

**UDC 625.122**V. D. PETRENKO<sup>1</sup>, O. L. TIUTKIN<sup>2</sup>, I. O. SVIATKO<sup>3\*</sup><sup>1</sup>Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 79, e-mail petrenko1937@mail.ru, ORCID 0000-0002-5902-6155<sup>2</sup>Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 79, e-mail tutkin@mail.ru, ORCID 0000-0003-4921-4758<sup>3\*</sup>Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 79, e-mail i-svjatko@yandex.ua, ORCID 0000-0002-7099-2637**ESTIMATION OF SUBGRADE STRENGTHENING INFLUENCE USING SOILCEMENT ELEMENTS**

**Purpose.** The aim of this work is to identify dependencies and options to strengthen the roadbed and a weak base by grouting piles. Analysis of software package SCAD to assess the effect of the selected option of strengthening the construction of spatial subgrade models. **Methodology.** In this paper the method of calculation of the soil mass in the software package SCAD is considered, which is a universal accounting system of finite-element analysis of structures and is focused on solving problems of designing buildings and structures rather complex structure. The finite element method is among the most modern and effective methods for the calculation of structures for various purposes. In the simulation, we get a complete picture of the stress-strain state of the study area, as well as the value of the limit load, rainfall, and so on. The spatial model based on the finite element volume, to better address the real characteristics of the soil mass, meets all the geometric characteristics of size and natural subgrade and the top structure the path that has been adopted in Ukraine. **Findings.** It was found that the most effective option to strengthen the roadbed, when applying grouting piles at the base of the subgrade and body, is to strengthen the five piles. At the same time there is even strengthen the soil mass at the level of 25 ... 30% of the entire depth. However, even with the strengthening of the only two piles at the base of the effect of the strengthening of 14.1%. Established equation is linear and describes the decrease in strain. Taking into account the results of the research can be concluded that the consolidation is proportional to the depth with any number of piles. The dependence of the strain on the number of piles adheres to a polynomial function. Strengthening the bases of the subgrade and body depth also occurs in proportion with any number of piles. **Originality.** Design scheme generation algorithm for the calculation of the subgrade on a weak basis by finite element method was determined. The selection of strength characteristics of soils and the design parameters for use during the numerical simulation was completed. Load process simulation of the system by rolling stock was grounded. **Practical value.** Analysis of stress-strain state of «weak base-subgrade» allows you to see the basic laws work the soil and take the necessary measures to enhance the cross-section profile of jet-grouting elements.

*Keywords:* subgrade; weak base; soil cement; stress-deformed state

**Introduction**

The main priority of rail transport is to provide of goods and passengers safety.

All facilities should be designed so as to correspond to its purpose, to be stable and reliable. Design of bases is a complex task that takes into account engineering and geological conditions as well as the design and performance properties of the structure.

Under the influence of the load from rolling stock and own weight of permanent way the soils deformed, and its deformation is greater than the greater tension in the soil. Deformation of soils bring to setting of structure. The tensions should

not exceed the limits in order to be secured conditions of stability and safety of permanent way [1, 4, 10].

Breach of the foundation stability displace in the form of displacement of natural soil mass, bringing to injuries or disturbance of the roadbed, such as soil slips, dips and more.

Experience of designing and performance of track structure showed that over time should take some measures to improve the characteristics of the soil mass to be able to the follow normal performance of the roadbed. [5, 3, 13]

Soilcement elements that are widely used abroad, as well as construction of industrial and civil objects for its purpose, can be used for the

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

strengthening of transport facilities, in particular at strengthening the roadbed as well as weak bases.

### Purpose

The aim of this work is to identify dependencies and parameters of subgrade strengthening and weak base using soilcement piles. Analyses of using of SCAD software system came for assessing of impact choose variant of strengthening for structure of roadbed spatial models.

### Methodology

The most of appropriate and promising method for assessment of roadbed stress-strain state is modeling the spatial models using finite element method. In this paper considers the method of calculation of soil mass by software complex SCAD, which is a universal calculation system of finite-element analysis of structures and orientate on solution the tasks of designing buildings and constructions rather complex structure. The method of finite elements it goes to the most modern and effective methods for the calculation of structures for various purposes. During the simulation we get a complete picture of the stress-strain state of the study area and the limit value loading, sedimentation, etc.

