок 2.15 – Схема розподілу кута внутрішнього тертя ґрунту $\phi_{\text{дн}}$ у поперечному перерізі земляного полотна із врахуванням вібраційного впливу

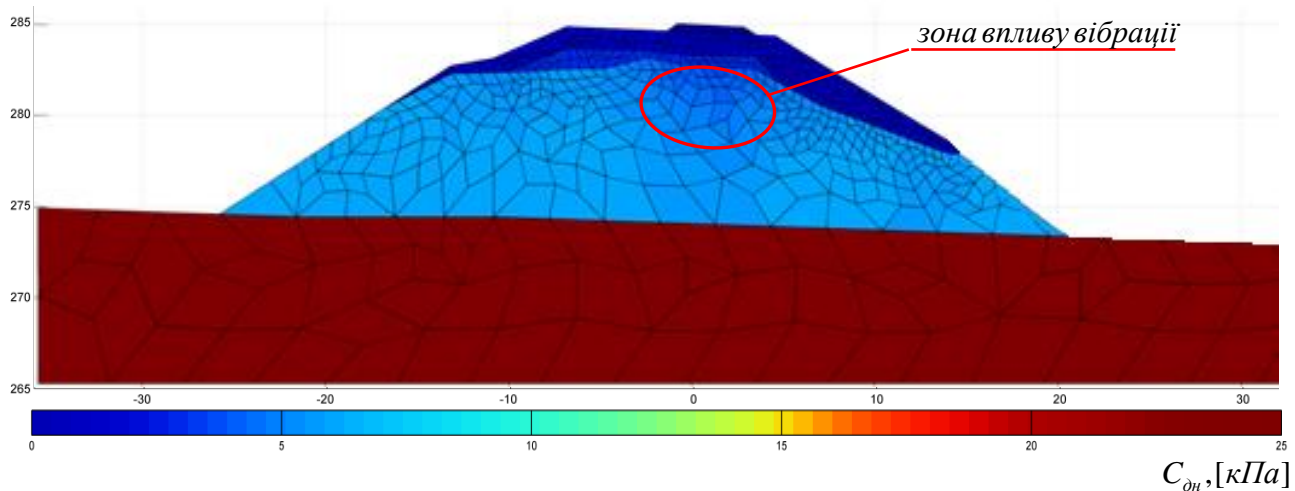


Рисунок 2.16 – Схема розподілу питомого зчеплення ґрунтів $C_{дн}$ у поперечному перерізі земляного полотна із врахуванням вібраційного впливу

З рис. 2.15 та рис. 2.16 видно, що суттєве вібраційне розладнання виникає у розподілі кута внутрішнього тертя, а саме у тілі насипу із суглинку та баластному шлейфі, що знаходяться близько до зони прикладення вібраційного навантаження. Вібраційне навантаження також чинить вплив на зменшення питомого зчеплення у суглинку тіла насипу.

2.9. Висновки до розділу 2

У даному розділі описано методику розрахунку динамічних навантажень на баластний шар та земляне полотно від рухомого складу.

Дана методика дозволяє враховувати вплив основних факторів, що є важливими при визначенні несучої здатності земляного полотна. Серед них фактори рухомого складу: стан ходових частин, такі його параметри як надресорна і непідресорна маса, взаємний вплив осьових навантажень, швидкість рухомого складу. Врахованими параметрами верхньої будови колії є: тип рейок, скріплень та шпал, епюри їх розкладки, розмірів баластного шару.

Виконано експериментальні дослідження неоднорідного земляного полотна методом інерційних вимірювань прискорень та встановлено, що при проходженні вантажного поїзда величина прискорень у технічно справному земляному полотні становить до 9 м/с^2 , а максимальне переміщення $0,9 \text{ мм}$. У технічно несправному (дефектному, “хворому” місці) земляному полотні

величина прискорень становить 13 м/с^2 , а максимальне переміщення $2,1 \text{ мм}$. При проходженні пасажирського поїзда величина прискорень у технічно справному земляному полотні становить до 7 м/с^2 , а максимальне переміщення $0,8 \text{ мм}$. У технічно несправному (дефектному, “хворому” місці) земляному полотні величина прискорень становить 13 м/с^2 , а максимальне переміщення $1,9 \text{ мм}$. Отже, різниця переміщень становить при проходженні вантажного поїзда – 2,3 рази, а пасажирського – 2,4 рази.

Виконано розрахунок розподілу вертикальних сил дії рухомого складу на рейки для найбільш поширених типів рухомого складу. Встановлено, що найбільші значення розрахункової сили, серед приведених одиниць рухомого складу, створюється електровозом ВЛ80 і становить $176,1 \text{ кН}$ при швидкості 110 км/год (110 км/год є максимальною швидкістю для цього типу локомотива) та вантажним вагоном ЦНІІ-ХЗ-0 і становить $189,4 \text{ кН}$ при швидкості 110 км/год , що є більшим на $7,5\%$ від локомотива ВЛ80. Тому в подальших розрахунках для визначення навантажень на земляне полотно було застосовано параметри та характеристики саме цього рухомого складу залізниць.

Встановлено, що кут внутрішнього тертя є найбільшим у баластному шарі та становить 63° і зменшується по глибині насипу – 16° . Питоме зчеплення ґрунтів у поперечному перерізі насипу є найбільшим в основі насипу та становить 36 кПа і найменшим у баластному шарі – $0,9 \text{ кПа}$.

Досліджено, що суттєве вібраційне розладнання виникає у розподілі кута внутрішнього тертя, а саме у тілі насипу із суглинку та баластному шлейфі, що знаходяться близько до зони прикладення вібраційного навантаження. Вібраційне навантаження також чинить вплив на зменшення питомого зчеплення у суглинку тіла насипу.

При розрахунку розподілу динамічних коливань у тілі земляного полотна враховуються фізичні характеристики різних видів шарів ґрунтів та їх розміри. Із використанням цієї методики отримується інформація щодо загальної динамічної завантаженості земляного полотна, яка в подальшому використовується при визначенні несучої здатності земляного полотна.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕОДНОРІДНОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

3.1. Розробка методу для лабораторного визначення ступеня ущільнення земляного полотна

Довговічність та безвідмовність експлуатації залізничної колії у значній мірі залежить від стану її основи – земляного полотна, а саме від щільності ґрунтів, що його складають. Недостатня щільність ґрунтів знижує несучу здатність земляного полотна. Тому питання моніторингу та контролю щільності ґрунтів земляного полотна є актуальним і потребує розробки експериментальних методів оцінки їх ступеня щільності.

В основі методу визначення ущільнення земляного полотна лежать виміри швидкості проходження пружних хвиль через ґрунтовий шар. Створення динамічних коливань та їх реєстрація здійснюється розробленими інерційним пристроєм, структурна схема якого показана на рис. 3.1 та у [120, 121].

Пристрій складається із персонального комп'ютера – 1, що виконує збір даних та живлення датчиків прискорень і аналого-цифрового перетворювача. Аналого-цифровий перетворювач – 2, передає виміряні сигнали з аналогових датчиків прискорень типу ADXL 335 та ударника на персональний комп'ютер для подальшого використання та опрацювання. Всі дані з метою моніторингу стану земляного полотна накопичуються та зберігаються у пам'яті комп'ютера.

Ударник 3 та штамп 4 використовуються для створення імпульсів та сигналу замикання, за обробкою якого отримуємо час проходження хвилі від початку удару до фіксації коливання аналоговими датчиками прискорень типу ADXL 335. Аналогова інформація сигналів прискорень поздовжніх та поперечних хвиль із 3 акселерометрів оцифровується із частотою 30 кГц та зберігається на персональному комп'ютері [120].

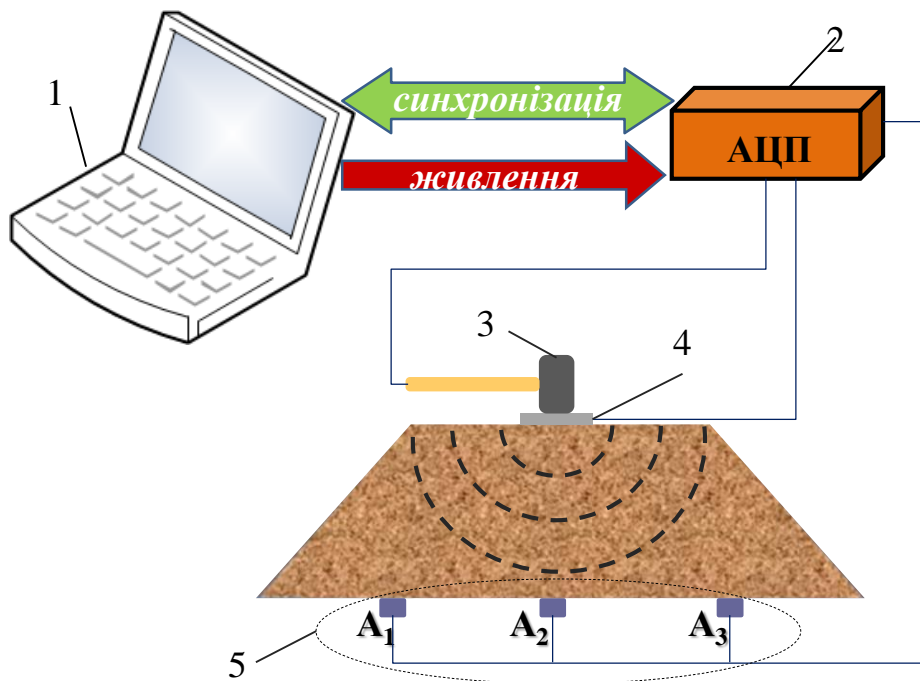


Рисунок 3.1 – Пристрій для проведення вимірювань ущільнення ґрунтів земляного полотна доріг: 1 – персональний комп’ютер, 2 – аналого-цифровий перетворювач, 3 – ударник, 4 – штамп, 5 – аналогові датчики прискорень типу ADXL 335

Джерелом пружних хвиль є удар молотком по металевій пластині діаметром 13 см, яка укладається на земляне полотно. Удари відбуваються почергово, при цьому початок імпульсу фіксується за допомогою окремих цифрових каналів на аналого-цифровому перетворювачу.

Для виконання динамічної інтерпретації сигналів щільності земляного полотна, запис коливань проходження хвилі з моменту удару фіксувався за допомогою датчиків прискорень ADXL 335 (A1 до A3).

Після кожного циклу експерименту результати вимірювань прискорень записуються у файл із назвою згідно дати запису та часу роботи пристрою.

Стендом для дослідження ступеня ущільнення земляного полотна є наповнений ґрунтом скляний ящик розмірами 1,0x0,5x0,7 м (рис. 3.2). Ящик заповнювався ґрунтом у вигляді насипу земляного полотна без ущільнення [120, 121].

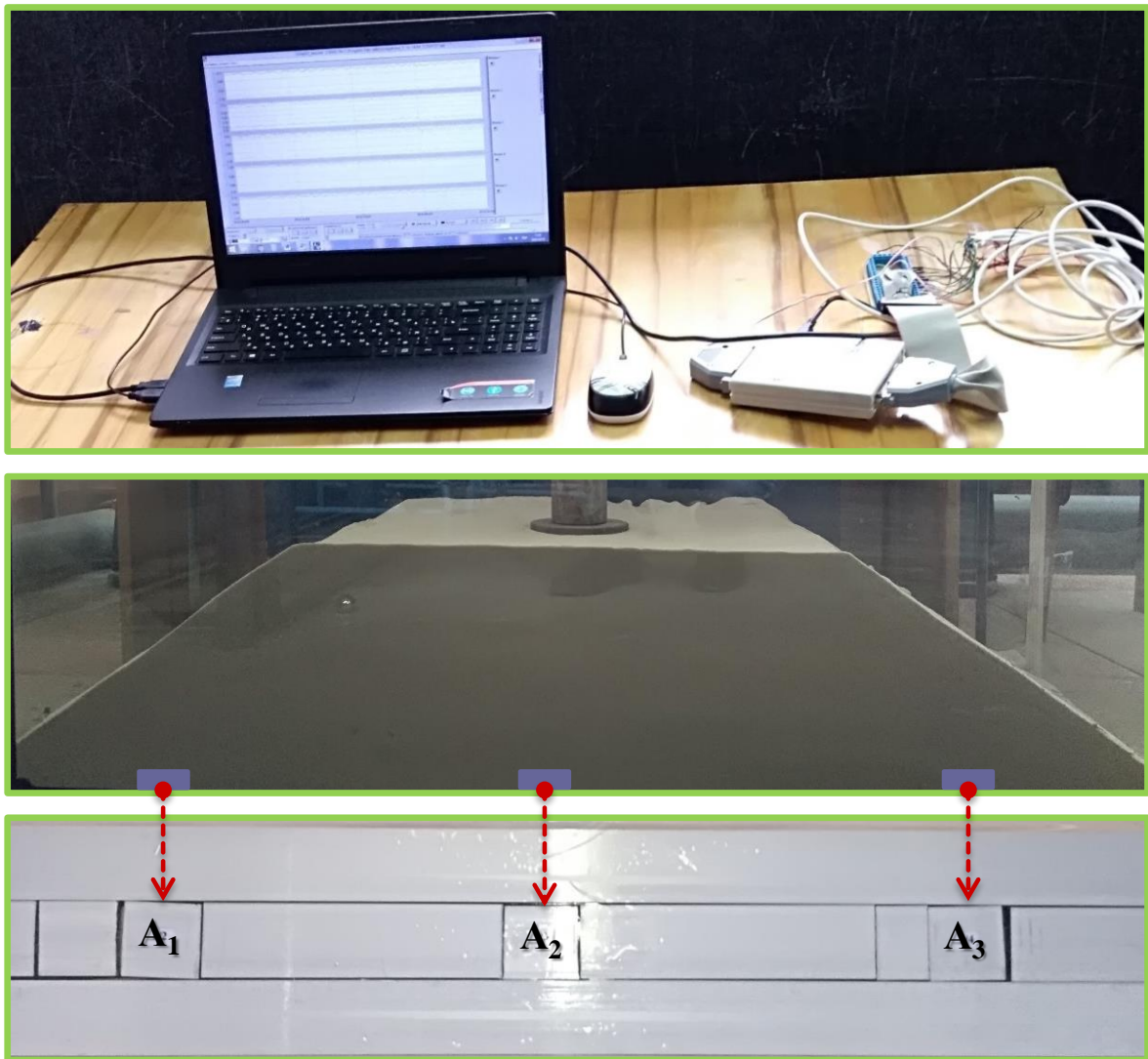


Рисунок 3.2 – Експериментальні випробовування ущільнення ґрунту земляного полотна (низ: розташування датчиків (акселерометрів) під земляним полотном, верх: вимірювальні пристрої, середина: вигляд з боку моделі земляного полотна у ящику із скляними стінками)

Дно ящика складається із п-подібних профілів, у яких розміщуються сигнальні кабелі та живлення, що йдуть до датчиків прискорень. Акселерометри поміщуються у відокремлені частини металевого профілю із розмірами ширини та довжини 40 мм і висотою 20 мм. Ці елементи відокремлюються від сусідніх датчиків та основи шумозахисним матеріалом з метою часткового виключення побічних шумів. Загальна кількість окремих профілів із датчиками – три шт. Акселерометри на рис. 3.2 мають умовні позначення A_1 – A_3 [120].

3.2. Методика проведення лабораторних досліджень щільності ґрунтів неоднорідного земляного полотна

Лабораторні дослідження земляного полотна склалися із послідовності циклів ущільнення ґрунтів земляного полотна та часу проходження пружних хвиль ударів. Імпульс задавався молотком через круглий штамп, поміщений по центру земляного полотна (рис. 3.3).

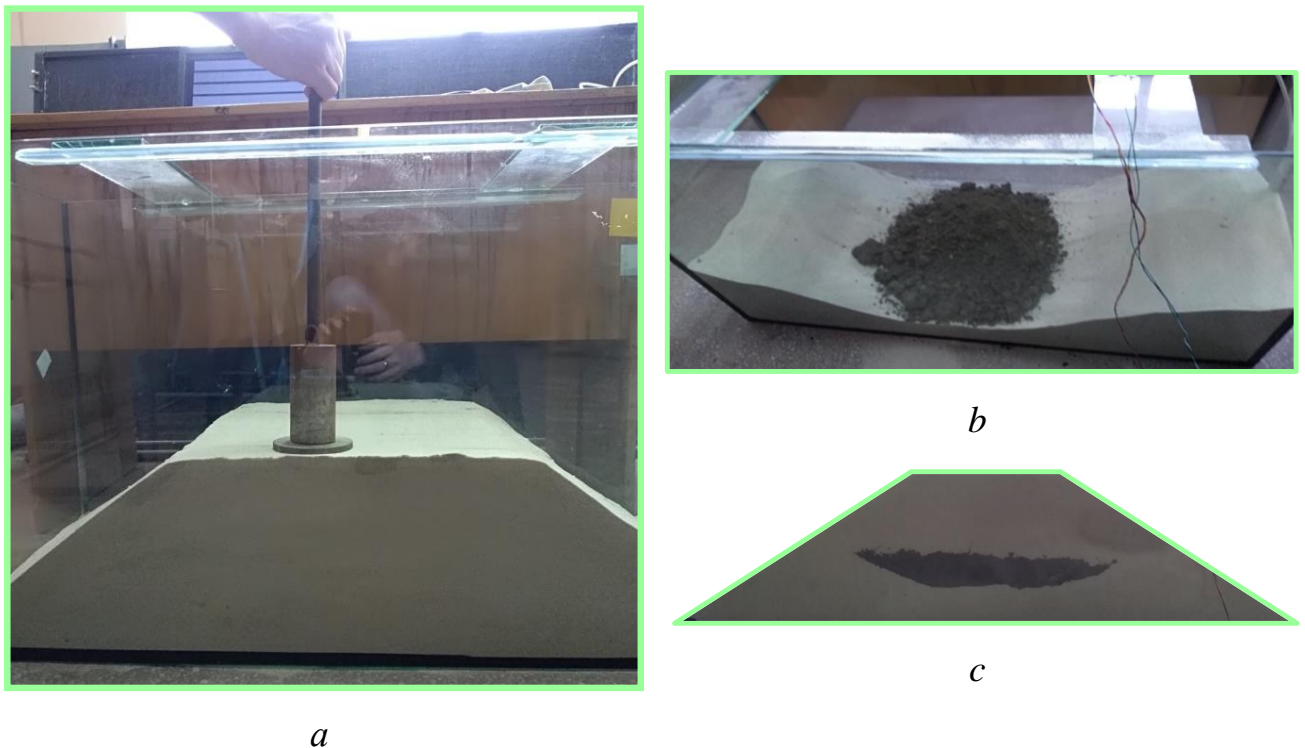


Рисунок 3.3 – Модель земляного полотна у лабораторному експерименті: *a* – процес ущільнення ґрунту; *b* – засипка шару глини; *c* – неоднорідне земляне полотно із крупнозернистого піску та шаром глини по середині призми

3.2.1. Програма експериментальних досліджень

Експеримент проводили у три цикли на двох моделях. Перша модель – однорідне земляне полотно із крупнозернистого піску, друга модель – неоднорідне земляне полотно із крупнозернистого піску та шаром глини по середині призми.

