

## АНОТАЦІЯ

*Бобошко С.Г.* Напружено-деформований стан ділянок з перехідною жорсткістю на підходах до мостів – 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, Дніпро, 2020.

Дисертація присвячена вивченню та вирішенню питання ділянок з перехідним показником жорсткості на підходах до мостів аналітичним та експериментальним шляхом за допомогою використання чисельного аналізу, експериментального лоткового дослідження відцентровим методом та натурних випробувань.

В першому розділі дисертації виконується аналіз проблеми ділянок з перехідним показником жорсткості у сучасному будівництві, а саме: проблеми, що виникають на таких ділянках, передумови їх виникнення та природа розвитку, шляхи вирішення, застосовані у українському та світовому мостобудівництві. Виявлено основні наслідки проблем перехідних ділянок – деградація геометрії колії, що називається «передмостова яма».

Результатом дослідження сформованої бази знань європейського досвіду питання передмостової ями стало зведення та структуризація причин її виникнення, методів виявлення та вирішення. Шляхи вирішення питання передмостової ями сформовані у три підгрупи в залежності від глибини занурення у конструкцію і типу підсилення. На основі зібраних даних розроблено 3 підсилення перехідної ділянки на підході до мосту таким чином, що кожен тип підсилення відповідав би окремій підгрупі.

Результатом першого розділу стала розробка трьох методів підсилення перехідної ділянки:

- Підсилення габіонними коробами – зручні в експлуатації, швидкоспоруджувані та відносно дешеві конструкції, що не потребують великих фінансових витрат на доставку та збирання та зарекомендували себе

як зручний та надійний засіб для берегоукріплювальних робіт та підсилення відкосів насипів.

- Підсилення ґрунтоцементними палями – відносно новий метод бурового підсилення, що показав себе більш практично вигідним та зручним для не несучих конструкцій та підсилення земляного полотна. Використання ґрунтоцементних паль дозволяє суттєво зменшити непрямі витрати через довгострокову зупинку руху на перегонах, на яких виконуються роботи з підсилення, а також не потребують зайвих витрат на підсилення стінок свердловини порівняно з улаштуванням бурових паль.

- Підсилення сортованими та армованими ґрунтами – складний при улаштуванні, але найбільш вживаний у європейському будівництві метод, що включає підсилення перехідної ділянки трьома типами підсиленого ґрунту, до яких відносяться сортований ґрунт, підсилений цементом; сортований ґрунт та звичайний ґрунт насипу, ущільнений для збільшення його міцності. Даний тип підсилення потенційно дає найбільш плавний перехід від вищої жорсткості на мосту, до нижчої на насипу, що є найбільш зручним та надійним у довгостроковій перспективі.

У другому розділі дисертації виконано дослідження напружено-деформованого стану (НДС) ділянок з перехідною жорсткістю на підходах до мостів.

Перш за все, у розділі розглянуто основні моделі математичного моделювання ґрунтових конструкцій, методи математичного аналізу, до яких зокрема відносяться метод скінченних елементів (МСЕ), метод дискретних елементів (МДЕ) та метод граничних елементів (МГЕ). Саме МСЕ був обраний для дослідження роботи перехідних ділянок.

У першій частині розділу висвітлено основні здобуття та результати проведених досліджень НДС ґрунтових конструкцій за допомогою МСЕ.

У другій частині розділу виконано чисельний аналіз ділянок з перехідною жорсткістю на моделі підходу реального залізничного мосту, що

знаходиться на перегоні Лошкарівка-Павлопілля лінії Мерефа-Херсон в Україні.

Дослідження виконувалось в два етапи, перший дозволив оцінити адекватність та достовірність результатів запропонованого методу. Другий етап є безпосереднім дослідженням НДС перехідних ділянок з запропонованими у розділі 1 моделями підсилень, порівняння та аналіз їх результатів.