The spatial model based on volumetric finite elements to better take into account the real charac-

teristics of the soil mass meets all the geometric characteristics and natural size of subgrade and permanent way, which was adopted in Ukraine.

Deformation characteristics, those taken in the model correspond to the values which have been obtained in the study of subgrade soil [6, 7, 14].

At the time modeling applied so restrictions (boundary conditions):

- on the model bottom impose a ban on movements in the direction of the three axis – X, Y, Z;
- lateral facets of base have a ban on movements over the axis X and Y;
- diametrical sides of model – a ban of movements over axis Y (plane deformations condition). [8, 9, 12]

Top of model and also embankment slopes have no restrictions – free from boundary conditions.

The thickness of the computational model (on the axis Y) adopted 1.15 m, which corresponds to the width of two standard sleepers and two distances between sleepers with its epures 1740 pieces/km. The model is symmetrical on thickness relatively of axis X. Inclination of the railway slope make 1: 1.5. General view of the roadbed plan is shown in Figure 1.

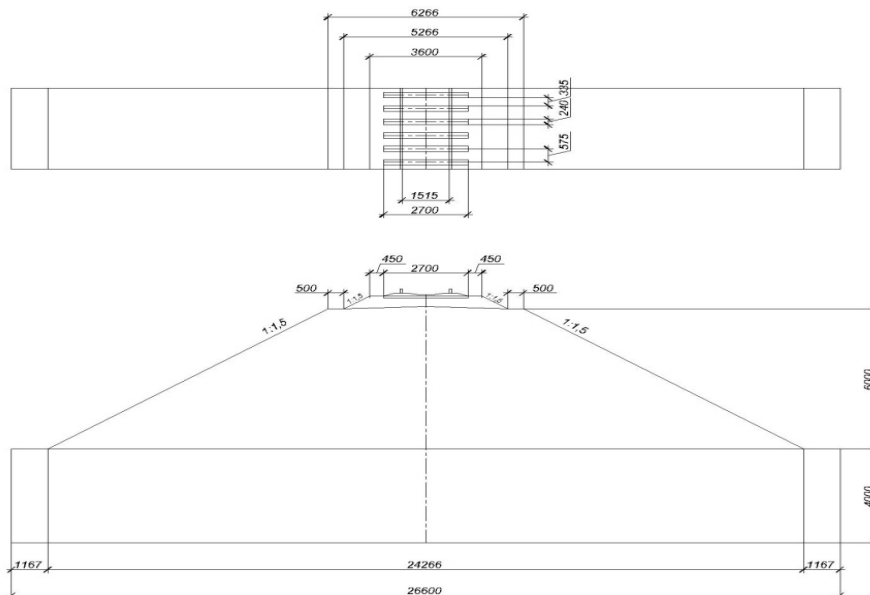


Fig. 1. General view of the roadbed plan with permanent way

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

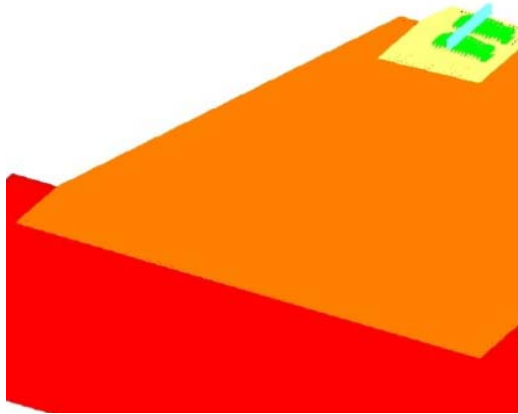


Fig. 2. The calculation model in program complex SCAD

All calculations performed by the multifrontal method of expansion of rigidity matrix with automatic optimization of the tape width, as this method is the most progressive when working with matrixes, which used to program complex SCAD [2, 11, 12, 15].