Для кожної моделі земляного полотна проведено по три цикли експериментальних досліджень ущільнення земляного полотна. Цикл №1 – не ущільнений стан земляного полотна; цикл №2 – проміжний стан ущільнення

земляного полотна; цикл №3 – максимально пошарово ущільнений стан земляного полотна.

Після кожного циклу ущільнення проводилися вимірювання поширення пружних хвиль у земляному полотні за допомогою розробленого інерційного приладу. Для оптимального визначення щільності земляного полотна проведено вимірювання швидкості поширення пружних хвиль при п'яти ударах у кожному циклі експерименту.

3.2.2. Результати визначення швидкості та часу проходження хвилі удару

Аналіз часу та швидкості поширення хвиль удару проводимо при трьох станах щільності ґрунту земляного полотна та для двох різних середовищ.

Проходження пружних хвиль через земляне полотно визначається мінералогічним та гранулометричним складом зерен і, в значній мірі, кількістю контактів між зернами, тобто щільністю шару. Таким чином, вимірюючи швидкість поширення пружних хвиль після створення імпульсу від ударника, можна зробити висновок про ступінь ущільнення ґрунту. Швидкість визначається за відомою формулою:

$$V = \frac{S}{t}, \quad (3.1)$$

де: S – шлях проходження хвилі від ударника до акселерометра; t – час проходження хвиль удару від ударника до приймача імпульсу (акселерометра).

Відстань S визначається у залежності від товщини ґрунтового шару земляного полотна після кожного циклу ущільнення.

Схема до визначення відстані поширення пружної хвилі удару від ударника до акселерометра наведена на рис. 3.4. Найкоротший шлях поширення хвилі є до акселерометра A_2 , тому і час поширення хвилі повинен бути найменшим.

Далі проводиться аналіз результатів впливу ущільнення ґрунту земляного полотна на час і швидкість поширення хвиль у випадку розміщення ударника у центрі ґрунтової моделі земляного полотна.

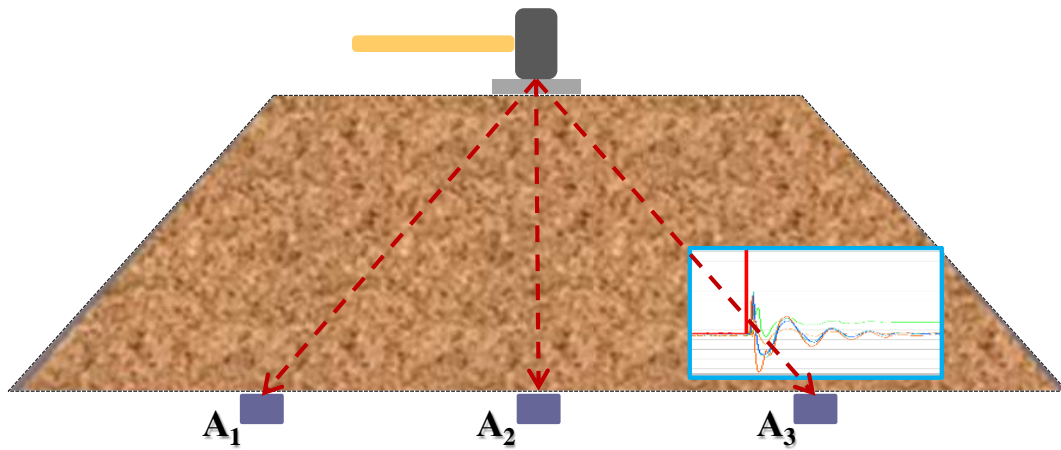


Рисунок 3.4 – Вимірювання ущільнення ґрунту земляного полотна

Результати поширення часу хвиль удару від ударника до акселерометрів A_1 , A_2 , A_3 при різних циклах ущільнення однорідного земляного полотна наведено на рис. 3.5, а для неоднорідного на рис. 3.6.

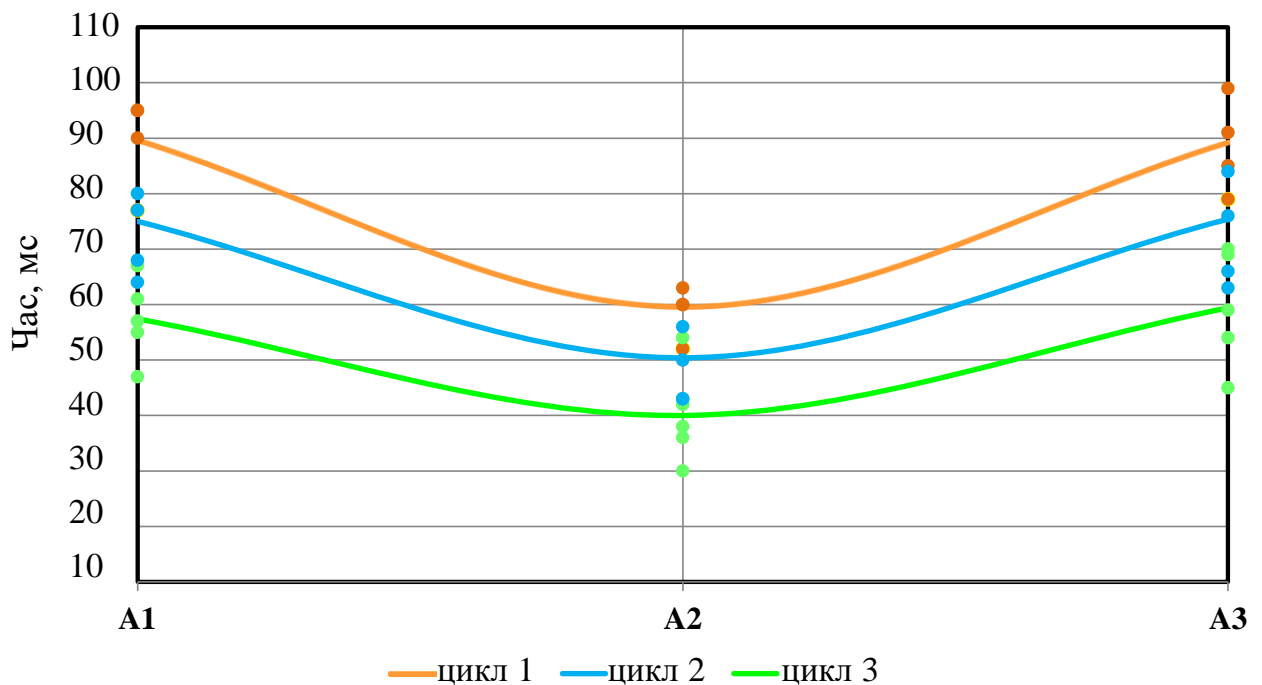


Рисунок 3.5 – Час поширення пружної хвилі удару в однорідному земляному полотні

Час проходження пружної хвилі удару в однорідному земляному полотні коливається у межах від 60 мс до 100 мс при неущільненому стані. При проміжному ущільненні земляного полотна від 50 мс до 78 мс та максимально ущільненому земляному полотні від 40 мс до 58 мс.

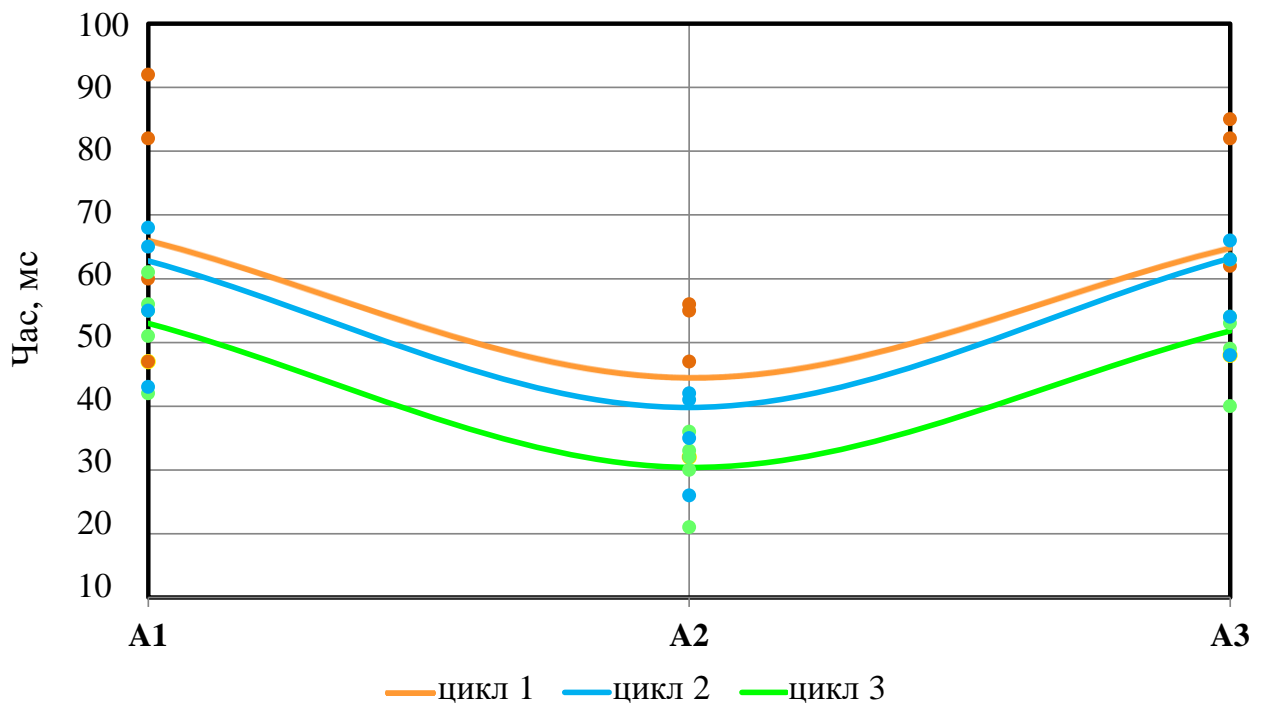


Рисунок 3.6 – Час поширення пружної хвилі удару в неоднорідному земляному полотні

У випадку неоднорідного земляного полотна час проходження пружної хвилі при неуцільненому земляному полотні становить від 45 мс до 68 мс. При проміжному ущільненні земляного полотна від 40 мс до 65 мс та при максимально ущільненому земляному полотні від 30 мс до 53 мс.

Із проведених експериментів спостерігається значне збільшення часу проходження хвилі до бокових датчиків прискорень. Це явище пояснюється деяким розуцільненням земляного полотна на бокових гранях призми.

Для датчика A2, який найближче розташований до джерела імпульсів, при розуцільненому стані однорідного земляного полотна час проходження хвилі становить 59 мс. При проміжному ущільненні – 51 мс і при максимально ущільненому земляному полотні час поширення хвилі становить – 40 мс.

Час поширення пружної хвилі удару через неоднорідне земляне полотно при розуцільненому стані становить 44 мс, при проміжному ущільненні – 40 мс і при максимально ущільненому – 31 мс.

Відношення часу проходження пружної хвилі удару через однорідне земляне полотно у неуцільненому стані, до часу при максимально ущільненому

земляному полотні становить 1,49 рази, а при неоднорідному земляному полотні – 1,41.

Отже, із збільшенням ущільнення ґрунту час проходження хвилі зменшується. Тому за часом поширення хвилі удару від джерела імпульсу до приймаючого датчика можна проводити оцінку ступеня ущільнення ґрунту насипу залізничної колії.

На рис. 3.7 показано записи прискорення поздовжніх хвиль акселерометром А2 від ударника після трьох циклів ущільнення в однорідному земляному полотні, а на рис. 3.8 при неоднорідному земляному полотні. Також на даних графіках наведено момент початку задання імпульсу.

Середній час поширення пружної хвилі удару після трьох циклів експерименту однорідного земляного полотна складає відповідно 59 мс, 51 мс та 40 мс. У неоднорідному земляному полотні – 44 мс, 40 мс та 31 мс.

У даному випадку, за записами часу проходження хвилі акселерометром із частотою 30 кГц, при найбільшому ущільненні час проходження хвилі складає 25 точок оцифрованого сигналу. Збільшення точності можна досягти шляхом збільшення частоти оцифровування сигналу прискорень.

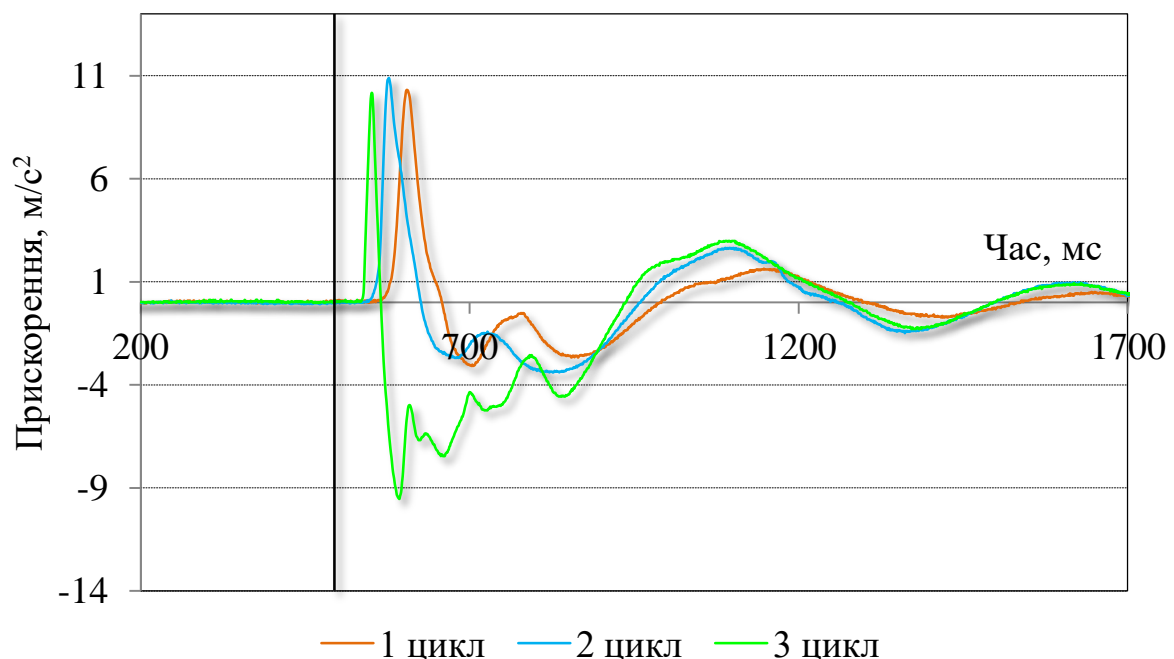


Рисунок 3.7 – Запис поширення хвиль удару в однорідному земляному полотні

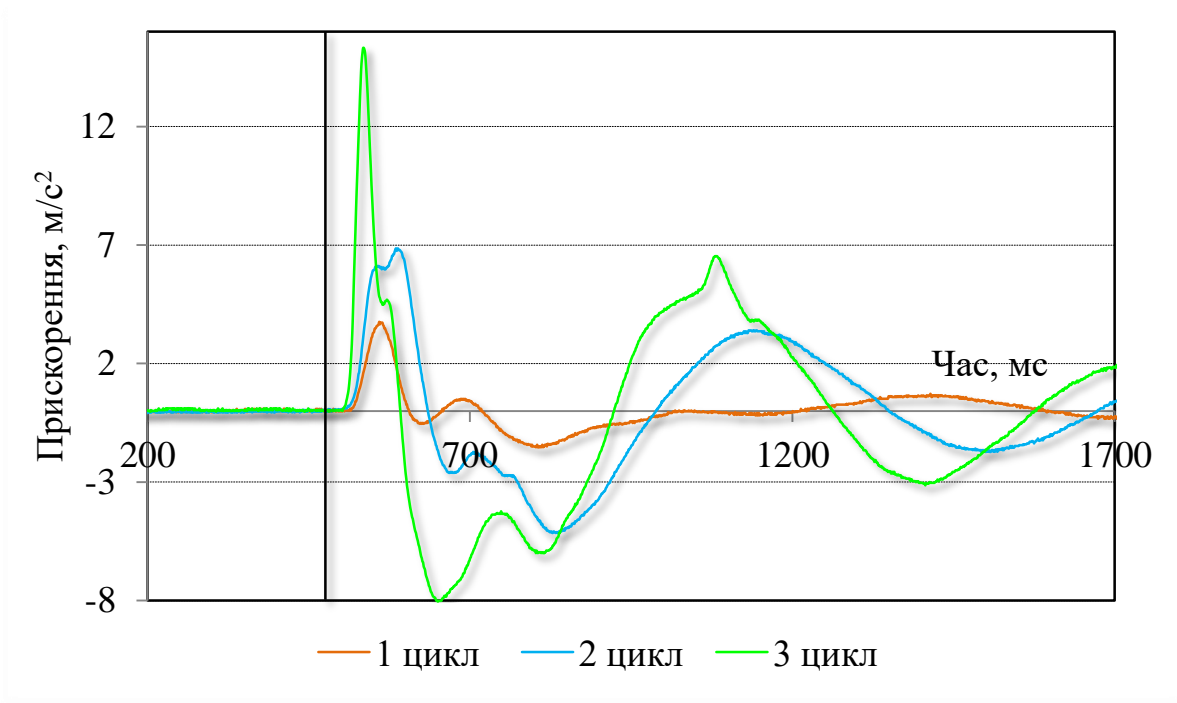


Рисунок 3.8 – Запис поширення хвиль удару в неоднорідному земляному полотні

За відомими значеннями часу поширення пружних хвиль удару та відстанню від ударника до приймаючого датчика розраховуємо швидкість поширення хвилі в однорідному земляному полотні (рис. 3.9) та неоднорідному земляному полотні (рис. 3.10).