Моделювання виконувалось у трьох вимірах. Складовими частинами моделі є стоян мосту, насип за ним та відкоси насипу. Основним предметом дослідження є інтенсивність осідання ґрунту на ділянці за стояном мосту при різних конструкціях підсилення. Конструкція стояну та насипу змодельовані шести- та восьмигранними об'ємними елементами з переважною довжиною сторони 0,5 м.

В результаті математичного моделювання отримано ізополя навантажень та переміщень по осі Z для перехідної ділянки з кожним з типів підсилення та виконано їх порівняння.

Максимальне вертикальне переміщення в моделі №1 (вихідна модель без підсилення) становить 5,04 мм, в моделі №2 (підсилення габіонами) – 1,72 мм, що на 66% менше за переміщення в вихідній моделі, в моделі №3 (підсилення ґрунтоцементними палями) – 2,65 мм, що на 47% менше за переміщення в вихідній моделі, в моделі №4 (підсилення сортованими та зцементованими ґрунтами) – 1,55 мм, що на 69% менше за переміщення в вихідній моделі.

Висновком з чисельного аналізу НДС стали попередні припущення щодо перспектив використання різних типів підсилення. З технологічної та практичної точки зору, в нинішніх умовах українських залізниць та виробничого сектору найбільш доцільним методом підсилення стало використання габіонів.

У третьому розділі виконано експериментальне дослідження НДС конструкції перехідної ділянки відцентровим методом.

У першій частині розділу висвітлені особливості використання відцентрового моделювання як методу дослідження ґрунтових масивів. Головною перевагою відцентрового моделювання є відтворення реальних процесів складних за своєю структурою матеріалів в відносно невеликих моделях з масштабом від 1:20 до 1:200 та можливість вивчення протягом коротких проміжків часу довгострокових процесів, що відбуваються у реальних конструкціях.

Відцентрове моделювання є достатньо складним з точки зору підготовки методом дослідження, тому для отримання достовірних результатів необхідним є вивчення принципу лоткового дослідження моделей ґрунтових масивів. Масштаб моделі та часу є одними з найбільш важливих критеріїв при відцентровому моделюванні. Абсолютно важливою для отримання достовірних результатів є підтримка однакових умов моделювання при кожній ітерації.

Для моделювання використана конструкція перехідної ділянки реального мосту, аналогічна чисельній моделі у розділі 2. Випробування проводилися на унікальній центрифугі науково-дослідної лабораторії механіки ґрунтів Дніпровського національного університету залізничного транспорту.

Моделювання виконується для вихідної моделі та кожного з трьох типів підсилення запропонованих у розділі 1. Модель масштабом 1:50 будується у металевому лотку. Модель засипається шарами ґрунту по 4-5 см, що трамбується до заданої щільності. На перший шар ґрунту встановлюється модель стояна. Кожен наступний шар ущільнюється відповідно до заданої схеми. Для відтворення моделі підсилення габіонами використовується щебінь фракції 3...5 мм та полімерна сітка. Ґрунтоцементні палі у другій моделі підсилення виконуються за рахунок ін'єкції цементного в'язучого розчину у тіло циліндричних отворів. Для моделювання підсилення сортованими та зцементованими ґрунтами сортований на ситі ґрунт стабілізується 2,5-3% цементом. Після підготовки кожної моделі, бокова

стінка лотка знімається і бокова частина моделі розмічається сіткою, що дасть змогу оцінити масштаб та інтенсивність осідання конструкції.

Для кожної моделі експеримент проводиться на частоті обертання двигуна рівній 3,678 Гц. Час обертання центрифуги становить 60 хвилин, що дорівнює 416 дням роботи реальної конструкції.

Результатами випробування є цифрові знімки моделі, переведені у векторний вигляд та накладені на вихідний вигляд моделі до підсилення. Таким чином отримано інтенсивність осідання моделі підсилення в різних горизонтальних та вертикальних координатах та максимальні осідання конструкції під навантаженням.