After the complete linear calculation values of deformations relatively axis Z and axis X were obtained. Precision of matrix expansion is  $1 \times 10^{12}$ .

General view of model in program complex SCAD shown in Figure 2.

In this paper have considered the following variants of strengthening: placement of soilcement piles with a diameter of 0.5 m only in the base of roadbed and in base and through the body of roadbed. Adopted by number of piles are two, three and five, respectively, for each variant.

In all cases soilcement piles were disposed symmetrically about the axis of the track.

During the calculations of strengthening variations the length of piles at the base is 3 m long and the length of piles in the base and in the body of embankment – 9 meters. The distance from the lower end of the pile to the bottom of the calculation model is 1.0 m.

### Findings

After carry out of the control calculation unfortified subgrade have been received the maximum deformations along the axis Z (Figure 3), that form 14.21 mm, and along the axis X (Figure 4) – 2.45 mm. At the level of the transition from the body of the embankment to the base subgrade is a slight curvature in view of change point with characteristic modification of direction deformation behavior.

It should also be noted that in the area of crossing from base to embankment remain about 50% of total deformations, which is 7 mm.

According to the results obtained with the strengthening by two soilcement piles only in the base, the overall deformation on the axis Z in the level of rail head formed 13.4 mm (Figure 5.), that is 5.7% less than the control calculation. Deformations of model in which additional piles were in the body of the embankment totaled 12.20 mm, that is 14,1% less deformations of unfortified models.

By the level of foot sleeper the deformations on the axis Z have been reduced in the case of strengthening of base on 4.0% and in the case of strengthening the base with the body of the embankment – on 14.0%.

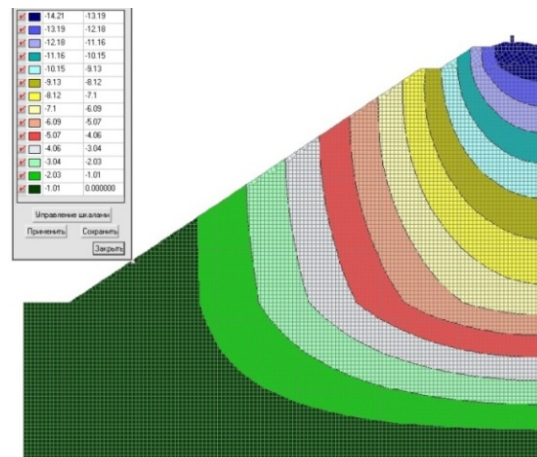


Fig. 3. The calculation without strengthening by soilcement piles. Deformation on the axis Z

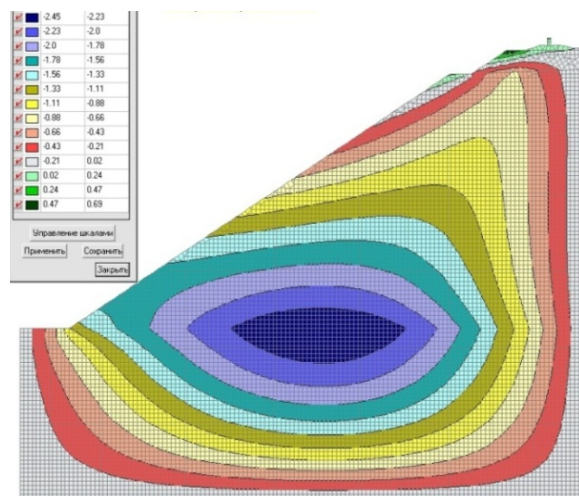


Fig. 4. The calculation without strengthening soilcement piles. Deformation on the axis X