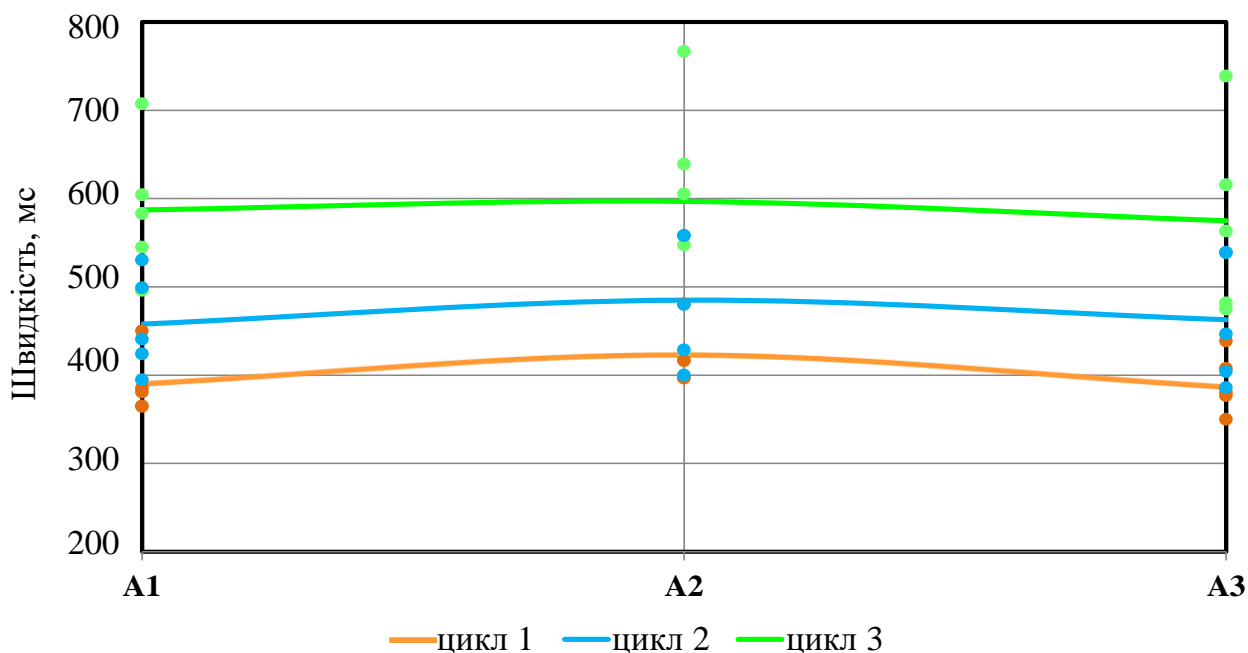


Рисунок 3.9 – Швидкість поширення пружної хвилі удару в однорідному земляному полотні

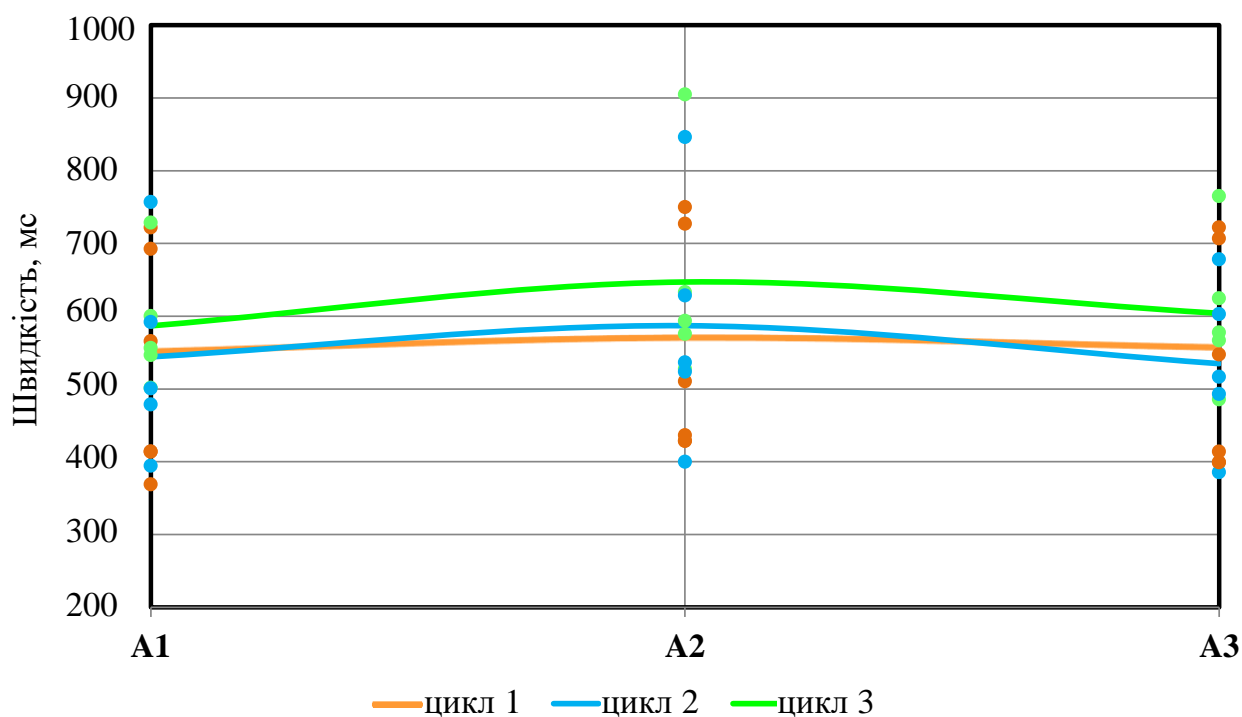


Рисунок 3.10 – Швидкість поширення пружної хвилі удару в неоднорідному земляному полотні

Швидкість поширення пружної хвилі удару в неущільненому однорідному земляному полотні до акселерометра A2 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 акселерометрів A1 та A3 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.

У випадку неоднорідного земляного полотна швидкість поширення пружної хвилі до акселерометра A2 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 акселерометрів A1 та A3 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.

Швидкості поширення хвиль у ґрунті змінюються у залежності від його щільності, і чим більше щільність, тим вища швидкість. Тобто, малі швидкості

поширення свідчать про наявність ослабленого шару з можливим виникненням неоднорідностей.

Особливістю характеру розподілу швидкостей поширення пружних хвиль удару, на відміну від розподілу часу, є майже однакова швидкість у початковому стані. Разом із цим необхідно відмітити високий розкид вимірних швидкостей, що зростає разом із середньою величиною швидкості. Отримання надійних значень швидкості поширення пружних хвиль удару в земляному полотні в залежності від його ущільнення вимагає застосування сучасних статистичних методів обробки даних. Застосування новітніх потужних програмованих мікрокомп'ютерних систем з метою автоматизації статистичної обробки вимірних значень поширення пружних хвиль удару [120].

Якість земляного полотна, що експлуатується, на відміну від інших елементів колії, формується під час виконання ремонту. Під якістю земляного полотна розуміється найбільший ступінь його ущільнення, що відповідає найбільшій його несучій здатності та опору зміні форми, яка веде до подальшого зародження дефектів і деформацій. Знання щільності земляного полотна є важливим, оскільки цей показник дає можливість оцінити якість земляного полотна залізничної колії. Як показали зарубіжні та вітчизняні дослідження, добре ущільнене земляне полотно дає можливість продовжити міжремонтний термін верхньої будови колії більш ніж на 30% [120].

Методи аналізу поширення хвиль невід'ємно пов'язані із математичними методами обробки інформації, аналізу сигналів та статистики. Застосування методів машинного навчання дозволяє не тільки автоматизувати обробку та інтерпретацію даних, а також значно підвищити ступінь використання інформації та точність вимірів. Для більшої наочності використано методи кластерного та дискримінантного аналізу для виявленням характерних ознак ущільнення земляного полотна.

У процесі виконання досліджень розповсюдження пружних хвиль у земляному полотні встановлено, що вимірювання значень швидкостей повинно

змінюватися в залежності від його ущільнення у значних межах відносно до початкового ущільнення.

Для проведення якісної оцінки вимірювань пружних хвиль у земляному полотні необхідно проводити просторові вимірювання. Для цього просторова роздільна здатність вимірювання щільності земляного полотна повинна не бути меншою половини товщини призми земляного полотна, тобто виміри повинні виконуватися одночасно густою мережею датчиків.

Виконана розробка та застосування методу визначення ущільнення неоднорідного земляного полотна залізничної колії показали значну зміну поширення часу та швидкостей під час виконання програми експериментальних досліджень.

Запропонований підхід оцінки ступеня ущільнення земляного полотна дозволить значно підвищити точність визначення просторового ущільнення у процесі його експлуатації, особливо на проблемних ділянках.

Подальшим напрямком продовження теми досліджень є застосування алгоритмів комп'ютерної статистики і машинного навчання для встановлення взаємозв'язків між ущільненням земляного полотна із різних заповнюючих матеріалів та характеристиками імпульсного відклику. Застосування сучасних мікроконтролерних технологій може дати можливість розробки автономних систем моніторингу технічного стану земляного полотна на ділянках колії, що схильні до підтоплення та деформацій.

3.3. Висновки до розділу 3

Із проведених лабораторних досліджень параметрів однорідного та неоднорідного земляного полотна встановлено наступне:

1. Технічний стан земляного полотна можна визначити за допомогою інерційних датчиків (акселерометрів). Розроблений пристрій дозволяє проводити моніторинг проблемних місць земляного полотна і приймати своєчасні рішення стосовно запобігання виникненню загрози безпеці руху рухомого складу залізниць по даній ділянці залізничної колії.

2. Встановлено, що відношення часу проходження пружної хвилі удару через однорідне земляне полотно у неущільненому стані, до часу при максимально ущільненому земляному полотні становить 1,49 рази, а при неоднорідному земляному полотні – 1,41.

3. Встановлено, що при збільшенні ущільнення земляного полотна швидкість поширення пружної звукової хвилі збільшується. Результати вимірювання швидкості поширення хвилі показують значну концентрацію локального збільшення швидкості проходження поздовжніх хвиль в однорідному та неоднорідному земляному полотні у центральній зоні. Це пояснюється більшим ступенем ущільнення центральної частини призми земляного полотна, на відміну від бокових його ділянок.

4. Швидкість поширення пружної хвилі удару в неущільненому однорідному земляному полотні до акселерометра А2 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 акселерометрів А1 та А3 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.

5. Швидкість поширення пружної хвилі удару в неущільненому неоднорідному земляному полотні до акселерометра А2 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 акселерометрів А1 та А3 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.

6. У результаті численних вимірів ущільнення земляного полотна встановлено, що у недостатньо ущільненому земляному полотні сигнал суттєво втрачає потужність. Що видно зі значення часу проходження пружної хвилі до крайніх датчиків, які знаходяться найближче до вільного кінця призми.

РОЗДІЛ 4

РЕКОМЕНДАЦІЇ ІЗ ПІДВИЩЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ПРОБЛЕМНОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ТА ТЕХНІКО- ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ЙОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1. Влаштування дренажних конструкцій у місцях хворого земляного полотна

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.

Аналіз науково-дослідних робіт стосовно підвищення несучої здатності земляного полотна залізничної колії, який проведено у першому розділі 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 є вкрай мало.

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 [77, 122], а пошук дефектних місць земляного полотна пропонується виконувати георадіолокаційним методом [123–125]. Слід зазначити, що на даний спосіб підвищення несучої здатності земляного полотна отримано патент на корисну модель [122].

4.1.1. Спосіб армування земляного полотна трубчастими дренажами

Для вирішення проблеми підвищення несучої здатності перезволоженого земляного полотна важливим є усунення фактору, що спричиняє його деформації та дефекти, а саме відведення води. З цією метою доцільним є застосування трубчастих дренажів.

Технічна задача, яка вирішується у запропонованим способом [122], полягає у постійному і ефективному відведенні води із тіла земляного полотна, що приводить до покращення фізико-механічних властивостей ґрунтів, підвищення несучої здатності земляного полотна.

Пропонується, влаштування дренажної конструкції у проблемних місцях земляного полотна (рис. 4.1) де спостерігається перезволоження ґрунтів, а саме у місця де прояв деформацій є найбільшим встановлюється дренажна труба більшого діаметру (максимальний діаметр труби 600 мм), з обох боків від труби із зміною рівня по висоті, встановлюють труби меншого діаметру (наприклад 300 мм), з метою перехоплення та відведення води, яка прямує до середньої труби. Таке розташування дренажних труб пояснюється тим, що кожна із труб бере на себе певну кількість води на різних рівнях земляного полотна, що унеможливує рух великої кількості води у ґрунті тим самим попереджується явище суффозії.

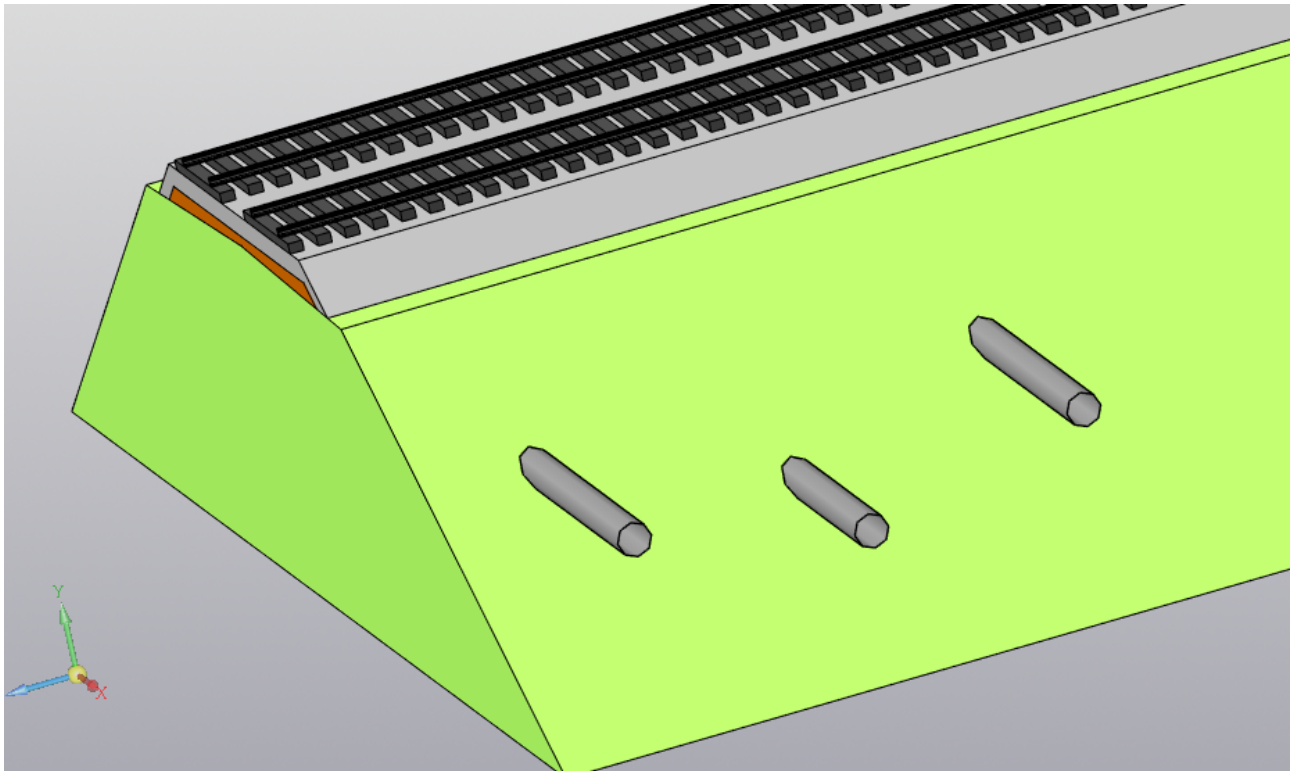


Рисунок 4.1 – Запропонована схема влаштування дренажів

Армування земляного полотна трубчастими дренажами виконується методом продавлювання без зупинки руху поїздів. Максимальний діаметр труб

який можна влаштувати методом проколу становить 600 мм [25]. Крім цього, дані труби є одними із найбільш індустриальних і використовують при осушенні вулиць, автодоріг від ґрунтових вод рис. 4.2 [126].



Рисунок 4.2 – Вигляд перфорованих дренажних труб для армування земляного полотна

Глибина розміщення дренажних труб залежить від рівня залягання водонасичених шарів земляного полотна, які виявляються в результатів георадіолокаційних досліджень [77].

Глибину встановлення дренажних труб визначається за наступною формулою

$$H_m = BH - PB - 0,5, \quad (4.1)$$

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

Слід зазначити, що кількість дренажних труб у тілі земляного полотна визначається розрахунком в залежності від витрати води, яку необхідно пропустити. 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.

4.2. Оцінка напружено-деформованого стану земляного полотна армованого трубчастими дренажами

Розрахункова схема земляного полотна залізничної колії армованого трубчастими дренажами при дії транспортного навантаження, наведена на рис. 4.3.

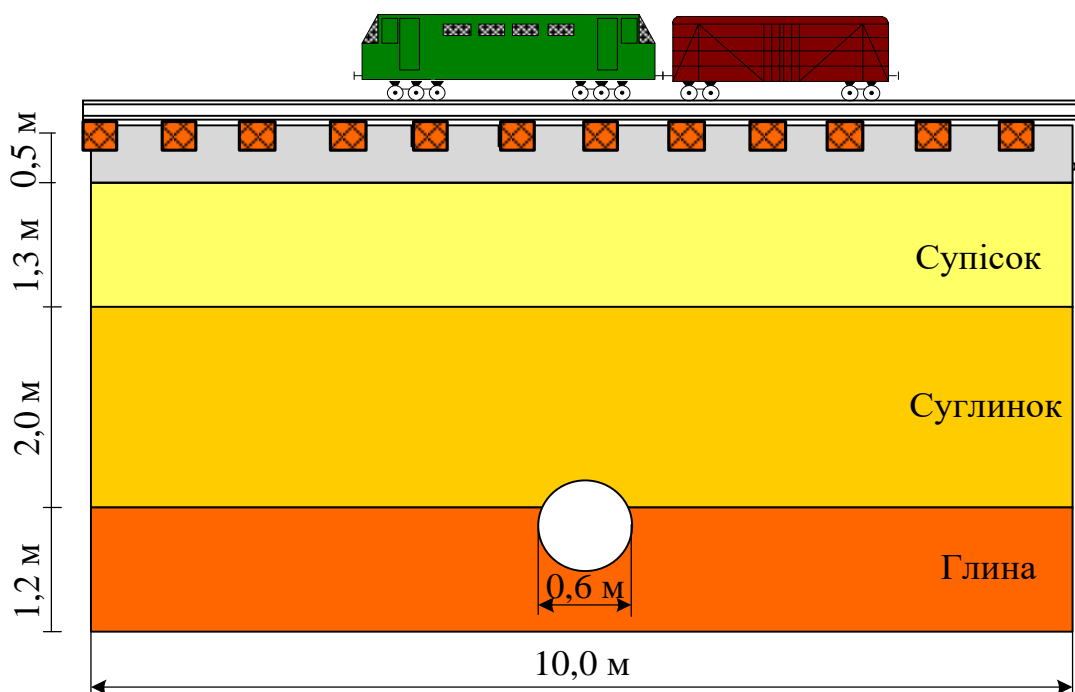


Рисунок 4.3 – Схема геометричного перерізу підсиленого земляного полотна

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^3 . Фізико-механічні характеристики кожного із шарів земляного полотна наведено у табл. 4.1.