Порівняння отриманих результатів показало наступні результати максимальної вертикальної деформації: для випробування без підсилення – 20,56 мм; для випробування з підсиленням габіонними коробами – 5,46 мм; для випробування з підсиленням ґрунтоцементними палями – 9,77 мм; для випробування з підсилення сортованим ґрунтом – 5,33 мм. Порівняльний аналіз свідчить про те, що застосування усіх трьох варіантів підсилення позитивно впливає на зниження вертикальних деформацій (в 2,10...3,86 рази).

У третій частині вивчено та порівняно результати, отримані в ході чисельного та експериментального дослідження та підтверджено адекватність розроблених моделей.

У четвертому розділі роботи виконані натурні дослідження ділянки з перехідною жорсткістю на підході до залізничного мосту.

Випробування проводилось декількома методами: оцінка вертикального модуля пружності колії на перехідній ділянці; визначення динамічних вертикальних сил, діючих від коліс поїзду на рейку та визначення осідань колії методом нівелювання до і після підсилення. Для натурального випробування у ході розділу 4 обрано модель підсилення ґрунтоцементними палями.

Перший метод випробування виконується за допомогою прикладення вертикального навантаження на рейку в різних точках горизонтального

профілю. Реєстрація інтенсивності навантаження та просідання виконується за рахунок електричного приладдя. В результаті випробування отримано значення вертикальної жорсткості та вертикального модуля пружності колії в різних точках перехідної ділянки. Отримані дані показують суттєву різницю жорсткості колії на мосту та на насипу підходу і зробити висновки щодо однієї з головних причин виникнення передмостових ям.

В другому методі випробування для вимірювання вертикальних сил, діючих від коліс поїзду на рейку використовується методика виміру буксових прискорень. В процесі експерименту отримані величини буксових прискорень коліс електровозу ДС-3 при проходженні його по передмостовій ямі при різних швидкостях руху дослідного поїзду. В результаті випробування отримані вертикальні сили та прискорення, що виникають на ділянці передмостової ями. Аналіз отриманих даних показує залежність вертикальних сил та прискорень, що виникають в перехідних ділянках при проходженні рухомого складу від інтенсивності осідання колії.

Третя частина розділу присвячена підтвердженню ефективності підсилення ділянок з перехідною жорсткістю. Для цього виконано нівелювання колії та отримано її профіль, після чого виконано підсилення, після чого виконується повторне нівелювання через 12 місяців. Таким чином виконано порівняльний аналіз звичайної перехідної ділянки та перехідної ділянки з підсиленням, запропонованим у розділі 1 та підтверджено його ефективність.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає у наступному:

- отримано нові закономірності напружено-деформованого стану перехідної ділянки у вигляді осідання, напруження та жорсткості, на основі яких можуть бути розроблені методи їх підсилення;
- вперше в Україні побудовано експериментальну модель перехідної ділянки для відцентрового моделювання, яка дозволяє отримати наслідки довготривалого впливу навантаження зі збереженням фізичних процесів, що відбуваються в насипу;

- удосконалено математичну модель перехідної ділянки, яка включає стоян мосту, насип за стояном, та (за необхідності) підсилення і дозволяє отримувати точні осідання та напруження в будь-якій точці перехідної ділянки;

- розроблено три нові методи підсилення перехідних ділянок на підходах до мостів, кожен з яких може бути використаний залежно від вихідних умов.

**Практичне значення отриманих результатів.** Наукові результати, отримані в дисертаційній роботі можуть бути використані для моделювання перехідних ділянок та більш глибокого вивчення їх роботи. Побудовані математичні та експериментальні моделі можуть використовуватися для дослідження та розробки підсилення ґрунтових масивів, в тому числі перехідних ділянок.

Розроблені методи підсилення можуть бути використані для збільшення жорсткості нових або вже існуючих перехідних ділянок залізничних чи автодорожніх мостів.