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

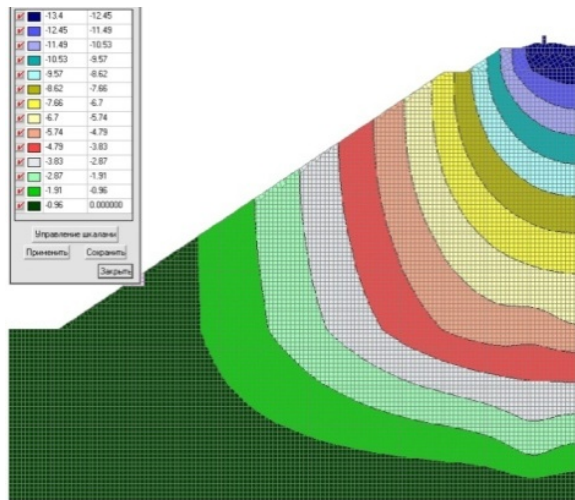


Fig. 5. Deformation on the axis Z.  
The calculation of two piles in base

In addition, the model the characteristic changes of izofields deformations on the places of piles existing. It should be noted that in the area of crossing between weak base and embankment total deformation decreased on average by 16%.

In strengthening of roadbed by three soilcement piles, so be observed decrease of deformation on the axis Z. Thus the effect of the pile using only in base and in the base and body of embankment significantly different. In the first case, reducing of deformations by the level of rail head happened on 8.2%, while in the second case – almost three times more – 20.6%.

However, in the plane of crossing between the base and the body of embankment exist several another situation. On the contrary, the strengthening only base reduce the deformations was about 27.3%, whereas the strengthening through the body of embankments exists of decrease by only 23.0%.

The calculation results in the strengthening by five soilcement piles testify about the following. The maximum deformation in the level of rail head totaled 12.62 mm and 10.57 mm at strengthening only bases and base with body of embankment respectively, representing a decrease of 11.2% and 25.6%. However, on the boundary of crossing from the base to the body of the embankments the effect from strengthening is the same reaching 29.1 ... 29.5% with comparison the control calculation. Also on the present boundary become more pronounced the change of isolines (Figure 6).

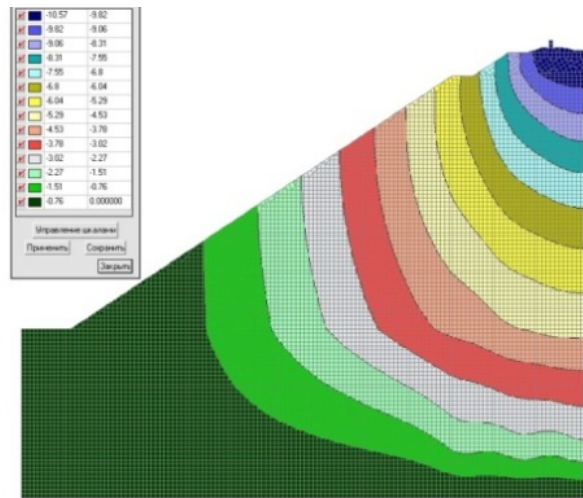


Fig. 6. Deformation on the axis Z.  
The calculation the five piles at the base  
and body of embankments

### Originality and practical value

The algorithm of forming design scheme for calculating of the embankment on the weak base by the finite element method has been determined. The selection of soil strength characteristics and the calculation parameters for use in numerical modeling has been done. The modeling of loading system process by rolling stock has been grounded.

Analysis of stress-strain state of the system «weak base – roadbed» permit to see the basic regularities of soil work and use of embankment cross-section profile strengthening by soilcement elements.

The method of subgrade on weak base modeling that reflects with their work under loading by own weight and rolling stock has been proposed.

### Conclusions

The most effective variant at the arrangement of soilcement piles at the base and in the body of embankment is strengthening its by five piles. Thus there is a uniform soil mass in the level 25 ... 30% on the all depth. Reducing of deformations is linear and describe by the equation  $y = 11.906 - 0,4867h$ , where  $h$  is the depth of plane base from top plane of railbed. However, even with the strengthening only two piles in the base effect from strengthening is 14.1%.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