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 дренажів у тілі насипу земляного полотна (рис. 4.4 – 4.7).

Таблиця 4.1

Фізико-механічні характеристики ґрунтової ущільнюючої засипки

Назва механічних характеристик ґрунту	Щебеневий баласт	Супісок	Суглинок	Глина
Питома вага, γ кН/м ³	13,8	21,7	22,6	27,4
Коефіцієнт Пуансона, ν	0,27	0,27	0,27	0,27
Коефіцієнт зчеплення c , кПа	0,1	5	13	30
Кут внутрішнього тертя, φ°	43	37	25	17
Кут дилантації, ψ°	0	1	1	2
E , МПа	150	110	28	16,4

Всього було створено чотири розрахункові схеми для різних способів розташування дренажних труб та без них. У першому варіанті (рис. 4.4) проведено розрахунок земляного полотна, яке підтоплене ґрунтовими водами без встановлення трубчастих дренажів. У другому варіанті (рис. 4.5) встановлюється одна дренажна труба у тіло насипу земляного полотна. Третій (рис. 4.6) і четвертий (рис. 4.7) варіант передбачає встановлення відповідно двох та трьох дренажних труб [77].

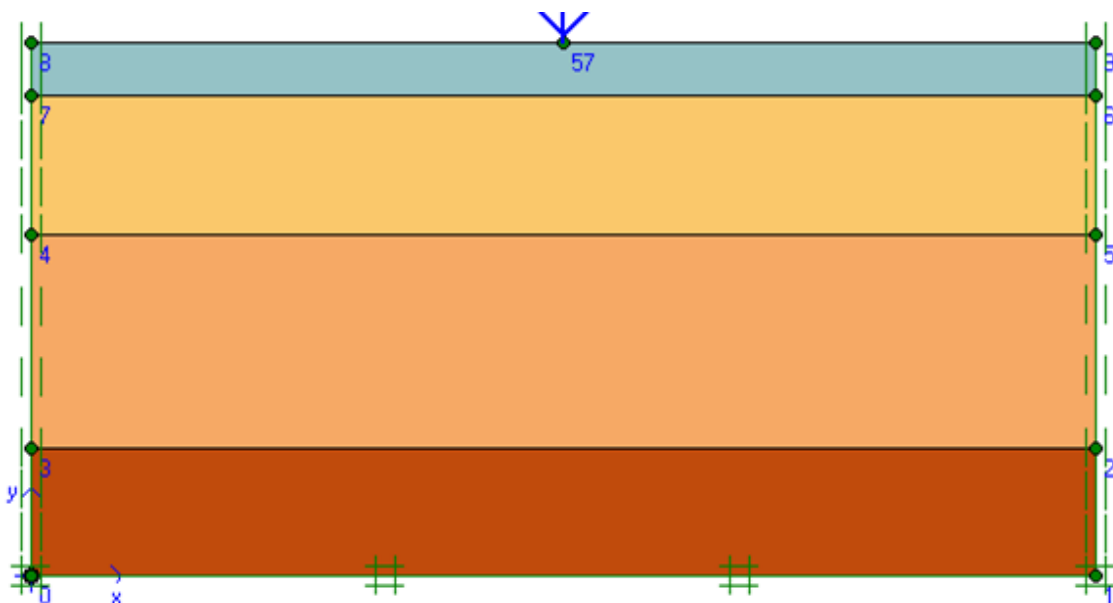


Рисунок 4.4 – Розрахункова схема дослідження напружено-деформованого стану земляного полотна залізничної колії – без улаштування дренажу

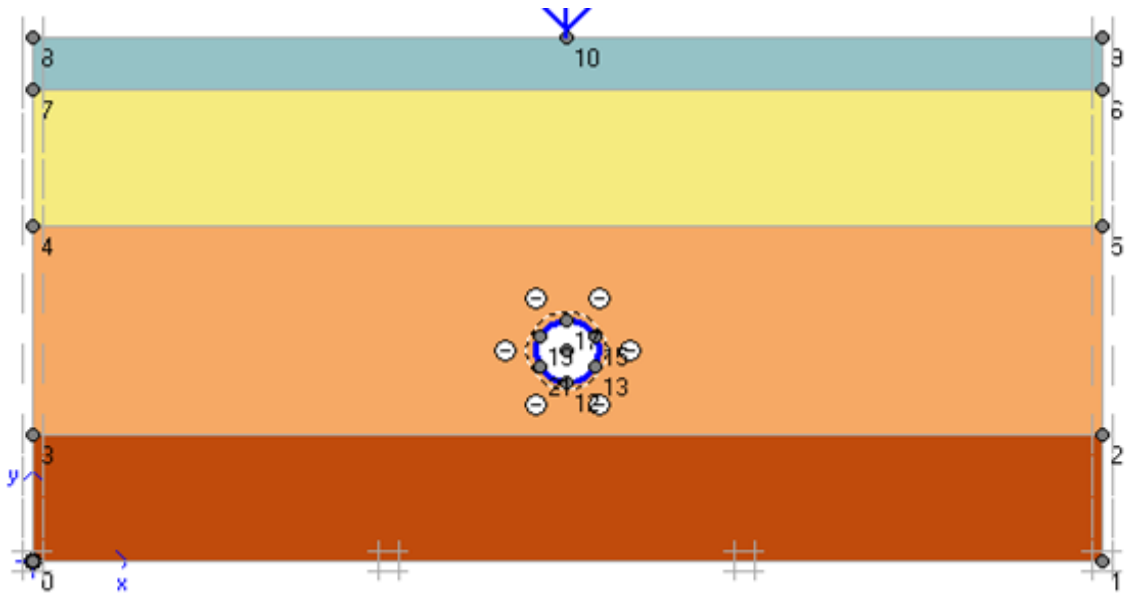


Рисунок 4.5 – Розрахункова схема дослідження напружено-деформованого стану земляного полотна залізничної колії – з улаштуванням однієї дренажної труби

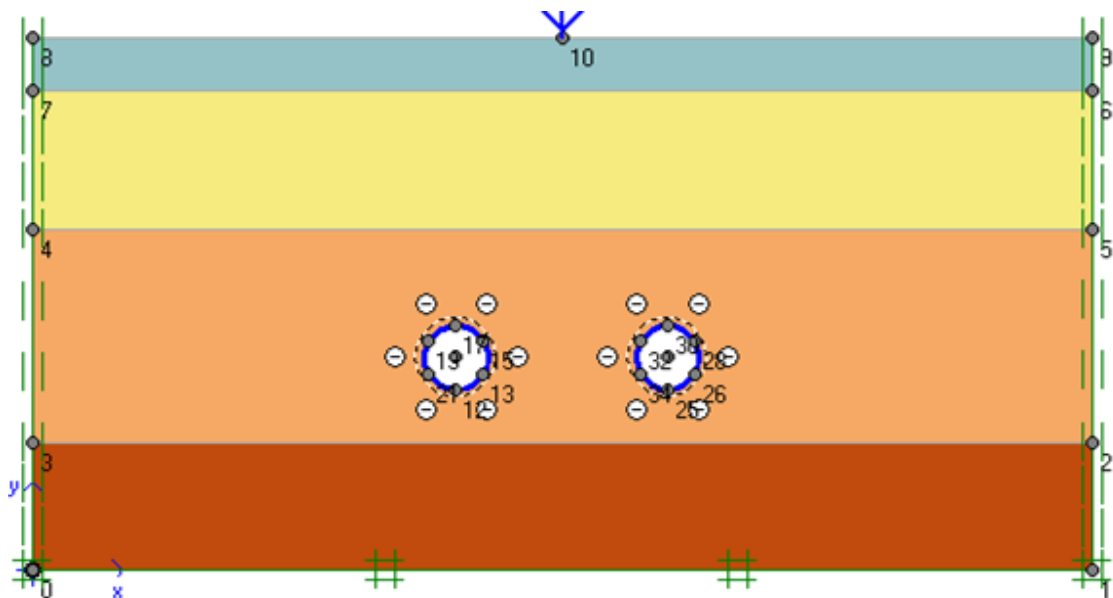


Рисунок 4.6 – Розрахункова схема дослідження напружено-деформованого стану земляного полотна залізничної колії – з улаштуванням двох дренажних труб

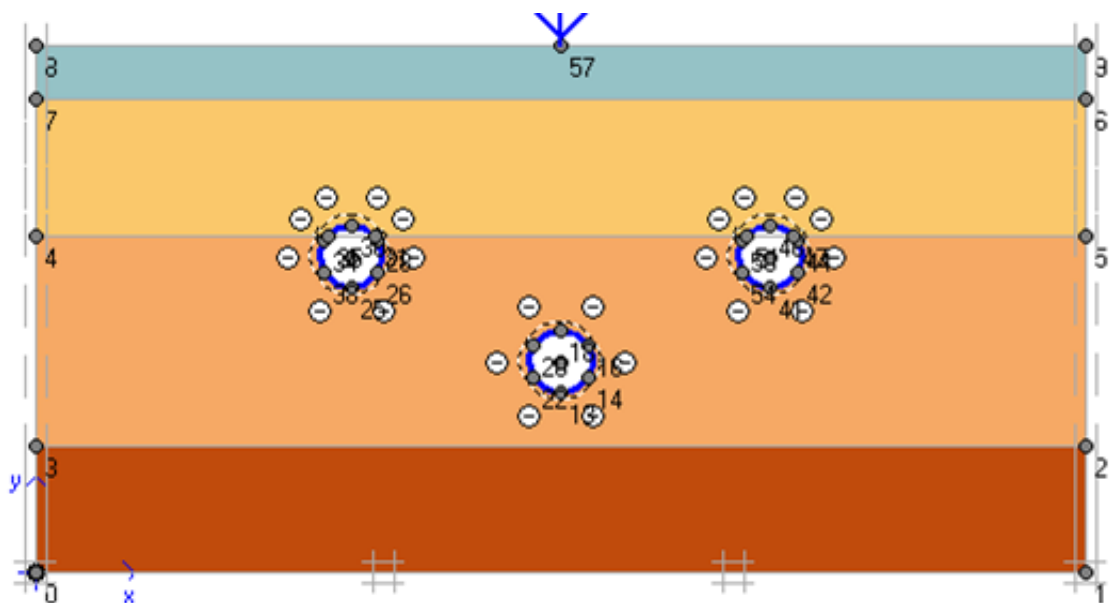


Рисунок 4.7 – Розрахункова схема дослідження напружено-деформованого стану земляного полотна залізничної колії – з улаштуванням трьох дренажних труб

Рівномірно-розподілене тимчасове навантаження задано величиною $q=249,5$ кН/м від еквівалентного навантаження СК 14 [127] при довжині завантаження лінії впливу $\lambda=5,0$ м та відносному положенні вершини лінії впливу при $\alpha=0,5$.

У четвертому варіанті (рис. 4.7) одна із дренажних труб встановлена нижче, порівняно з двома сусідніми, що пояснюється скупченням водонасиченого неоднорідного ґрунту земляного полотна, що видно з результатів георадіолокаційних досліджень (рис. 4.8).

Розрахунок напружено-деформованого стану армованого земляного полотна виконано в нелінійній поставці з використанням пружно-пластичної моделі Мора-Кулона [128, 129] із використанням програми скінченно-елементного аналізу Plaxis 8.2 [130].

Ґрунтовий масив моделювали п'ятнадцятивузловими скінченними елементами [130] із заданням фізико-механічних характеристик кожного шару ґрунту, що наведені у табл. 4.1.

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.

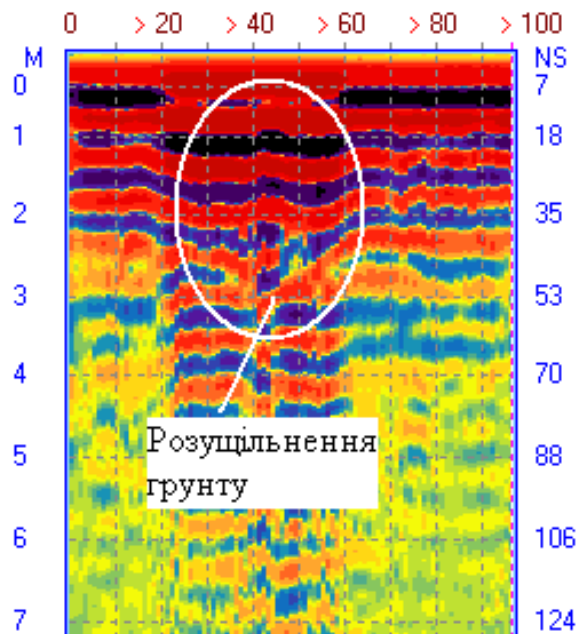


Рисунок 4.8 – Радарограма поперечного електромагнітного профілювання

При розрахунку було задано наступні граничні умови – на бокових сторонах розрахункової моделі, що відповідає контуру земляного полотна, накладена заборона переміщень у горизонтальному напрямку, а в низу накладена заборона вертикальних і горизонтальних переміщень [77].

4.3. Результати багатоваріантних розрахунків напружено-деформованого стану армованого земляного полотна

Результати розрахунку деформованого стану земляного полотна із різними варіантами розміщення трубчастих дренажів у земляному полотні колії наведено на рис. 4.9 – 4.12.

Із рис. 4.9 – 4.12 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 (рис. 4.10); 1,75 мм – дві дренажних труби (рис. 4.11); 1,66 мм – три дренажних труби (рис. 4.12).

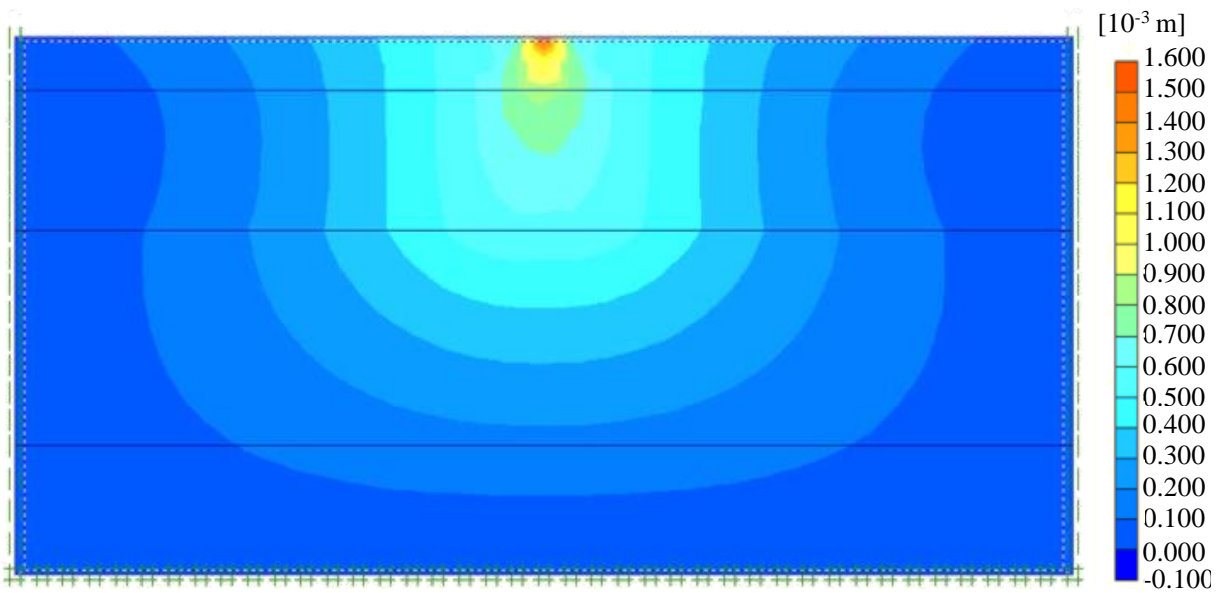


Рисунок 4.9 – Розподіл деформацій у земляному полотні при варіанті – без дренажів

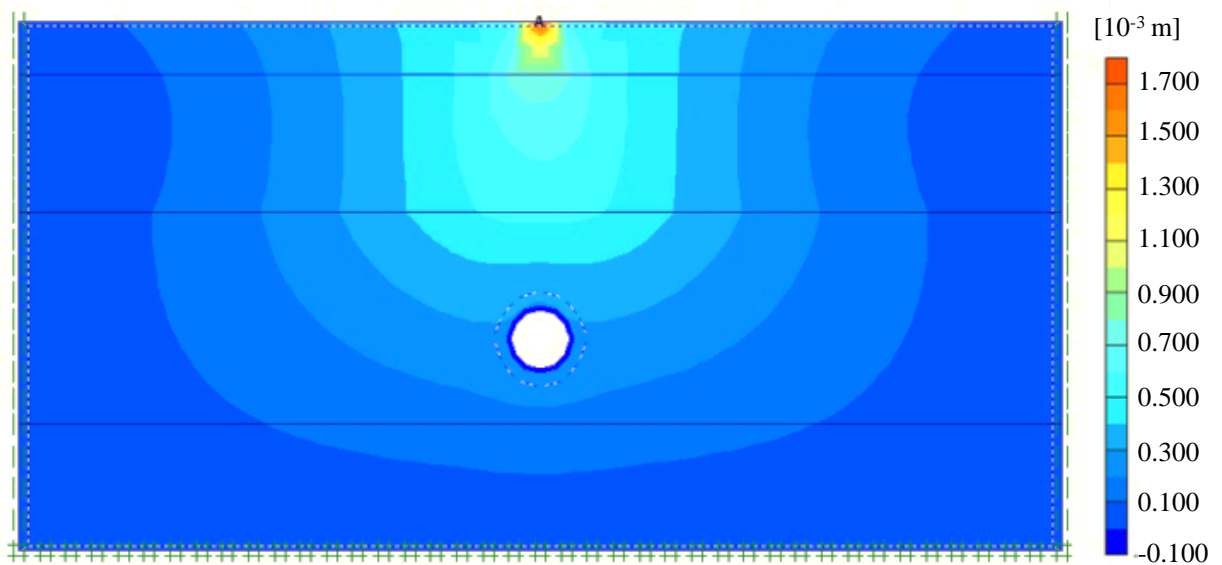


Рисунок 4.10 – Розподіл деформацій у земляному полотні при варіанті – з одною дренажною трубою