Ключові слова: перехідна жорсткість, передмостова яма, чисельне моделювання, відцентрове моделювання, натурні випробування, підходи до мосту, габіони, ґрунтоцемент.

Список публікацій здобувача:

- *в іноземних виданнях, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу:*

1. Marochka V. V., Boboshko S. H., Tiutkin O. L. Comparative analysis of the results of modeling sections with a transitional stiffness index on approaches to bridges. *Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky*, Kosize, Slovakia. 2019. Vol 7, 6A. P. 148-156.

- *включених до переліку наукових фахових видань, затверджених МОН України:*

1. Marochka V. V., Boboshko S. H. Development of technology of arranging areas with transitional stiffness index on approaches to railway bridges.

*Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика: зб. наук. праць Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2018. Вип. 13. С. 99-106.*

2. Marochka V. V., Boboshko S. H. Analysis of the problems of sections with the transitional rigidity indicator in world bridging. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика: зб. наук. праць Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2019. Вип. 16. С. 82-92.*

3. Marochka V. V., Boboshko S. H. Numerical analysis of reinforcement of sections with transitional rigidity on approaches to railway bridges. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика: зб. наук. праць Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2020. Вип. 17. С. 91-99.*

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

1. Марочка В. В., Бобошко С. Г. Ділянки з перехідною жорсткістю на підходах до мостів. *Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту* : Тези доповідей 77 Міжнародної науково-практичної конференції, (м. Дніпро, 11-12 травня 2017 р.) Дніпро, 2017. С. 238-239.

2. Марочка В. В., Бобошко С. Г. Відцентрове моделювання як метод експериментального дослідження механізму роботи насипів в перехідних ділянках на підходах до мостів. *Транспортні споруди: стан, проблеми збереження, ремонт* : Тези доповідей I Міжнародної науково-технічної конференції, (м. Харків, 15 листопада 2019 р.). Харків, 2019. С. 53-54.



## ABSTRACT

*S.H. Boboshko* Stress-strain condition of areas with transitional stiffness on approaches to bridges – Qualifying scientific work as a manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 192 – Building Industry and Civil Engineering. – Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnipro, 2020.

The dissertation is devoted to the study and solution of the problem of sections with transitional stiffness on approaches to bridges analytically and experimentally through the use of numerical analysis, experimental tray research by centrifugal method and field tests.

The first section of the dissertation analyzes the problem of areas with a transitional stiffness index in modern construction: the problems that arise in such areas, the preconditions for their occurrence and the nature of development, solutions used in Ukrainian and world bridge construction. The main consequences of the problems of the transition sections had been revealed - the degradation of the track geometry, which is called the “bump at the end of the bridge”.

The result of the study of the existing knowledge base of the European experience of the bump at the end of the bridge issue was the compilation and structuring of the causes of its occurrence, methods of detection and solutions. Ways to solve the problem of the bump at the end of the bridge are formed into three subgroups depending on the depth of immersion in the construction and the type of reinforcement. Based on the collected data, 3 reinforcements of the transition section at the approach to the bridge were developed in such a way that each type of reinforcement would correspond to a separate subgroup.

The result of the first section was the development of three methods of reinforcement of the transition area:

- Gabion box reinforcement – easy to operate, fast-built and relatively cheap structures that do not require large financial costs for delivery and assembly and have proven to be a convenient and reliable tool for shore protection works and reinforcement of slopes.

- Reinforcement with soil-cement piles – a relatively new method of drilling reinforcement, which has proven to be more practical and convenient for non-load-bearing structures and soils reinforcement. The use of soil-cement piles allows to significantly reduce indirect costs due to long-term stoppage of the railroad, on which reinforcement works are performed, and also do not require unnecessary costs for strengthening the walls of the well compared to the installation of drilling piles.