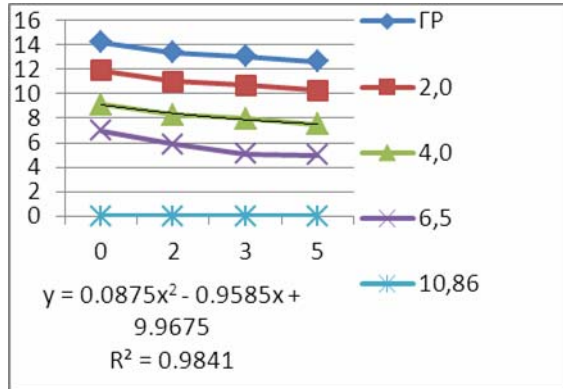


Figure 7. Graph of deformations  $Z$  (mm) in strengthening only base of embankment depending on number piles in base

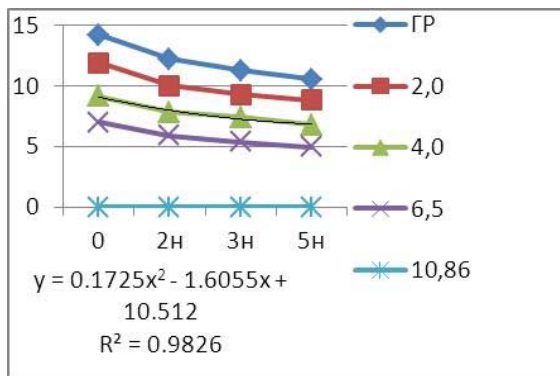


Fig. 8. . Graph of deformations  $Z$  (mm) in strengthening of base and of the body of embankment depending on number piles in base

Take into consideration these graphs possible to draw a conclusion that the strengthening is proportional to the depth at any number of piles. The dependence of the deformations from number of piles follows polynomial functions and describes by the equation  $y = 0,0875h^2 - 0,9585h + 9,9675$ . The strengthening of base and of embankment body at the depth also happens proportionately for any number of piles. The dependence of the deformations on the number of piles follows polynomial functions and describes by the equation  $y = 0,1725h^2 - 1,6055h + 10,512$ .

## LIST OF REFERENCE LINKS

1. Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010–2019 роки [Electronic resource] : законопроект України від 16 груд. 2009 р. № 1390. – Available at: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1390>. – Title from the screen. – Accessed : 13.09.2016.
2. ДБН В.2.1-10-2009. Зміна № 1. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. – На заміну СНІП 2.02.03-85 ; чинні з 2011–07–01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 126 с.
3. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України : ЦП-0138./ Е. І. Даніленко, В. О. Яковлев, А. М. Орловський [та ін.]. – Київ : НКТБ колійного гос-ва Укрзалізниця, 2006. – 56 с.
4. Кожушко, В. П. Основи і фундаменти : підруч. для вузів : в 2-х ч. – Харків : ХНАДУ, 2002. – Ч. 2. – 492 с.
5. Линченко, Ю. П. Моделирование свайного основания здания с применением интегральных элементов / Ю. П. Линченко, А. Е. Шуст // Стр-во и техногенная безопасность : сб. науч. тр. / Нац. акад. природоохран. и курортного стр-ва. – Симферополь, 2010. – Вып. 33–34. – С. 176–182.
6. Литовченко, П. А. Численное моделирование взаимодействия буронабивной сваи с локальным закреплением в грунте и окружающего ее грунтового массива / П. А. Литовченко // Стр-во, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепров. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 69. – С. 322–327.
7. Новые возможности системы ГРУНТ для определения параметров жесткости грунтового и свайного оснований / Д. А. Городецкий, В. П. Максименко, Д. В. Медведенко, Е. Б. Стрелец-Стрелецкий // Стр-во, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепров. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – 2013. – Вып. 69. – С. 155–160.
8. Петренко, В. Д. Порівняльний аналіз методів укріплення земляного полотна / В. Д. Петренко, І. О. Святко, Д. О. Ямпольський // Стр-во, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепров. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 69. – С. 369–373.
9. Петренко, В. Д. Порівняльний аналіз розрахункових моделей залізничного земляного полотна / В. Д. Петренко, Д. О. Ямпольський, І. О. Святко // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 4 (46). – Р. 56–62. doi: 10.15802/stp-2013/16619.
10. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість : ЦП-0117 : затв. наказом Укрзалізниця від 13.12.2004 р. № 960-ЦЗ. – Київ : ЦП УЗ, 2004. – 69 с.
11. Строкова, Л. А. Применение метода конечных элементов в механике грунтов : учеб. пособие /