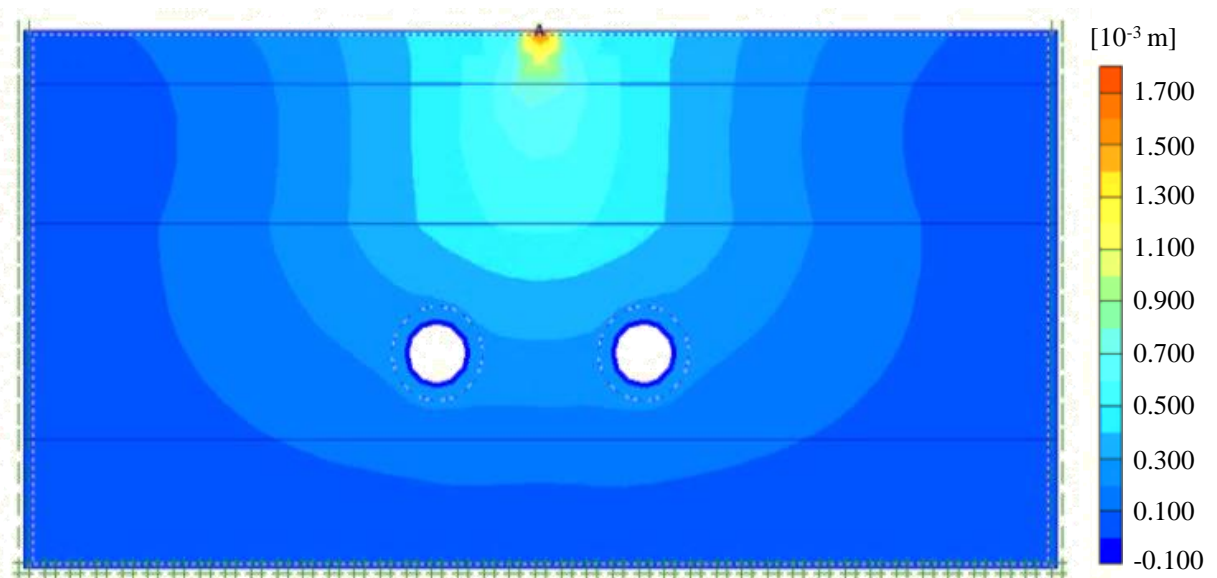


Рисунок 4.11 – Розподіл деформацій у земляному полотні при варіанті – з двома дренажними трубами

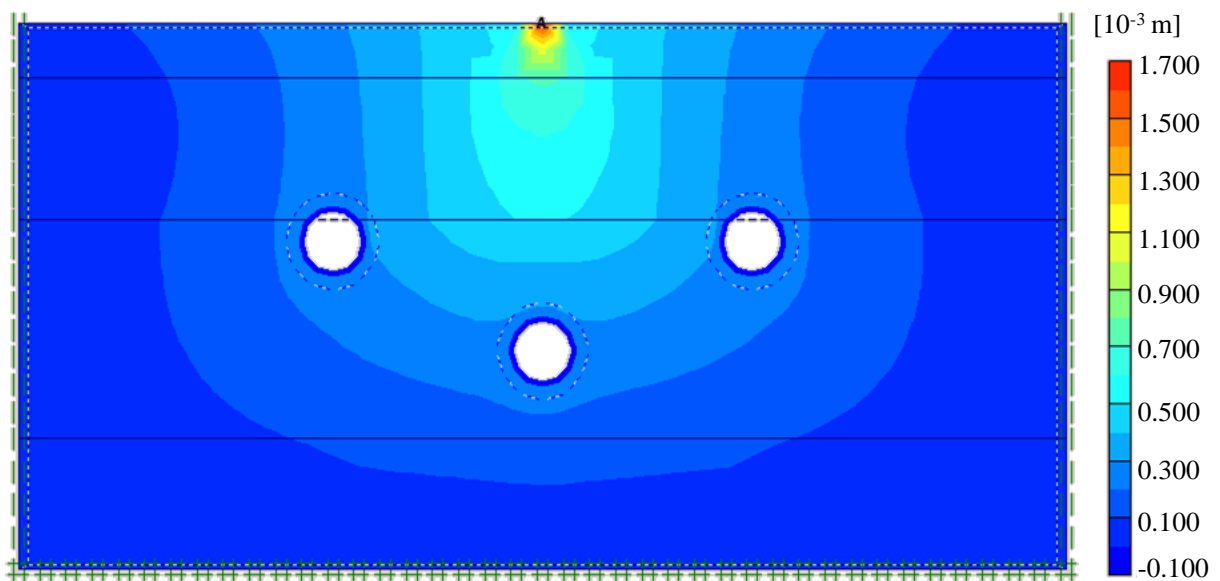


Рисунок 4.12 – Розподіл деформацій у земляному полотні при варіанті – з трьома дренажними трубами

Результати розрахунку напружень, які виникають у земляному полотні наведено на рис. 4.13 – 4.16.

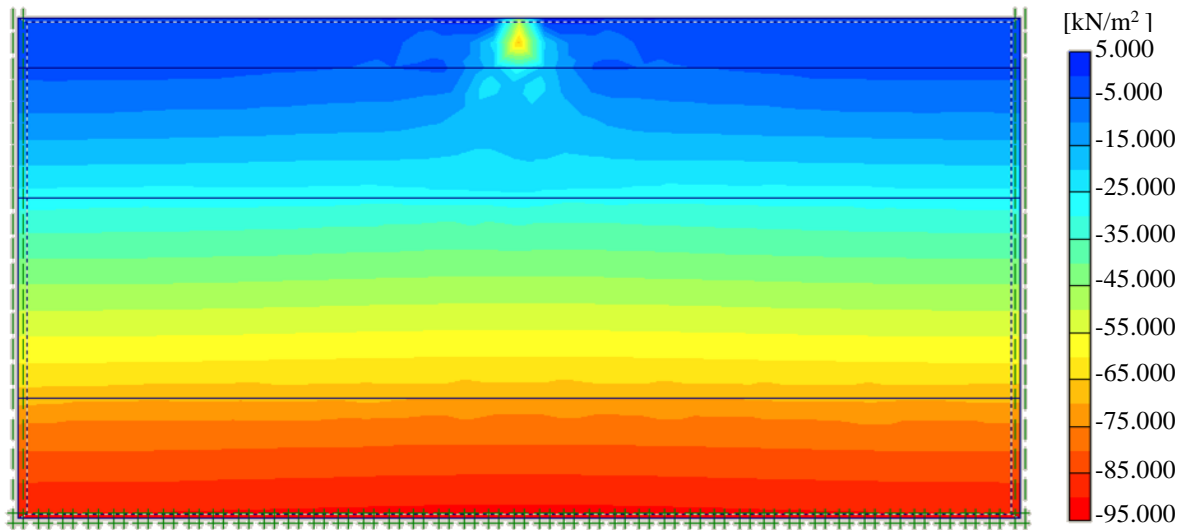


Рисунок 4.13 – Розподіл напружень у земляному полотні при варіанті – без дренажів

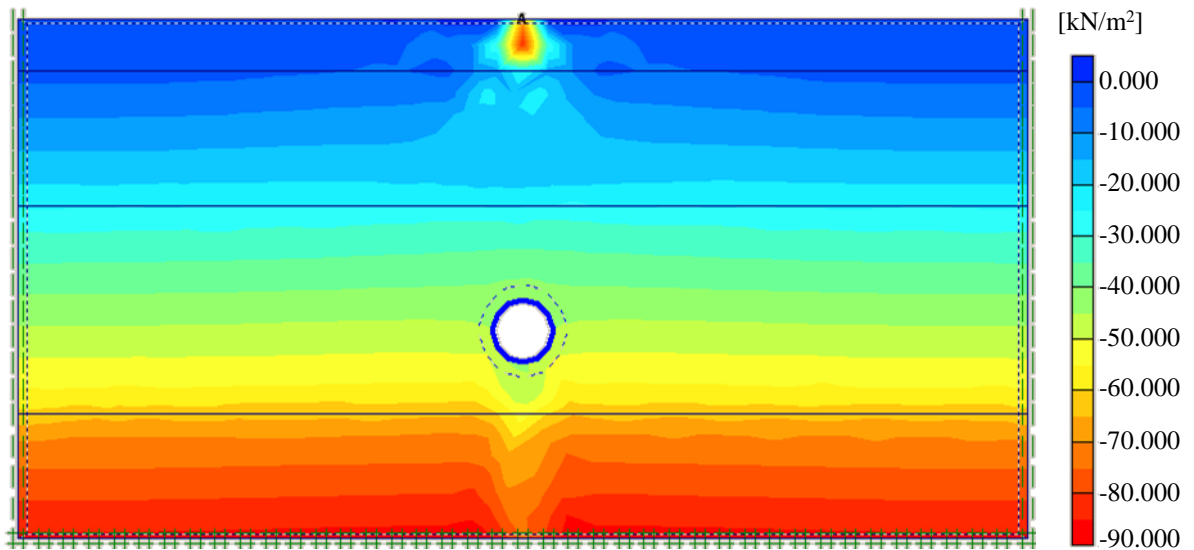


Рисунок 4.14 – Розподіл напружень у земляному полотні при варіанті – з одною дренажною трубою

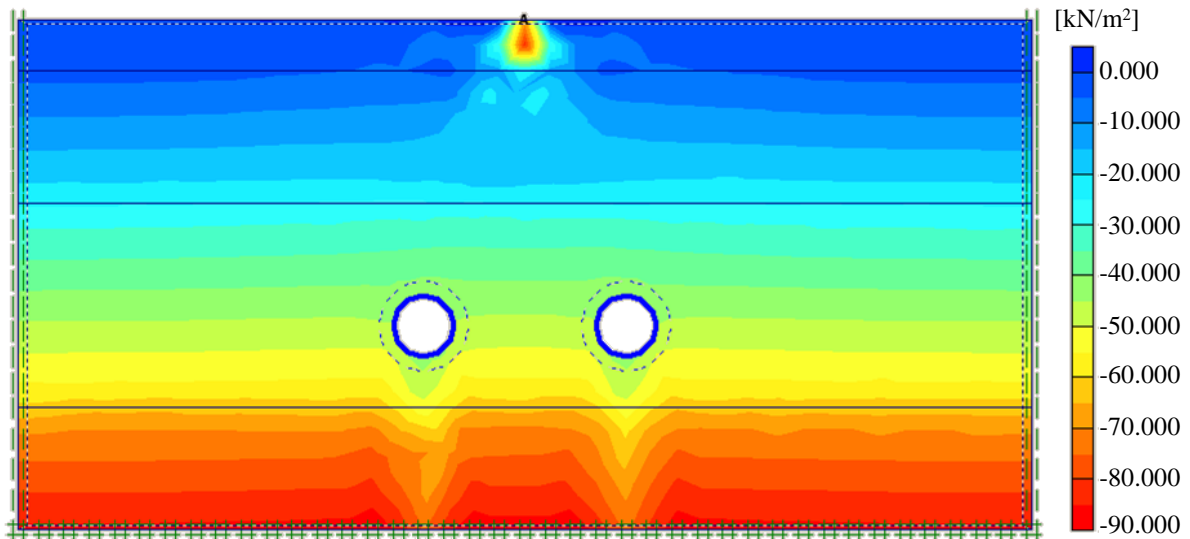


Рисунок 4.15 – Розподіл напружень у земляному полотні при варіанті – з двома дренажними трубами

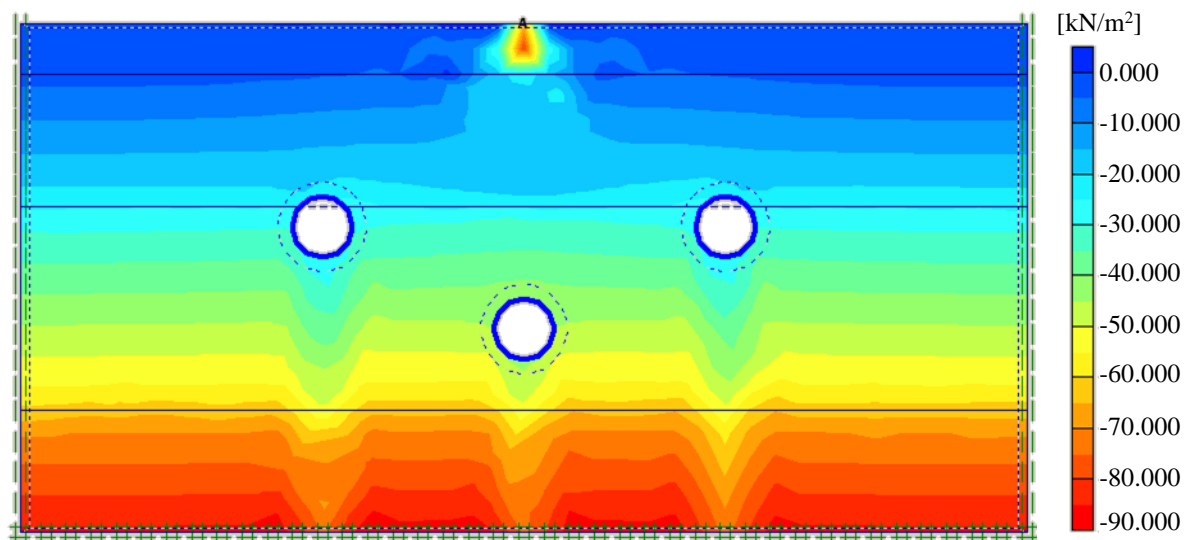


Рисунок 4.16 – Розподіл напружень у земляному полотні при варіанті – з трьома дренажними трубами

Із рис. 4.13 видно, що максимальні напруження, які виникають у земляному полотні без влаштування трубчастих дренажів становлять 92,28 kPa . При влаштуванні трубчастих дренажів виникають напруження 88,97 kPa – один трубчатий дренаж (рис. 4.14), 89,40 kPa – два трубчатих дренажі (рис. 4.15) та 89,58 kPa – три трубчастих дренажі (рис. 4.16).

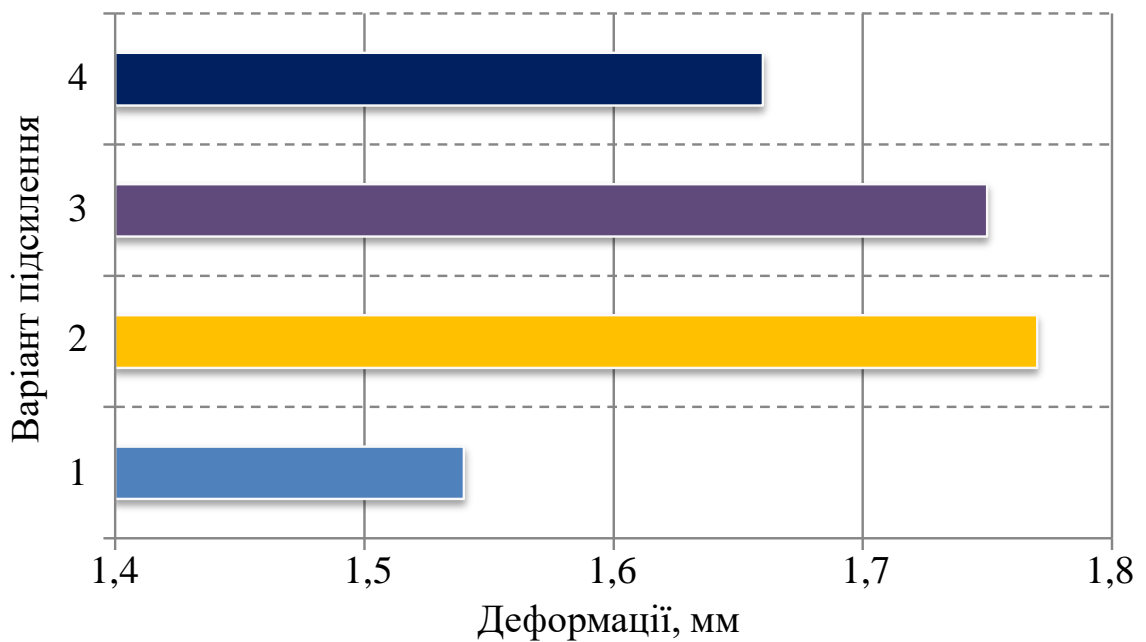
Результати багатоваріантних розрахунків напружено-деформованого стану армованого земляного полотна наведено в табл. 4.2.

Напружено-деформований стану земляного полотна колії

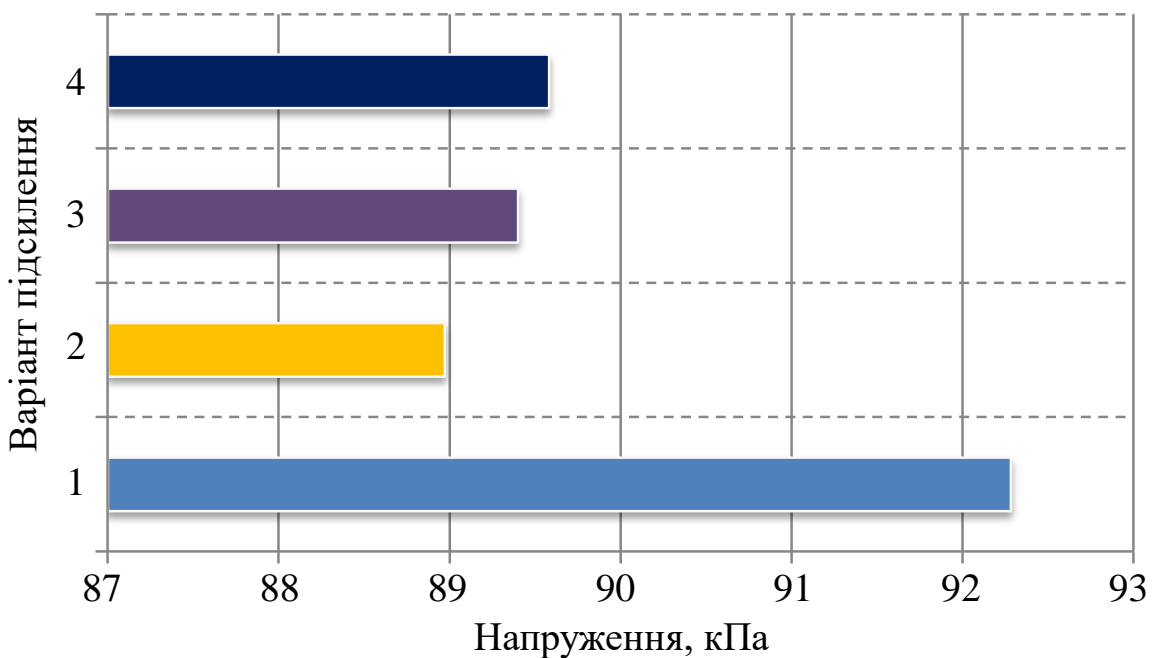
Варіант підсилення	Кількість дренажних труб	Напруження у земляному полотні, кПа	Вертикальні деформації у земляному полотні, мм	Різниця у відсотках	
				Напруження	Деформації
1	–	92,28	1,54	–	–
2	Одна	88,97	1,77	–3,65%	14,93%
3	Дві	89,40	1,75	–3,12%	13,63%
4	Три	89,58	1,66	–2,92%	7,79%

Із результатів розрахунку напружено-деформованого стану земляного полотна (рис. 4.9 – 4.16, табл. 4.2) можна побачити, що застосування трубчастих дренажів призводить до підвищення деформативності земляного полотна залізничної колії, 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 % [77].