- Reinforcement with sorted and reinforced soils – a difficult to install, but the most commonly used method in European construction, which includes reinforcement of the transition area with three types of reinforced soil, which include sorted soil reinforced with cement; regular sorted soil and regular embankment soil, compacted to increase its strength. This type of reinforcement potentially gives the smoothest transition from the highest stiffness on the bridge to the lowest on the embankment, which is the most convenient and reliable in the long run.

In the second section of the dissertation the research of stress-strain state (SSS) of sections with transitional stiffness on approaches to bridges had been performed.

First of all, the section considers the main models of mathematical modeling of soil structures, methods of mathematical analysis, which include the finite element method (FEM), the method of discrete elements (MDE) and the method of boundary elements (MBE). The FEM had been chosen to study the work of the transition areas.

The first part of the section highlights the main achievements and results of the conducted research of SSS of soil structures with the help of FEM.

The second part of the section performs a numerical analysis of sections with transitional stiffness on the model of the approach of a real railway bridge located on the Loshkarivka-Pavlopillya railroad of the Merefya-Kherson line in Ukraine.

The study had been performed in two stages, the first allowed to assess the adequacy and reliability of the results of the proposed method. The second stage is a direct study of the SSS of transition areas with the models of reinforcements proposed in Section 1, comparison and analysis of their results.

The simulation had been performed in three dimensions. The components of the model are the bridge abutment, the embankment behind it and the slopes of the embankment. The main subject of the study is the intensity of soil subsidence in the area behind the bridge abutment with different reinforcement structures. The structure of the abutment and the embankment are modeled with hexagonal and octagonal three-dimensional elements with a predominant side length of 0.5 m.

As a result of mathematical modeling, isopoles of loads and displacements along the Z axis for the transition section with each of the types of reinforcement had been obtained and their comparison had been performed.

The maximum vertical displacement in the model №1 (original model without reinforcement) is 5.04 mm, in the model №2 (gabion reinforcement) - 1.72 mm, which is 66% less than the displacement in the original model, in the model №3 (reinforcement with soil-cement piles) - 2.65 mm, which is 47% less than the displacement in the original model, in the model №4 (reinforcement with sorted and cemented soils) - 1.55 mm, which is 69% less than the displacement in the original models.

The conclusion from the numerical analysis of SSS was the previous assumptions about the prospects of using different types of amplification. From the technological and practical point of view, in the current conditions of the Ukrainian railways and the industrial sector, the most expedient method of reinforcement was the use of gabions.

In the third section, an experimental study of the SSS of the construction of the transition areas by the centrifugal method had been performed.

The first part of the section highlights the features of the use of centrifugal modeling as a method of studying soil massifs. The main advantage of centrifugal modeling is the reproduction of real processes of complex materials in relatively small models with a scale of 1:20 to 1: 200 and the ability to study for short periods of time long-term processes occurring in real structures.

Centrifugal modeling is quite a complex research method in terms of preparation, so to obtain reliable results it is necessary to study the principle of tray study of soil models. Model scale and time are one of the most important criteria in

centrifugal modeling. It is absolutely important to obtain the same simulation conditions at each iteration to obtain reliable results.

The model of the transition section of the real bridge, similar to the numerical model in Section 2, had been used for modeling. The tests were performed on a unique centrifuge of the Research Laboratory of Soil Mechanics of the Dnipro National University of Railway Transport.

The simulation is performed for the original model and each of the three types of amplification proposed in Section 1. A 1:50 scale model had been built in a metal tray. The model is covered with layers of soil of 4-5 cm, which are compacted to a given density. An abutment model is installed on the first layer of soil. Each subsequent layer is compacted according to the specified scheme. Crushed stone of 3... 5 mm fraction and polymer mesh are used to reproduce the gabion reinforcement model. Soil-cement piles in the second model of reinforcement are performed by injecting cement binder into the body of cylindrical holes. To model the reinforcement with sorted and cemented soils, the sorted soil is stabilized with 2.5-3% cement. After preparing each model, the side wall of the tray is removed and the side of the model is marked with a grid, which will allow to estimate the scale and intensity of subsidence of the structure.