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

- Л. А. Строкова. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2010. – 143 с.
12. Тюткин, А. Л. Сравнительный анализ конечно-элементных моделей свайного фундамента при взаимодействии с основанием / А. Л. Тюткин, А. В. Гулак // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 32. – С. 122–126.
  13. Horvát F. Evaluation of railway track geometry stabilisation effect of geogrid layers under ballast on the basis of laboratory multi-level shear box tests / F. Horvát, Sz. Fisher, Z. Major // Acta Technica Jaurinensis. – 2013. – № 2. – P. 21–44.
  14. Hogue, S. Building Simulation Tools for Retrofitting Residential Structures / S. Hogue // Energy Engineering. – 2012. – Vol. 109. – Iss. 3. – P. 53–74.
  15. Ziaie-Moay, R. Effective parameters on modulus of subgrade reaction in clayey soils / R. Ziaie-Moay, M. Janbaz // J. of Applied Sciences. – 2009. – Vol. 9. – Iss. 22. – P. 4006–4012. doi: 10.3923/jas.2009.4006.4012.

В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup>, О. Л. ТЮТКІН<sup>2</sup>, І. О. СВЯТКО<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Мости та тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 79, ел. пошта petrenko1937@mail.ru, ORCID 0000-0002-5902-6155

<sup>2</sup>Каф. «Мости та тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 79, ел. пошта tutkin@mail.ru, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3\*</sup>Каф. «Мости та тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 79, ел. пошта i-svjatko@yandex.ua, ORCID 0000-0002-7099-2637

## ОЦІНКА ВПЛИВУ УКРІПЛЕННЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ГРУНТОЦЕМЕНТНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

**Мета.** В роботі передбачається виявити залежності та параметри укріплення земляного полотна і слабкої основи за допомогою грунтоцементних паль. Також потрібно зробити аналіз використання програмного комплексу SCAD для оцінки впливу обраного варіанту укріплення при побудові просторової моделі земляного полотна. **Методика.** В даній роботі розглядається методика розрахунку грунтового масиву у програмному комплексі SCAD, який є універсальною розрахунковою системою кінцево-елементного аналізу конструкцій та орієнтований на вирішення завдань проектування будівель і споруд досить складної структури. Метод скінченних елементів відноситься до найбільш сучасних і ефективних методів для розрахунку споруд різного призначення. Під час моделювання отримуємо повну картину напружено-деформованого стану досліджуваної області, а також значення граничного навантаження, осідання тощо. Просторова модель на основі об'ємних кінцевих елементів, для кращого врахування реальних характеристик грунтового масиву, відповідає всім геометричним характеристикам і натурним розмірам земляного полотна та верхньої будови колії, яка прийнята на території України. **Результати.** Встановлено, що найефективнішим варіантом укріплення земляного полотна, при влаштуванні грунтоцементних паль в основі й тілі насипу, є укріплення п'ятьма палями. При цьому спостерігається рівномірне укріплення грунтового масиву на рівні 25...30 % по всій глибині. Проте, навіть із укріпленням лише двома палями в основі, ефект від укріплення становить 14,1 %. Встановлено рівняння, яке має лінійний характер і описує зменшення деформацій. Приймаючи до уваги результати досліджень, можна зробити висновки, що укріплення по глибині відбувається пропорційно при будь-якій кількості паль. Залежність деформацій від кількості паль дотримується поліноміальної функції. Укріплення основи і тіла насипу по глибині також відбувається пропорційно при будь-якій кількості паль. **Наукова новизна.** Авторами визначено алгоритм формування розрахункової схеми для розрахунку насипу на слабкій основі методом скінченних елементів. Виконано підбір міцнісних характеристик ґрунтів та розрахункових параметрів для застосування під час чисельного моделювання. Обґрунтовано моделювання процесу навантаження системи рухомим складом. **Практична значимість.** Аналіз напружено-деформованого стану системи «слабка основа-земляне полотно» дозволяє побачити основні закономірності роботи ґрунту і вжити необхідні заходи для підсилення поперечного профілю грунтоцементними елементами.