Результати порівняння деформацій та напружень земляного полотна в залежності від варіанту армування трубчастими дренажами наведено на рис. 4.17.



a



б

Рисунок 4.17 – Порівняння результатів напружено-деформованого стану земляного полотна: *a* – деформацій; *б* – напружень

Із результатів визначення деформацій (рис. 4.17, *a*) 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.

Максимальні напруження (рис. 4.17, б) 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.

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 сприймає труба [77].

Застосування трубчастих дренажів підвищує деформативність земляного полотна на відміну від земляного полотна без дренажів на 14,93 % (рис. 4.9–4.12). Проте аналізуючи розподіл напружень наведений на рис. 4.13–4.16, 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. 4.17, а) 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 зменшується до 4 % у порівнянні із варіантом без застосування трубчастих дренажів (рис. 4.17, б). Це також позитивно впливає на підвищення несучої здатності земляного полотна.

Приведені результати досліджень напружено-деформованого стану земляного полотна (табл. 4.2, рис. 4.17) 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. 4.2, рис. 4.17). Тому ефективний вибір варіанту розташування дренажної 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 [90, 129].

Таким чином, влаштування дренажних конструкцій для відведення води дозволяє підвищити несучу здатність земляного полотна шляхом покращення міцнісних характеристик ґрунтів земляного полотна. При низькому вмісті вологості всі міцнісні характеристики ґрунтів вище, чим відповідні міцнісні характеристики при більшому вмісті вологи.

4.4. Рекомендації із армування земляного полотна трубчастими дренажами

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 дорогішими та вимагають довготривалої зупинки руху поїздів [131]. 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 дороговартісним.

Поздовжні похили дренажу рекомендується приймати не менше 2% для глинистих і суглинних ґрунтів і не менше 3% для піщаних ґрунтів. Мінімальний ухил дренажу слід визначати, виходячи з мінімально допустимої швидкості течії води в дренажній трубі – 1,0 м/с, для запобігання замулювання дренажних труб. Максимальні ухили слід визначати виходячи з максимально допустимої швидкості течії води у дренажній трубі, розрахунки швидкості течії приведено у [3, 132].

Слід забезпечувати постійний ухил дна дренажу або збільшувати до низової його частини. Дренажі слід проектувати так, щоб виключити можливість замерзання води в них [3, 132].

4.5. Економічна ефективність використання запропонованого пристрою для вимірювання ступеня ущільнення ґрунтів земляного полотна

У даний час велика увага приділяється питанню оптимізації та скорочення витрат у всіх сферах промисловості. Залізничний транспорт не є винятком. При цьому виникає очевидне запитання, «за рахунок яких параметрів можна досягти економії?» у інфраструктурній вертикалі. Вважаємо, що економії слід досягати шляхом впровадження нових, ефективних, ресурсо зберігаючих технологій, які використовуються для діагностики та моніторингу технічного стану елементів інфраструктури.

Економічний ефект від впровадження запропонованого методу вимірювання ступеня щільності ґрунтів земляного полотна, виникає внаслідок скорочення витрат праці на проведення вимірювань та діагностики і використання дешевшого обладнання.

4.5.1. Розрахунок експлуатаційних витрат на проведення вимірювань ступеня ущільнення ґрунтів земляного полотна

Слід зазначити, що розроблений пристрій для визначення ступеня ущільнення земляного полотна, що пропонується застосовувати для пошуку дефектних місць не потребує висококваліфікованих спеціалістів, що економить витрати праці [120, 121].

З метою економічної оцінки ефективності запропонованого пристрою розглянемо два варіанти витрат на реалізацію заходів із діагностики земляного полотна.

Перший варіант – існуючими приладами

$$B_1 = C_d N, \quad (4.2)$$

де: B_1 – розрахункова вартість оплати праці на діагностику земляного полотна; N – загальна кількість діагностованих кілометрів; C_d – оплата праці на діагностування одного кілометра існуючими приладами.

Другий варіант – запропонованим приладом

$$B_2 = C_{дз} N, \quad (4.3)$$

де: B_2 – розрахункова вартість оплати праці на діагностику земляного полотна запропонованим приладом; $C_{дз}$ – оплата праці на діагностування одного кілометра земляного полотна запропонованим приладом.

Нормативний склад бригади при існуючому методу діагностики та при запропонованому – наведено у табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Нормативний термін на діагностування однієї балки

№ пор	Склад бригади	Прилад		
		Георадар	Інерційний пристрій	
1	Інженер 1 категорії	1	1	
2	Інженер 2 категорії	1	1	

Оскільки, при обстеженні дефектного земляного полотна за допомогою існуючих приладів за рік, протяжність рівна 263,2 км. для запропонованого

приладу приймаю таку ж протяжність дефектного земляного полотна (незважаючи на те, що запропонований прилад дає змогу одночасно діагностувати більшу протяжність земляного полотна). Посадові оклади (взяті на початок 2021 року) наведені у табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Грошові виплати бригаді по зарплаті за діагностику одного кілометра
земляного полотна

Посада	Одна година роботи, грн.	Надбавки та доплати			Середній термін часу перевірки 1 км. земляного полотна 8, годин	З урахуванням ФОТ 37,51%, грн.
		Шкідливі умови праці, % / грн.	Премія, % / грн.	Вислуга років %, мін/макс, грн.		
Інженер 1 категорії	46,16	$\frac{12\%}{5,54}$	$\frac{15\%}{6,92}$	$\frac{7\%}{3,23}$	494,8	689,39
				$\frac{40\%}{18,46}$	616,64	847,94
Інженер 2 категорії	42,00	$\frac{12\%}{5,04}$	$\frac{15\%}{6,3}$	$\frac{7\%}{2,94}$	450,24	619,12
				$\frac{40\%}{16,8}$	561,12	771,59
Всього: мінімальна						1308,51
максимальна						1619,53

Примітка: грошові виплати на зарплату конкретній людині бригади залежать від стажу її роботи, тому розраховано мінімальну і максимальну виплати при діагностування одного кілометра земляного полотна.

Використовуючи значення табл. 4.4, розрахуємо оплату праці на діагностування одного кілометра земляного полотна приладами:

- існуючими приладами:

$$C_d = 1308,51 \text{ грн.};$$

- запропонованим приладом:

$$C_{дз} = 1308,51 \text{ грн.}$$

За формулами (4.2) та (4.3) визначаємо розрахункову вартість оплати праці для виконання робіт щодо діагностики земляного полотна існуючими приладами та запропонованим:

- при діагностиці існуючими приладами:

$$B_1 = C_d N = 1308,51 \cdot 263,2 = 344399,83 \text{ грн.};$$

- при діагностиці запропонованим приладом:

$$B_2 = C_{dz} N = 1308,51 \cdot 263,2 = 344399,83 \text{ грн.}$$

Порівняємо витрати оплати заробітної плати бригаді на проведення діагностики земляного полотна за рік існуючим і новим методами за формулою:

$$B = B_1 - B_2. \quad (4.4)$$

Різниця оплати за двома варіантами буде становити

$$B = B_1 - B_2 = 344399,83 - 344399,83 = 0 \text{ грн.}$$

Оскільки витрати на оплату праці однакові при двох методах діагностики то різниці між обома методами немає, потрібно проводити оцінку економічної ефективності від застосування цих методів.

4.5.2. Оцінка економічної ефективності від використання запропонованого пристрою для оцінки ступеня щільності земляного полотна

Приведені витрати існуючих приладів розрахуємо за формулою:

$$Z_1 = P_1 + (\rho_p + E_n)K_1, \quad (4.5)$$

де: P_1 – річні поточні витрати (експлуатаційні витрати) існуючих приладів діагностування (без урахування амортизаційних відрахувань на реновацію; ρ_p – коефіцієнт реновації основних фондів при використанні нової техніки; E_n – норматив приведення різночасових витрат та результатів, чисельно рівний нормативу ефективності капітальних вкладень ($E_n = 0.15$); K_1 – одноразові витрати при використанні існуючої нової техніки (у випадку їх розподілу за часом, вони приводяться за фактором часу до розрахункового року).

Приведені витрати запропонованого приладу:

$$Z_2 = P_2 + (\rho_p + E_n)K_2, \quad (4.6)$$

де: P_2 – річні поточні витрати (експлуатаційні витрати) запропонованого приладу діагностування (без урахування амортизаційних відрахувань на реновацію; K_2 – одноразові витрати при використанні запропонованої нової техніки (у випадку їх розподілу за часом, вони приводяться за фактором часу до розрахункового року).

Річні поточні витрати на експлуатацію приладів наведені у табл. 4.5. У даному випадку річні поточні витрати приймаємо рівними, як з існуючими приладами діагностики так і при запропонованому.

Таблиця 4.5

Річні поточні витрати, грн., на експлуатацію приладів становлять

№п/п	Назва показників	Вартість, грн.	Примітки
1	Спожита електроенергія	600	
2	Експлуатаційні матеріали	800	
3	Технічне обслуговування	1500	
Всього		2900	

Вартість закупівлі складових існуючої нової техніки наведена у табл. 4.6, а запропонованої нової – у табл. 4.7. За відсутності оптових цін на нову техніку вони встановлюються розрахунковим шляхом. На ранніх стадіях розробки і проектування нової техніки, коли відсутня звітна або нормативна інформація, при визначенні економічного ефекту приймають розрахункові ціни, до складу яких включають витрати на розробку й виготовлення нової техніки (ціни, взяті на початок 2021 року).

Коефіцієнт реновації основних фондів при використанні нової техніки, визначають з урахуванням фактора часу, який розраховується за формулою:

$$\rho_p = \frac{E_n}{(1+E_n)^{t_{cl}} - 1}, \quad (4.7)$$

де: t_{cl} – термін служби нової техніки; E_n – норматив приведення різночасових витрат та результатів, чисельно рівний нормативу ефективності капітальних вкладень ($E_n = 0.15$).

Розрахуємо коефіцієнт реновації основних фондів при використанні нової техніки за формулою (4.7):

$$\rho_p = \frac{0,15}{(1 + 0,15)^7 - 1} = 0,075.$$

Таблиця 4.6

Складові при роботі з приладом георадар ЛОЗА-В

№п/п	Назва складових приладу	Кількість. шт.	Вартість, одиниці, грн.	Вартість всього, грн.
1	Георадар ЛОЗА-В +програмне забезпечення	1	320000	320000
2	Комп'ютер	1	10 000	10 000
3	Сумарна вартість			330 000

Таблиця 4.7

Складові приладу для оцінки ступеня щільності ґрунту земляного полотна

№п/п	Назва складових приладу	Кількість. шт.	Вартість, одиниці, грн.	Вартість всього, грн.
1	Комп'ютер	1	10 000	10 000
2	АЦП	1	9 000	9 000
3	Аналогові датчики типу ADXL 335	50	50	2500
4	Програмне забезпечення	1	7 000	7 000
5	Сумарна вартість			28 500

Використовуючи значення табл. 4.5, 4.6, 4.7 розрахуємо приведені витрати на реалізацію заходів з експлуатації існуючого і запропонованого методу діагностування за формулами (4.5, 4.6)

- при існуючому методу

$$Z_1 = 2900 + (0,075 + 0,15) \cdot 330000 = 77\,150 \text{ грн.};$$

- при запропонованому методу

$$Z_2 = 2900 + (0,075 + 0,15) \cdot 28500 = 9312,5 \text{ грн.}$$

Отже, приведені витрати на реалізацію заходів з експлуатації запропонованого методу діагностування Z_2 є нижчими за існуючі. При цьому різниця приведених витрат складає 67837,5 грн.

Загальні витрати на проведення робіт з діагностики земляного полотна розрахуємо за формулами

- при існуючому методу:

$$D_1 = B_1 + Z_1 \quad (4.8)$$

$$B_1 = 344399,83 + 77150,00 = 421549,83.$$

- при запропонованому методу:

$$D_2 = B_2 + Z_2 \quad (4.9)$$

$$B_2 = 344399,83 + 9312,5 = 353\,712,33 \text{ грн.}$$

Отже, різниця витрат буде рівна (чистий дохід):

$$D = 67837,5 \text{ грн.}$$

Розрахуємо $T_{\text{ок}}$ (термін окупності) запропонованого методу за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\sum K}{D_1 - D_2}, \quad (4.10)$$

де $\sum K$ – сумарне інвестування за рік; $D_1 - D_2$ – чистий дохід за рік.

Для діагностування земляного полотна по Львівській залізниці потрібно закупити 1 запропонований прилад.

Термін окупності запропонованого методу складе:

$$T_{\text{ок}} = \frac{28500}{67837,5} = 0,42 \approx 5 \text{ місяців.}$$

4.6. Висновки до розділу 4

Із проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Для підвищення несучої здатності проблемних ділянок земляного полотна можливе застосування трубчастих дренажів 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.

2. Встановлено, що при оцінці напружено-деформованого стану армованого земляного полотна найбільш коректним є використання методу скінчено-елементного моделювання. 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.

3. 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.

4. 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.

5. При діагностиці земляного полотна рекомендовано застосовувати розроблений прилад для визначення ступеня щільності ґрунту. Оскільки, приведені витрати на реалізацію заходів із експлуатації запропонованим пристроєм, менші від існуючого на 67 тис. грн. Термін окупності при використанні запропонованого пристрою складає 5 місяців.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконаних теоретичних і експериментальних досліджень, приведених у дисертаційній роботі, вирішена актуальна задача з розробки методів оцінювання та підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна, при дії статичних та динамічних навантажень від транспортних засобів. Загалом по роботі основні результати та висновки полягають у наступному:

1. Аналіз науково-технічної літератури показує, що значна кількість ділянок земляного полотна залізниць знаходиться у погіршеному стані (870,8 км). Доведено, що для зменшення кількості проблемних ділянок земляного полотна є своєчасне їх виявлення та прийняття заходів з підвищення несучої здатності земляного полотна. Встановлено, що існуючі методи діагностики земляного полотна мають високу вартість, не завжди є ефективними, потребують використання додаткового обладнання, яке потребує високої кваліфікації оператора. Для вирішення цієї задачі було розроблено нові підходи щодо дослідження земляного полотна.

Отже, для захисту земляного полотна від руйнівної дії природних чинників та підвищення несучої здатності, одним із варіантів запропоновано застосування трубчастих дренажів, а пошук дефектних місць земляного полотна та місця встановлення дренажів пропонується виконувати георадіолокаційним методом та методом на основі імпульсного відклику.

2. Проведено експериментальну оцінку технічного стану неоднорідного земляного полотна залізничної колії георадіолокаційним методом на ділянках залізничної колії Регіональної філії Львівська залізниця АТ Укрзалізниця. На основі проведених георадіолокаційних досліджень виявлено ділянки неоднорідного та перезволоженого земляного полотна. Прийнято обґрунтовані проектні заходи, щодо відновлення та підвищення несучої здатності і вибору ефективного способу підвищення несучої здатності земляного полотна.

3. За допомогою удосконаленої методики визначення несучої здатності неоднорідного земляного полотна методом інерційних вимірювань прискорень

встановлено, що при проходженні вантажного поїзда величина прискорень у технічно справному земляному полотні становить до 9 м/с^2 , а максимальне переміщення $0,9 \text{ мм}$. У технічно несправному (дефектному, “хворому” місці) земляному полотні величина прискорень становить 13 м/с^2 , а максимальне переміщення $2,1 \text{ мм}$. При проходженні пасажирського поїзда величина прискорень у технічно справному земляному полотні становить до 7 м/с^2 , а максимальне переміщення $0,8 \text{ мм}$. У технічно несправному (дефектному, “хворому” місці) земляному полотні величина прискорень становить 13 м/с^2 , а максимальне переміщення $1,9 \text{ мм}$. Отже, різниця переміщень становить при проходженні вантажного поїзда – $2,3$ рази, а пасажирського – $2,4$ рази.

Встановлено, що при неоднорідному земляному полотні кут внутрішнього тертя є найбільшим у баластному шарі та становить 63° і зменшується по глибині насипу – 16° . Питоме зчеплення ґрунтів у поперечному перерізі насипу є найбільшим в основі насипу та становить 36 кПа і найменшим у баластному шарі – $0,9 \text{ кПа}$.

Досліджено, що суттєве вібраційне розладнання виникає у розподілі кута внутрішнього тертя, а саме у тілі насипу із суглинку та баластному шлейфі, що знаходяться близько до зони прикладення вібраційного навантаження. Вібраційне навантаження також чинить вплив на зменшення питомого зчеплення у суглинку тіла насипу.

4. Розроблено пристрій для експериментальних досліджень ступеня ущільнення земляного полотна на основі хвильового імпульсу, що дозволяє проводити моніторинг проблемних місць земляного полотна і приймати своєчасні рішення стосовно запобігання виникненню порушень в його роботі.

У результаті чого встановлено, що при збільшенні ущільнення земляного полотна швидкість поширення пружної звукової хвилі збільшується. Відношення часу проходження пружної хвилі удару через однорідне земляне полотно у неущільненому стані, до часу при максимально ущільненому земляному полотні становить $1,49$ рази, а при неоднорідному земляному полотні – $1,41$.

5. Проведено оцінку напружено-деформованого стану армованого земляного полотна з використання методу скінчено-елементного моделювання. У результаті багатоваріантних розрахунків 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.