For each model, the experiment had been performed at an engine speed of 3.678 Hz. The rotation time of the centrifuge is 60 minutes, which is equal to 416 days of operation of the actual structure.

The test results are digital images of the model, converted into a vector view and superimposed on the original view of the model before amplification. Thus, the subsidence intensity of the reinforcement model in different horizontal and vertical coordinates and the maximum subsidence of the structure under load had been obtained.

Comparison of the obtained results showed the following results of maximum vertical deformation: for the test without reinforcement – 20.56 mm; for testing with gabion boxes reinforcement – 5.46 mm; for testing with reinforcement with soil-cement piles – 9.77 mm; for testing with reinforcement with sorted soils – 5.33 mm. Comparative analysis shows that the use of all three options of

reinforcement has a positive effect on reducing vertical deformations (2.10... 3.86 times).

The results obtained during numerical and experimental research and confirms the adequacy of the developed models had been studied and compared.

In the fourth section of the work, field studies of the area with transitional stiffness on the approach to the railway bridge had been performed.

The test had been performed by several methods: estimation of the vertical modulus of track elasticity at the transition section; determination of dynamic vertical forces acting from the train wheels on the rail and determination of track subsidence by the leveling method before and after reinforcement. For field testing during section 4, a model of reinforcement with soil-cement piles was chosen.

The first test method is performed by applying a vertical load on the rail at different points of the horizontal profile. Registration of intensity of loading and subsidence is carried out at the expense of electric accessories. As a result of the test, the values of vertical stiffness and vertical modulus of elasticity of the track at different points of the transition section had been obtained. The obtained data show a significant difference in the stiffness of the track on the bridge and on the embankment of the approach and draw conclusions about one of the main causes of bump at the end of the bridge.

In the second test method, the method of measuring axle accelerations is used to measure the vertical forces acting from the train wheels on the rail. In the course of the experiment, the values of the axle accelerations of the wheels of the DS-3 electric locomotive when passing it along the bump at the end of the bridge at different speeds of the experimental train had been obtained. As a result of the test, the vertical forces and accelerations that occur in the area of the bump at the end of the bridge had been obtained. The analysis of the obtained data shows the dependence of the vertical forces and acceleration that occur in the transition areas during the passage of the rolling stock on the intensity of the subsidence of the track.

The third part of the section is devoted to confirming the effectiveness of reinforcement of sections with transitional stiffness. For this purpose, the track had been leveled and its profile had been obtained, after which reinforcement had been

performed, after which re-leveling had been performed after 12 months. Thus, a comparative analysis of the normal transition section and the transition section with the reinforcement proposed in section 1 had been performed and its effectiveness had been confirmed.

**The scientific novelty** of the obtained results is as follows:

- new regularities of the stress-strain state of the transition section in the form of subsidence, stress and stiffness are obtained, on the basis of which methods of their reinforcement can be developed;
- for the first time in Ukraine, an experimental model of the transition section for centrifugal modeling was built, which allows to obtain the consequences of pre-long-term exposure to load while preserving the physical processes occurring in the embankment;
- the mathematical model of the transition section has been improved, which includes the bridge abutment, the embankment behind the abutment, and (if necessary) reinforcement and allows to obtain accurate subsidence and stresses at any point of the transition section;
- three new methods of reinforcement of the transition sections on the approaches to the bridges have been developed, each of which can be used depending on the initial conditions.

**The practical significance of the results.** The scientific results obtained in the dissertation can be used to model the transition areas and a deeper study of their nature. The constructed mathematical and experimental models can be used for research and development of soil reinforcement, including transition areas.

The developed reinforcement methods can be used to increase the stiffness of new or existing transition sections of railway or road bridges.

Key words: transition stiffness, bump at the end of the bridge, numerical modeling, centrifugal modeling, field tests, approaches of the bridge, gabions, soil cement.