*Ключові слова:* земляне полотно; слабка основа; грунтоцементні елементи; напружено-деформований стан

В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup>, А. Л. ТЮТКИН<sup>2</sup>, И. А. СВЯТКО<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 79, эл. почта petrenko1937@mail.ru, ORCID 0000-0002-5902-6155

<sup>2</sup>Каф. «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 79, эл. почта tutkin@mail.ru, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3\*</sup>Каф. «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 79, эл. почта i-svjatko@yandex.ua, ORCID 0000-0002-7099-2637

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УКРЕПЛЕНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ГРУНТОЦЕМЕНТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

**Цель.** В работе предполагается выявить зависимости и параметры укрепления земляного полотна и слабого основания с помощью грунтоцементных свай. Также необходимо сделать анализ программного комплекса SCAD для оценки влияния выбранного варианта укрепления при построении пространственной модели земляного полотна. **Методика.** В данной работе рассматривается методика расчета грунтового массива в программном комплексе SCAD, который является универсальной расчетной системой конечно-элементного анализа конструкций и ориентирован на решение задач проектирования зданий и сооружений достаточно сложной структуры. Метод конечных элементов относится к наиболее современным и эффективным методам для расчета сооружений различного назначения. При моделировании получаем полную картину напряженно-деформированного состояния исследуемой области, а также значение предельной нагрузки, осадки и прочее. Пространственная модель на основе объемных конечных элементов, для лучшего учета реальных характеристик грунтового массива, соответствует всем геометрическим характеристикам и натурным размерам земляного полотна и верхнего строения пути, которые приняты на территории Украины. **Результаты.** Установлено, что наиболее эффективным вариантом укрепления земляного полотна, при устройстве грунтоцементных свай в основании и теле насыпи, является укрепление пятью сваями. При этом наблюдается равномерное укрепление грунтового массива на уровне 25...30 % по всей глубине. Однако, даже с укреплением только двумя сваями в основе, эффект от укрепления составляет 14,1 %. Найдено урвнение, которое имеет линейный характер и описывает уменьшение деформаций. Принимая во внимание результаты исследований, можно сделать выводы, что укрепление по глубине происходит пропорционально при любом количестве свай. Зависимость деформаций от количества свай придерживается полиномиальной функции. Укрепление основы и тела насыпи по глубине также происходит пропорционально при любом количестве свай. **Научная новизна.** Авторами определен алгоритм формирования расчетной схемы для расчета насыпи на слабом основании методом конечных элементов. Выполнен подбор прочностных характеристик грунтов и расчетных параметров для применения численного моделирования. Обосновано моделирование процесса нагрузки системы подвижным составом. **Практическая значимость.** Анализ напряженно-деформированного состояния системы «слабое основание-земляное полотно» позволяет увидеть основные закономерности работы грунта и принять необходимые меры для усиления поперечного профиля грунтоцементными элементами.

**Ключевые слова:** земляное полотно; слабое основание; грунтоцементные элементы; напряженно-деформированное состояние

### REFERENCES

1. *Derzhavna tsilova prohrama reformuvannia zaliznychnoho transportu na 2010–2019 roky: zakonoproekt Ukrainy vid 16 hrudnia 2009 r. № 1390* (The state target program of reforming the railway transport in 2010–2019 years). Available at: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1390> (Accessed 13 September 2016).
2. *DBN V.2.1-10-2009. Zmina № 1. Osnovy ta fundamenty sporud. Osnovni polozhennia proektuvannia* [State Construction Standart V.2.1-10-2009. Change No. 1. Bases and foundations of buildings. General of the design.]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2011. 126 p.
3. Danilenko E.I., Yakovlev V.O., Orlovskiy A.M. *Instruktsiia z ulashtuvannia ta utrymannia kolii zaliznyts Ukrainy: TsP-0138* [Instructions for design and track maintenance of railways in Ukraine]. Kyiv, NKTB koliinoho hospodarstva Ukrzaliznytsi Publ., 2006. 56 p.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