6. Розроблено та запатентовано спосіб підвищення несучої здатності перезволоженого земляного полотна. Суть цього способу полягає у застосуванні трубчастих дренажів, які вкладаються у тіло земляного полотна у поперечному напрямку. Для підвищення несучої здатності проблемних ділянок земляного полотна запропоновано конструктивну схему армування трубчастими дренажами у його поперечному напрямі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стратегія АТ «Укрзалізниця» на 2019–2023 роки [Електронний ресурс] режим доступу: [https://www.uz.gov.ua/files/file/about/documents/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D1%96%D1%8F-5-Typography%20\(%D1%83%D0%BA%D1%80\).pdf](https://www.uz.gov.ua/files/file/about/documents/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D1%96%D1%8F-5-Typography%20(%D1%83%D0%BA%D1%80).pdf)
2. Інструкція з утримання земляного полотна залізниць України / Л. І. Дяченко, Г. П. Кислий, В. О. Курач – Дніпро: Вид-во АТЗТ ВКФ “Арт-Прес”, 2001. – 104 с.
3. Даніленко Е. І. Залізнична колія. Підручник для вищих навчальних закладів (у 2-х томах). Київ. Інпрес. – 2010. – Том 2. – 456 с.
4. Залізничники завершують відновлення колій, пошкоджених повенями на Івано-Франківщині (2020) [Електронний ресурс] режим доступу: <http://railway.lviv.ua/info/press-center/news/article/2020/july/2105/>
5. Новорічний “сюрприз” від стихії Львівський залізничник. (2008) [Електронний ресурс] режим доступу: <http://railway.lviv.ua/fileadmin/gazeta/2008/N01/2.pdf>
6. Утешбаева А. А. Причины вызывающие деформации и разрушения земляного полотна. / А. А. Утешбаева, Ж. Жанабергенова // Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика. – 2017. – с. 218-221.
7. Ахраменко Г. В. Проектирование земляного полотна автомобильных дорог в сложных природных условиях: учеб.-метод. пособие по курсовому и дипломному проектированию / Г. В. Ахраменко, Т. А. Дубровская; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2018. – 51 с. ISBN 978-985-554-732-8.
8. Сулейманова М. А. Факторы, вызывающие повреждения и дефекты в земляном полотне железных дорог./ М. А. Сулейманова, Д. Х. Худойкулов, Ш. Р. Махмадов// Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования, 2017. – Вып. 3. – С. 53–62.

9. Kovalchuk V. Stability of the Railway Subgrade under Condition of Its Elements Damage and Severe Environment. / V. Kovalchuk, M. Sysyn, O. Nabochenko, A. Pentsak, O. Voznyak, S. Kinter // MATEC Web of Conferences 2nd International Scientific and Practical Conference “Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport” (EOT-2019) Lviv, Ukraine, 2019, September 19-20, 294, 10.
10. Железнов М. М. Влияние длительности и частоты приложения нагрузки на напряженно-деформированное состояние пути. / М. М. Железнов, В. О. Певзнер, В. П. Соловьев, А. В. Анисин, И. М. Анисина, С. С. Надежин, И. В. Третьяков // *Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2018; 77(6): 364-367. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-364-367>
11. Коншин Г. Г. Оценочные критерии воздействия на земляное полотно вагонов с повышенными осевыми нагрузками // Труды Международной научно-практической конференции. «Транссибирская магистраль на рубеже XX-XXI веков: Пути повышения эффективности использования перевозочного потенциала» М.: МИИТ, 2003. С.367-369.
12. Петренко В. Д. Аналіз стійкості земляного полотна для реалізації умов його безпеки при підвищенні швидкості руху. / В. Д. Петренко, О. Л. Тют'якін, В. П. Купрій // *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. – 2015. – №. 9. – С. 76–85.
13. Ашпиз Е. С. Мониторинг земляного полотна при эксплуатации железных дорог / Е. С. Ашпиз. – М.: Путь-пресс, 2002. –112 с.
14. Коншин Г. Г. Методы и средства диагностики земляного полотна: Учебное пособие. – М.: МИИТ, 2004. – 213 с.
15. Petrenko V. D. Research of parameters of the modernized subgrade / V. D. Petrenko, A. M. M. Alkhdour, A. L. Tiut'kin, V. V. Kovalevich // *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2012. – №. 41. – С. 164-169.

16. Briggs K. M. Failures in transport infrastructure embankments. / K. M. Briggs, F. A. Loveridge, S. Glendinning. // Engineering Geology, 2017. – Vol. 219. – P. 107–117. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.07.016>
17. Leng W. Investigating strength and deformation characteristics of heavy-haul railway embankment materials using large-scale undrained cyclic triaxial tests./ W. Leng, Y. Xiao, R. Nie, W. Zhou, W. Liu// International Journal of Geomechanics, 2017. – Vol. 17(9), 04017074. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000956](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000956).
18. Грицьк В. И. Расчеты земляного полотна железных дорог: Учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / Грицьк В.И. – М.: УМК МПС, 1998. – 520 с.
19. Грицьк В. И. Возможные деформации земляного полотна: учеб. иллюстрированное пособие для студ. вузов, техникумов и колледжей ж.-д. трансп. / В. И. Грицьк. – М.: Маршрут, 2003. – 64 с.
20. Расчеты и проектирование железнодорожного пути: Учебное пособие для студентов вузов ж.-д. трансп./ В. В. Виноградов, А. М. Никонов, Т. Г. Яковлева и др.; Под ред. В. В. Виноградова, А. М. Никонова. – М.: Маршрут. – 2003. – 486 с. ISBN 5-89035-112-5
21. Земляное полотно железных дорог. / М. А. Фришман, И. Н. Хохлов, Т. Г. Яковлева // Издат. Транспорт.: Москва. – 1964. – 296 с.
22. Шахунянц Г. М. Земляное полотно. М.: Гос. транспорт. ж.-д. изд-во, – 1946. – 342 с.
23. Ашпиз Е. С. Мониторинг состояния высоких насыпей Верховской дистанции пути Московской железной дороги / Е. С. Ашпиз, А. Н. Савин // М-лы третьей науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Москва: МГУПС, 2006. – С. 76–79.
24. Nabochenko O. Дослідження розладнання геометрії залізничної колії внаслідок нерівномірних осідань баластного шару. / O. Nabochenko, M. Sysyn, V. Kovalchuk, Y. Kovalchuk, A. Pentsak, S. Braichenko // Eastern-

- European Journal of Enterprise Technologies, 2019. – Vol. 1(7 (97)). – P. 50–59. doi:<http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154864>
25. 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
 26. Петренко В. Д. Применение георадиолокационного метода при исследовании дефектов высоких насыпей железнодорожного земляного полотна / В. Д. Петренко, В. И. Харлан, В. Н. Косяк, В. В. Ковалевич // Стр-во, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. ПГАСА. – Днепропетровск, 2011. – Вып. 61. – С. 312-316.
 27. Петренко В. Д. Результати обстеження георадарним комплексом дефектних місць земляного полотна Донецької залізниці / В. Д. Петренко, В. В. Ковалевич // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2014. – Вып. 5(53). – С. 83–91.
 28. Батракова А. Г. Визначення вологості ґрунту земляного полотна із застосуванням польового георадара / А. Г. Батракова, В. О. Процюк // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: Зб. Наукових праць, 2017. – Вып.. 100. – С. 48–56.
 29. 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. – Вып. 19. – С. 119–139.
 30. Владов М. Л. Введение в георадиолокацию: учебное пособие / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов.// – М.: Издательство МГУ, 2004. – 153 с.
 31. Фоменко Н. Е. Возможности георадарного метода при обследовании подпорных стен и ограждающих конструкций. / Н. Е. Фоменко, Д. М. Гапонов, В. В. Капустин, В. В. Попов, Л. Н. Фоменко // Известия Томского

- политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.– 2017. Т. 328. № 3. С. 37–45.
32. Su J. et al. Application and Analysis of Ground Penetrating Radar in Non-destructive Testing and Evaluation of Civil Airport Runway //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2018. – Т. 153. – №. 3. – P. 032011.
33. Масалов С. О. Радиолокаційний моніторинг технічного стану підповерхневої частини інженерних споруд. / С. О. Масалов, Г. П. Почанін, В. П. Рубан, П. В. Холод // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2016. – №1. – С. 17–23.
34. Семашкин К. В. Практика инженерно-геологического обследования подтопленной дорожной насыпи методом георадиолокации. / К. В. Семашкин // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 30(49). С. 320–327.
35. Греховодов А. А. Практика применения георадара при обследовании земляного полотна. / А. А. Греховодов //Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог. Сборник научных трудов ОАО ГИПРОДОРНИИ. – 2012. – №. 3. – С. 34–41.
36. Гапонов Д. А. Применение георадара для контроля качества закрепления грунтов. / Д. А. Гапонов, Л. Н. Фоменко, Р. Д. Шеремет //Инженерный вестник Дона. – 2016. – Т. 42. – №. 3 (42).
37. Лаломов Д. А. Особенности совместной обработки и интерпретации данных электротомографии и георадиолокации в условиях влияния техногенных помех на объектах транспортного строительства. / Д. А. Лаломов, А. И. Артюгин // Георесурсы. – 2014. – №. 3 (58). – С. 37–40.
38. Шаповалов В. Л. Подходы к определению плотности грунтов земляного полотна георадиолокационным методом при его строительстве / В. Л. Шаповалов, В. А. Явна, М. В. Окост, З. Б. Хакиев, А. В. Морозов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – №. 1. – С. 100–110.

39. Старовойтов А. В. Интерпретация георадиолокационных данных: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 2008. – 192 с.
40. Изюмов, С.В. Теория и методы георадиолокации: Учеб. пособие / С.В. Изюмов, С.В. Дручинин, А.С. Вознесенский. – М.: Издательство «Горная книга», Издательство Московского государственного горного университета, 2008. – 196 с.
41. Maślakowski M. Diagnostyka stanu podłoża i podtorza kolejowego metodą georadarową (GPR). / M. Maślakowski, A. Zbiciak, K. Józefiak, T. Piotrowski // TTS Technika Transportu Szynowego. – 2015. – Т. 22. – Р. 1045–1048.
42. Изюмов С. В. Использование георадаров серии «ГР-ГЕО» в инженерной геофизике и строительстве. / С. В. Изюмов, С. В. Дручинин // Техника и технология: подземное пространство мира. – 2005. – №6. – С. 14–21.
43. Вопросы подповерхностной радиолокации: коллективная монография / под ред. А.Ю. Гринева. – М.: Радиотехника, 2005. – 416 с.
44. Явна В. А. Определение засоренности балластного материала железнодорожного пути методом георадиолокации. / В. А. Явна, В. Л. Шаповалов, А. В. Морозов, К. М. Ермолов // Инженерные изыскания. – 2015. – №. 10–11. – С. 60–65.
45. Жуков О. Х. Применение георадара для изучения состояния земляного полотна. / О. Х. Жуков, Д. В. Дмитриевцев // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – №. 12. – С. 27–29.
46. 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.
47. De Bold R. Non-Destructive Evaluation of Railway Trackbed Ballast/ PhD Thesis: Institute for Infrastructure and Environment, School of Engineering, University of Edinburgh, 2011. – P. 22–35.
48. Esveld C. Modern railway track / C. Esveld, C. Esveld, // Zaltbommel: MRT-productions. – Vol. 385.– 2001.

49. Lam H. F. Railway Ballast Diagnose through Impact Hammer Test / H. F. Lam, M. T. Wong // The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. Procedia Engineering. – 2011. – № 14. – S. 185–194. doi:10.1016/j.proeng.2011.07.022.
50. Izvolt L. Analysis of results of monitoring and prediction of quality development of ballasted and ballastless track superstructure and its transition areas. / L. Izvolt, J. Sestakova, M. Smalo // COMMUNICATIONS Scientific Letters of the University of Zilina, 2016. – 18(4):1929.
51. Antipov V. V. Modern nondestructive method of researching of geological engineering section / V. V. Antipov, V. G. Ofrikhter // PNRPU Bulletin Construction and architecture. – 2016. – Vol. 7, no. 2. – P. 37–49. doi: 10.15593/2224-9826/2016.2.04.
52. Ковальчук В. В. Несуча здатність транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій в умовах експлуатації. / дис. док. тех. наук. – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро. – Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса.– 2019. – 445 с.
53. Nabochenko O. Studying the railroad track geometry deterioration as a result of an uneven subsidence of the ballast layer / O. Nabochenko, M. Sysyn, V. Kovalchuk, Yu. Kovalchuk, A. Pentsak, S. Braichenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkov. – 1/7(97), 2019. – P. 50–59. doi: 10.15587/1729-4061.2019.154864
54. Catalina Orozco M. Inversion method for spectral analysis of surface waves (SASW): In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering. Georgia Institute of Technology. – 2003. – 287.
55. Sussmann T. R. Use of seismic surface wave testing to assess track substructure condition. /T. R. Sussmann, H. B. Thompson, T. D. Stark, S. T. Wilk, C. L. Ho// Construction and Building Materials, – 2017. – 155. – pp. 1250-1255.

56. Suto K. Multichannel analysis of surface waves (MASW) for investigation of ground competence: an introduction // *Engineering Advances in Earthworks / Australian Geomechanics Society*. – 2007. – P. 71–81.
57. Park C. B. Multichannel analysis of surface waves. / C. B. Park, R. D. Miller, J. Xia // *Geophysics*. – 1999. – 64 (3). – P. 800–808.
58. Park C. B. Multichannel analysis of surface waves (MASW)–active and passive methods./ C. B. Park, R. D. Miller, J. Xia, J. Ivanov// *The Leading Edge*, 2007. – Vol. 26(1). – P. 60–64.
59. Ryden N. Fast simulated annealing inversion of surface waves on pavement using phase-velocity spectra / N. Ryden, C. B. Park // *Geophysics*, 2006. – Vol. 71(4). – P. 49–58.
60. Sysyn M. Evaluation of railway ballast layer consolidation after maintenance works./ M. Sysyn, O. Nabochenko, V. Kovalchuk, U. Gerber // *Acta Polytechnica. Journal of Advanced Engineering. Czech Technical University in Prague*, 2019. – Vol. 59(1). – P. 77–87. DOI: 10.14311/AP.2019.59.0077.
61. Sysyn M. The complex phenomenological model for prediction of inhomogeneous deformations of railway ballast layer after tamping works. / M. Sysyn, U. Gerber, V. Kovalchuk O. Nabochenko // *Archives of Transport. Poland*, – 2018. – Vol. 47 (3). – P. 91–107. DOI: 10.5604/01.3001.0012.6512.
62. Sysyn M. Experimental study of railway trackbed pressure distribution under dynamic loading. / M. Sysyn, V. Kovalchuk, O. Nabochenko, Yu. Kovalchuk, O. Voznyak // *The Baltic journal of road and bridge engineering*. – 2019. – Vol. 14 (4). – P. 504–520.
63. Gerber Ulf. Tragfähigkeit und Geometrie der Eisenbahnschotterbettung / Ulf Gerber, Mykola Petrowytsch Sysyn, Witali Wolodymyrowytsch Kowaltschuk // *EIK – Eisenbahningenieur Kalender Jahrbuch für Schienenverkehr & Technik* 2019. – P. 1–14. Hamburg: DVV Media Group GmbH / Eurailpress Hamburg. – ISSN 0934-5930, ISBN 978-3-87154-572-6.
64. Stankevych V. Z. Cracks Interaction in the Elastic Composite under Action of the Harmonic Loading Field / V. Z. Stankevych, I. O. Butrak, V. V. Kovalchuk

- // 2018 XXIIIrd International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED). – Tbilisi, Georgia, 22 November 2018. – P. 149–152. doi: 10.1109/DIPED.2018.8543323.
65. Sysyn M. Experimental study of railway ballast consolidation inhomogeneity under vibration loading. / M. Sysyn, V. Kovalchuk, U. Gerber, O. Nabochenko, A. Pentsak// Pollack periodica an International Journal for Engineering and Information Sciences, 2020. – Vol. 15(1). – P. 27–36. DOI: 10.1556/606.2020.15.1.3.
66. Ляховицкий Ф. М. Инженерная геофизика / Ф. М. Ляховицкий, В. К. Хмелевской, Яценко З. Г. – М.: Недра, 1989. – 254 с.
67. Джоунс К. Д. Сооружения из армированного грунта / К. Д. Джоунс. // – М.: Стройиздат, 1989. – 280 с.
68. Ашпиз Е.С. Опыт применения геосинтетических материалов при усилении и реконструкции земляного полотна железных дорог: М-лы второй междунар. науч.-техн. конф. «Применение геоматериалов при строительстве и реконструкции транспортных объектов» / Под ред. А.В. Петряева, Е.С. Свинцова – СПб.: ПГУПС, 2002. – С. 7 – 14.
69. Блажко Л. С. Эффективность укладки геотекстиля / Л. С. Блажко, М. В. Бушуев, В. М. Ермаков // Путь и путевое хоз-во. – 2008. – № 3. –С. 5–8.
70. Петренко В. Д. Результати аналізу параметрів експериментальних досліджень армування геотекстилем земляного полотна / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, А. Л. Тютюкін, А. М. М. Алхдур // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 34. – С. 131–135.
71. Петренко В. Д. Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований усиления земляного полотна малодеформируемым слоем /В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, А. Л. Тютюкін, А. М. М. Алхдур // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 35. – С. 139–144.

72. Ланис А. Л. Армирование эксплуатируемых высоких насыпей с инъектированием твердеющих растворов: дис. док. тех. наук: 05.22.06 «Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог» / Ланис Алексей Леонидович. – Новосибирск, 2019. – 409 с.
73. Лучко Й. Й. Грунтознавство, механіка ґрунтів та основи і фундаменти: [Навчальний посібник] / Й. Й. Лучко // М-во освіти і науки, молоді та спорту України; Дніпропетров. нац. ун-т залізнич. транспорту ім. акад. В. Лазаряна; Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя. – Львів: Каменяр, 2013. – 320 с. ISBN 978-966-607-185-2.
74. Лучко Й. Й. Дослідження технології ін'єкційної гідроізоляції підземних споруд / Й. Й. Лучко, Б. З. Парнета, А. Я. Пенцак // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса.: ОДАБА, 2018. – Вип. 71. – С. 113 – 119.
75. Лучко Й. Й. Щодо методики влаштування мембранної гідроізоляції інекційними методами підземних споруд. /Й.Й. Лучко, Б. Л. Назаревич, В. В. Чечін // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса.: ОДАБА, 2019. – Вип. 75. – С. 141–150.
76. 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.
77. 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
78. Яковлева Т. Г. Способы усиления насыпей армогрунтовыми конструкциями / Т. Г. Яковлева, В. В. Виноградов, Ю. К. Фроловский // Путь и путевое хоз–во. – 1997. – № 1. – С. 7–10.