4. Kozhushko V.P. *Osnovy i fundamenti* [Bases and foundations]. Kharkiv, KhNAHU Publ., 2002. Part 2. 492 p.
5. Linchenko Yu.P., Shust A.Ye. Modelirovaniye svaynogo osnovaniya zdaniya s primeneniyyem integralnykh elementov [Pile foundation simulation of the building with the integrated elements usage]. *Sbornik nauchnykh trudov «Stroitelstvo i tekhnogennaya bezopasnost»* [Proc. «Construction and technogenic safety»], 2010, issue 33-34, pp. 176-182.
6. Litovchenko P.A. Chislennoye modelirovaniye vzaimodeystviya buroinektsionnoy svai s lokalnym zakrepleniyyem v grunte i okruzhayushchego yeye gruntovogo massiva [Numerical modeling the interaction of inclined pile with local fixing in the ground and its surrounding soil mass]. *Sbornik nauchnykh trudov «Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroeniye»* [Proc. «Construction, materials science, mechanical engineering»], 2013, issue 69, pp. 322-327.
7. Gorodetskiy D.A., Maksimenko V.P., Medvedenko D.V., Strelets-Streletskiy Ye.B. Novyye vozmozhnosti sistemy GRUNT dlya opredeleniya parametrov zhestkosti gruntovogo i svaynogo osnovaniy [New opportunities of system GRUNT for determining stiffness parameters of subgrades and pile foundations]. *Sbornik nauchnykh trudov «Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroeniye»* [Proc. «Construction, materials science, mechanical engineering»], 2013, issue 69, pp. 155-160.
8. Petrenko V.D., Sviatko I.O., Yampolskiy D.O. Porivnialnyi analiz metodiv ukriplennia zemlianoho polotna [Comparative analysis of methods for subgrade strengthening]. *Sbornik nauchnykh trudov «Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroeniye»* [Proc. «Construction, materials science, mechanical engineering»], 2013, issue 69, pp. 369-373.
9. Petrenko V.D., Yampolskiy D.O., Sviatko I.O. Porivnialnyi analiz rozrakhunkovykh modelei zaliznychnoho zemlianoho polotna [Comparative analysis of calculation models of railway subgrade]. *Nauka ta prohres transport – Science and Transport Progress*, 2013, no. 4 (46), pp. 56-62. doi: 10.15802/stp2013/16619.
10. *Pravyly rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiikist: TsP-0117. Nakaz Ukrzaliznytsi vid 13.12.2004 r. № 960-TsZ* [Calculations of railway track for strength and stability. Ukrzaliznytsia Order No. 960-TsZ]. Kyiv, TsP UZ Publ., 2004. 69 p.
11. Strokova L.A. *Primeneniye metoda konechnykh elementov v mekhanike gruntov* [Application of finite element method in soil mechanics]. Tomsk, Tomskiy politekhnicheskii universitet Publ., 2010. 143 p.
12. Tyutkin A.L., Gulak A.V. Sravnitelnyy analiz konechno-elementnykh modeley svaynogo fundamenta pri vzaimodeystvii s osnovaniyyem [Comparative analysis of finite element models of pile foundation in cooperation with base]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 32, pp. 122-126.
13. Horvát F., Fisher Sz., Major Z. Evaluation of railway track geometry stabilisation effect of geogrid layers under ballast on the basis of laboratory multi-level shear box tests. *Acta Technica Jaurinensis*, 2013, no. 2, pp. 21-44.
14. Hogue S. Building Simulation Tools for Retrofitting Residential Structures. *Energy Engineering*, 2012, vol. 109, issue 3, pp. 53-74.
15. Ziaie-Moay R., Janbaz M. Effective parameters on modulus of subgrade reaction in clayey soils. *Journal of Applied Sciences*, 2009, vol. 9, issue 22, pp. 4006-4012. doi: 10.3923/jas.2009.4006.4012.

*Prof. N. B. Kurhan Dr. Sc. (Tech.) (Ukraine); Prof. A. V. Slodyankin Dr. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published*

Received: March 22, 2016

Accepted: July 20, 2016