79. Баль О. М. Дослідження ефективності застосування геотекстилю в конструкції залізничної колії / О. М. Баль, В. В. Ковальчук, Б. В. Костик // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2014. – №. 148 (2). – С. 162-170.
80. Гуртіна Л. Г. Застосування армування ґрунтових споруд в гідротехнічному та цивільному будівництві. / Л. Г. Гуртіна, М. М. Хлапук, В. Д. Шумінський // Науково виробничий журнал "Гідроенергетика України". – 2019. – № 1-2. – С. 72-75.
81. Тимофеева Л. М. Армирование ґрунтов. Теория и практика. Ч. 1. Армированные основания и армоґрунтовые подпорные стены / Л. М. Тимофеева. – Пермь, 1991. – 480 с.
82. Ніколайчук А. В. Забезпечення стійкості баластної призми на слабкій основі при модернізації залізничної колії / Ніколайчук А. В., Гамеляк І. П., Литвиненко А. С., Ляховий І. В., Журба Г. В. // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2011. – № 38. – С. 157–161. – Режим доступу : DOI: 10.15802/stp2011/6830.
83. Петренко В. Д. Лоткові дослідження армування земляного полотна для підвищення руху поїздів на залізницях України. / В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкін, О. Кулаженко // Міжнародний техніко-економічний журнал “Українська залізниця” – 2016. – Вип. №5(35). – С. 40-45.
84. Скрипник Т. В. Доцільність армування земляного полотна геосинтетичними матеріалами / Т. В. Скрипник, М. М. Малько, В. Ю. Скрипник // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2010. – №. 79. – С. 27-32.
85. Кірічек Ю. О. Посилення високих насипів у складних інженерно-геологічних умовах / Ю. О. Кірічек, Ю. Б. Балашова, С. М. Кочан // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2012. – №. 86. – С. 78-87.
86. Сайт компанії Keller [Електронний ресурс] режим доступу: <https://www.keller-na.com/expertise/markets/infrastructure/railway>

87. Сайт компанії Geopier [Електронний ресурс] режим доступу: <https://www.geopier.com/>
88. Latvala J. Problems with Railway Track Drainage in Finland / J. Latvala, A. Nurmikolu, H. Luomala // Procedia Engineering, 2016. – Vol. 14. – P. 1051–1058. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.098>
89. Tasalloti A. Geocellular railway drainage systems: Physical and numerical modelling. / A. Tasalloti, A. M. Marshall, C. M. Heron, M. A. Hashemi // Transportation Geotechnics, 2020. – Vol. 22. – P. 100299. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100299>.
90. Slavinska O. Investigation of the work of the road construction at the sites by pipe drenes from materials of different origin. / O. Slavinska, V. Savenko, A. Bubela, A. Yaremov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkov.: 2/7 (92), 2018. – P. 18 – 26. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126512>
91. Славінська О. С. Дослідження роботи дренажів мілкового закладання за інтенсивністю водовідведення з урахуванням впливу вібрації. / О. С. Славінська, А. В. Бубела, Л. П. Бондаренко, О. С. Чечуга // Дороги і мости, – 2020. – Вип. 21. – С. 201-216. doi: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.201>
92. Kovalchuk V. Estimation of carrying capacity of metallic corrugated structures of the type Multiplate mp 150 During interaction with backfill soil / V. Kovalchuk, Y. Kovalchuk, M. Sysyn, V. Stankevych, O. Petrenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkov, 2018. – 1/1 (91). – P. 18–26. doi: 10.15587/1729-4061.2018.123002.
93. Kovalchuk V. The study of strength of corrugated metal structures of railroad tracks / V. Kovalchuk, R. Markul, O. Bal, A. Milyanych, A. Pentsak, B. Parneta, O. Gajda // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkov, 2017.– 2/7 (86), – P.18–25. doi:10.15587/1729-4061.2017.96549.

94. Kovalchuk V. Study of the the temperature field and the thermoelastic state of the multilayer soil-steel structure. / V. Kovalchuk, Yu. Hnativ, J. Luchko, M. Sysyn // Roads and Bridges - Drogi i Mosty. – 2020. – 19 – p.65-78.
95. Sysyn M. Laboratory evaluation of railway ballast consolidation by the nondestructive testing / M. Sysyn, V. Kovalchuk, U. Gerber, O. Nabochenko, B. Parneta // Communications – Scientific Letters of the University of Zilina. – (2) 21, 2019. – P. 81–88
96. ДБН В.2.3-19:2018 Споруди транспорту. Залізничні колії 1520 мм. Норми проектування. Київ: Мінрегіон України, 2018. – С. 126.
97. Организация строительства и реконструкции железных дорог: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / И. В. Прокудин, Э.С. Спиридонов, И. А. Грачев, А. Ф. Колос, С. К. Терлецкий; под ред. И. В. Прокудина. – М.: ГОУ “Учебнометодический центр по образованию на ж.-д. транспорте”, 2008. – 736 с. ISBN 978-5-89035-248-2
98. Fuggini C. Innovative approach in the use of geotextiles for failures prevention in railway embankments. / C. Fuggini, D. Zangani, A. Wosniok, K. Krebber, P. Franitza, L. Gabino, et al. // *Transportation research procedia*, 2016. – 14. – P. 1875-1883.
99. Курган Д. М. Основи математичного опису хвильової моделі поширення напружень у залізничній колії. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 2016. – Вип. 5. – С. 101–113.
100. Телипко Л. П. Учет неоднородности земляного полотна железнодорожного пути при определении его напряженно-деформированного состояния. / Л. П. Телипко, Л. М. Мамаев, С. В. Ракша // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 2018. – Вип. 6. – С. 101–117.
101. Milne D. Automated processing of railway track deflection signals obtained from velocity and acceleration measurements./ D. Milne, LL. Pen, W. Powrie et

- al // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2018. – Vol. 232(8). – P. 2097-2110.
102. 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.
103. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість ЦП-0117 / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін. – Київ: Транспорт України, 2006. – 168 с.
104. Шахунянц Г. М. Устройство железнодорожного пути. Т.Ш. – М.: Трансжелдориздат, 1944.
105. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. – М.: Транспорт, 1997. – 326 с.
106. Чернышев М. А. Практические методы расчета пути. – М.: Транспорт, 1967. – 236 с.
107. Прокудин И. В. Организация переустройства железных под скоростное движение поездов: Учебное пособие / Прокудин И. В., Грачев И. А., Колос А. Ф.; под ред. И. В. Прокудина. – М.: Маршрут, 2005. – 716 с.
108. Стоянович Г. М. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна при повышенной вибродинамической нагрузке в упругопластической стадии работы грунтов. Дис. док. тех. наук: 05.22.06 «Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог» / Стоянович Геннадий Михайлович. – Хабаровск. – 2002. – 360 с.
109. Прокудин И. В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую загрузку. / Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог /ЛИИЖТ, Ленинград, 1982. – 422 с.

110. Kira Holtzendorff. Untersuchung des Setzungsverhaltens von Bahnschotter und der Hohllagenentwicklung auf Schotterfahrbahnen. Dissertation. Technische Universität Berlin. – Berlin, 2003 D 83. – 130 p.
111. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. – М.: Транспорт. – 1997. – 326 с.
112. Чернышев М. А. Практические методы расчета пути. – М.: Транспорт. – 1967. – 236 с.
113. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. ДБН В.2.1-10-2009 (Державні будівельні норми України). – Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. – 104 с.
114. Simmer K. Grundbau: Bodenmechanik und erdstatische Berechnungen / Konrad Simmer. – Stuttgart: Teubner B.G. GmbH, 2009. – 430 p.
115. DIN 18196: 2011-05 Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke.
116. Vorlesungensammlung von Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau. – München: TUM Zentrum Geotechnik, 2011. – pp.1–28.
117. Lichtberger B. Handbuch Gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. / B. Lichtberger. – Hamburg: Tetzlaff Verlag, 2003. – 318 p.
118. Абдукаримов А. М. Несущая способность земляного полотна отсыпанного лессовыми грунтами воспринимающими вибродинамическую нагрузку / Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог/ ФГБОУ ВПО ПГУПС, Санкт-Петербург, 2011. – 25 с.
119. Корнеев Д. А. Оценка напряжённо-деформированного состояния железнодорожных насыпей с применением объёмных геомodelей / Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.11 – Проектирование и

- строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей / СГУПС, Новосибирск, 2009. – 28 с.
120. 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, 2021. –Vol. 1/5(109). – С. 6–15. (видання внесене до БД Scopus) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225520>
121. 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.
122. 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.
123. 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.
124. 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.
125. 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.
126. Сайт Pribaltika. Дренажна труба PRAGMA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pn20.com.ua/ua/products/drenajnaya-truba/>
127. Державні будівельні норми України. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи: ДБН В.1.2-15.2009. – Київ, Мінрегіонбуд України, 2009. – С. 83.
128. Швец В. Б. Фундаменты промышленных, гражданских и транспортных сооружений на слоистых грунтовых основаниях / В. Б. Швец, В. Г. Шаповал, В. Д. Петренко//. Днепропетровск. – Новая идеология, 2008. – 274 с.
129. Петренко В. Д. Математичне моделювання земляного полотна залізничної колії на основі методу скінченних елементів. / В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін, Є. Ю. Кулаженко, О. М. Кулаженко // Дніпро, Дніпровський національний університет залізничного транспорту, 2016. – 64 с.
130. Brinkgreve R. B. J. PLAXIS (version 8) user's manual. / R. B. J. Brinkgreve, P. A. Vermeer, // Delft University of Technology and PLAXIS BV, Netherlands. – 2002.
131. Петренко В. Д. Порівняльний аналіз НДС земляного полотна при модернізації. / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, О. Л. Тютюкін, А. М. М. Алхдур, В. В. Ковалевич// Мости и тоннели: теория, исследования, практика. – 2012. – Вып. 1. – С. 69–74.
132. АД А.2.4-37641918-002:2015 Дренажні конструкції земляного полотна на автомобільних дорогах загального користування. Архітектурно-будівельні креслення.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

**РОЗРАХУНОК РОЗПОДІЛУ ВЕРТИКАЛЬНИХ СИЛ ДІЇ РУХОМОГО
СКЛАДУ НА РЕЙКИ**

Розрахунок розподілу вертикальних сил дії рухомого складу на рейки у елементах колії виконується згідно Правил [103]. Результати розрахунку наведені в табл. А.1

Таблиця А.1

Електровоз ВЛ80												
V, км/год	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	
Рсер, кН	128.0	129.1	130.2	131.3	132.3	133.4	134.5	135.6	136.7	137.8	138.8	
Рроз, кН	133.9	137.1	140.9	144.9	149.1	153.4	157.8	162.2	166.8	171.4	176.1	
Рекв1, кН	133.2	136.4	140.2	144.2	148.3	152.6	157.0	161.5	166.0	170.7	175.4	
Рекв2, кН	129.7	132.9	136.6	140.6	144.8	149.0	153.4	157.8	162.3	166.9	171.6	
Електровоз ВЛ10												
V, км/год	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Рсер, кН	122.3	123.4	124.5	125.6	126.6	127.7	128.8	129.9	130.9	132.0		
Рроз, кН	128.2	131.5	135.3	139.4	143.7	148.1	152.6	157.1	161.8	166.5		
Рекв1, кН	127.5	130.8	134.6	138.7	143.0	147.4	151.8	156.4	161.1	165.8		
Рекв2, кН	124.2	127.5	131.3	135.3	139.6	143.9	148.4	152.9	157.5	162.2		
Електровоз ВЛ60												
V, км/год	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Рсер, кН	122.1	122.9	123.7	124.5	125.3	126.1	126.9	127.6	128.4	129.2	130.0	130.8
Рроз, кН	127.9	130.9	134.3	138.0	141.9	145.9	149.9	154.1	158.3	162.5	166.9	171.3
Рекв1, кН	120.1	123.0	126.4	130.0	133.9	137.8	141.8	145.9	150.0	154.2	158.5	162.9
Рекв2, кН	123.2	126.1	129.5	133.2	137.1	141.0	145.0	149.1	153.3	157.5	161.8	166.2
Електровоз ЧС-7												
V, км/год	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Рсер, кН	115.0	115.8	116.6	117.4	118.2	119.0	119.8	120.6	121.4	122.2	123.0	123.8
Рроз, кН	120.5	122.6	125.1	127.8	130.7	133.7	136.8	139.9	143.1	146.4	149.7	153.1
Рекв1, кН	114.1	116.1	118.6	121.3	124.1	127.1	130.1	133.2	136.4	139.6	142.8	146.2
Рекв2, кН	115.6	117.6	120.1	122.8	125.7	128.6	131.7	134.8	138.0	141.2	144.5	147.8

Електровоз ЧС-200												
V, км/год	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Рсер, кН	106.7	107.3	107.9	108.5	109.1	109.7	110.4	111.0	111.6	112.2	112.8	113.4
Рроз, кН	112.0	113.8	116.1	118.5	121.2	123.9	126.7	129.5	132.5	135.4	138.5	141.
Рекв1, кН	112.2	114.1	116.3	118.8	121.4	124.1	126.9	129.8	132.7	135.7	138.7	141.8
Рекв2, кН	109.3	111.1	113.3	115.8	118.4	121.1	123.9	126.7	129.6	132.6	135.6	138.6
Тепловоз ТЭ-10												
V, км/год	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Рсер, кН	115.7	117.5	119.4	121.2	123.0	124.8	126.6	128.4	130.2	132.0		
Рроз, кН	121.4	124.8	128.7	133.0	137.4	142.0	146.7	151.5	156.5	161.5		
Рекв1, кН	110.9	114.1	117.9	122.0	126.2	130.7	135.2	139.9	144.6	149.5		
Рекв2, кН	118.0	121.4	125.2	129.4	133.8	138.3	143.0	147.8	152.6	157.7		
Тепловоз М62												
V, км/год	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Рсер, кН	104.9	106.2	107.4	108.7	110.0	111.2	112.5	113.7	115.0	116.2		
Рроз, кН	110.3	113.0	116.1	119.5	123.1	126.8	130.6	134.5	138.5	142.7		
Рекв1, кН	100.8	103.3	106.4	109.6	113.1	116.7	120.4	124.2	128.1	132.1		
Рекв2, кН	107.3	109.9	113.0	116.3	119.8	123.5	127.3	131.2	135.2	139.2		
Тепловоз ТЭП-70												
V, км/год	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Рсер, кН	111.4	112.0	112.6	113.3	113.9	114.5	115.1	115.7	116.4	117.0	117.6	118.2
Рроз, кН	117.0	119.5	122.5	125.7	129.1	132.6	136.2	139.8	143.5	147.3	151.1	155.0
Рекв1, кН	111.3	113.7	116.7	119.9	123.3	126.7	130.2	133.9	137.5	141.3	145.1	148.9
Рекв2, кН	113.2	115.7	118.7	121.9	125.2	128.7	132.3	135.9	139.6	143.3	147.1	151.0

Тепловоз ЧМЕЗ												
V, км/год	10	20	30	40	50	60	70	80	90			
Рсер, кН	111.1	113.5	115.9	118.3	120.7	123.1	125.5	127.9	130.3			
Рроз, кН	116.7	120.6	125.0	129.6	134.5	139.6	144.8	150.1	155.6			
Рекв1, кН	104.9	108.6	112.7	117.1	121.8	126.6	131.5	136.6	141.8			
Рекв2, кН	114.3	118.1	122.5	127.1	131.9	136.9	142.1	147.3	152.8			
Вагон ЦНИИ-ХЗ-0												
V, км/год	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Рсер, кН	127.5	130.8	134.1	137.5	140.8	144.1	147.4	150.7	154.1	157.4	160.7	164.0
Рроз, кН	133.3	137.9	142.9	148.2	153.6	159.3	165.0	171.0	177.0	183.1	189.4	195.8
Рекв1, кН	115.5	119.7	124.2	129.0	134.1	139.2	144.5	150.0	155.6	161.2	167.1	173.0
Рекв2, кН	133.9	138.6	143.6	148.9	154.4	160.0	165.8	171.8	177.8	184.0	190.3	196.7

ДОДАТОК Б
ПАТЕНТИ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 146420

**СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ДЕФЕКТНОГО
ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ ТА
ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей
17.02.2021.

Генеральний директор
Державного підприємства
«Український інститут
інтелектуальної власності»

А.В. Кудін



УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 146647

**ПРИСТРІЙ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЗЕМЛЯНОГО
ПОЛОТНА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ ТА ЗАЛІЗНИЧНОЇ
КОЛІЇ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей
10.03.2021.

Генеральний директор
Державного підприємства
«Український інститут
інтелектуальної власності»

А.В. Кудін



ДОДАТОК В

АКТИ ІЗ ПРАКТИЧНОГО ВПРОВАДЖЕННЯ

РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Кравця Івана Богдановича на тему: «Методи оцінювання та підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна залізничної колії» представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія.

Цим актом підтверджується, що розроблений І. Б. Кравцем у дисертації «Методи оцінювання та підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна залізничної колії» інерційний метод оцінки несучої здатності земляного полотна мав практичне впровадження при оцінці деформаційних параметрів хворого земляного полотна на перегоні Підбірці-Борщовичі Підзамчівської дистанції колії Львівської залізниці АТ Укрзалізниця.

Начальник Підзамчівської дистанції колії
Регіональної філії «Львівська залізниця»
АТ Укрзалізниця



І. С. Цибульський

Міністерство освіти і науки України

ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ
АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Львівська філія

79052, м Львів, вул. Блажкевич, 12а
Тел.: (032) 226-01-47,
Тел.-факс: (0322) 67-04-86



Ministry of Education and Science
of Ukraine

DNIPRO NATIONAL UNIVERSITY OF
RAILWAY TRANSPORT NAMED AFTER
ACADEMICIAN V. LAZARIAN

Lviv branch

79052, Lviv, Blazhkevych str., 12a
tel: +38 (032) 226-01-47,
fax+38 (032) 267-04-86

"26" листопада 2021р.
№ 70

На № _____ від _____

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи аспіранта кафедри «Транспортна інфраструктура» ДНУЗТ, асистента кафедри «Фундаментальних дисциплін» ЛФ ДНУЗТ Кравця Івана Богдановича на тему «Методи оцінювання та підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна залізничної колії» у навчальний процес Львівської філії Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Теоретичні положення, сформульовані у дисертаційній роботі Кравця Івана Богдановича «Методи оцінювання та підвищення несучої здатності неоднорідного земляного полотна залізничної колії» впроваджені у лекційному курсі з дисципліни «Залізнична колія (Земляне полотно)» та лабораторному курсі «Механіка ґрунтів, основи та фундаменти», які викладаються студентам за спеціальністю 273 «Залізничний транспорт».

Результати досліджень дозволяють студентам отримати знання про методи оцінювання несучої здатності неоднорідного земляного полотна та застосовувати нові методи оцінки щільності ґрунтів земляного полотна у лабораторних умовах.

Директор Львівської філії Дніпровського
національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна,
к.т.н., доцент

Я.В. Болжеларський

ДОДАТОК Г
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

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.