

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

UDC 624.131.31/.543:004

V. D. PETRENKO<sup>1</sup>, O. L. TIUTKIN<sup>2\*</sup>, D. YU. IHNATENKO<sup>3</sup>, V. V. KOVALCHUK<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department «Bridges and Tunnels» of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 708 50 69, e-mail petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

<sup>2\*</sup> Department «Bridges and Tunnels» of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3</sup> Department «Bridges and Tunnels» of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 442 36 63, e-mail undulula@gmail.com, ORCID 0000-0001-6805-6703

<sup>4</sup> Private production and commercial business «Technotransprojekt», Krivorogskay str., 72, Dnepr, Ukraine, 49000, tel. +38 (067) 566 09 15, e-mail mostk@ukr.net

### COMPARATIVE CALCULATION OF THE STABILITY OF THE LANDSLIDE SLOPE IN THE SOFTWARE COMPLEXES «OTKOS» AND «LIRA-CAD 2017»

**Purpose.** The analysis and comparison of the results of calculation by the finite-element model of the slope in the software complex «LIRA-CAD 2017» with the determination of the its stability in the software complex «OTKOS» allows to determine the accuracy the results and the most favorable conditions for the development of the displacement and parameters of the most dangerous surface slip for further calculation of anti-slip retaining structures. **Methodology.** The geomorphological data were obtained from the results of laboratory studies of soils in the considered slope. Creation of a bulk finite element model of the slope in accordance with the built cuts and depths of soil layers. Calculation of the nonlinear problem of finite-element simulation of the slope in the software complex «LIRA-CAD 2017». Creation and calculation of the stability problem of the landslide slope in the software complex «OTKOS» and comparison of the results of the its stress-strain state. **Results.** The results of calculating the finite-element model of the landslide slope in the software complex «LIRA-CAD 2017» and its stability in the software complex «OTKOS» were obtained. The analysis of the obtained results of sliding surfaces study is carried out. The calculation of the strengthening of the slope area is carried out with the help of soil cement retaining piles, located at right angles to the vector of the displacement direction. **Originality.** Despite the presence of a large number of different methods of studying the surfaces of sliding, it is impossible to determine exactly the scenario of the displacement, using only one of the calculation methods. First of all, this is due to the rather high variation of the initial data of the problem, which in turn depends on the environment and assumptions, as well as on external factors that can not be taken into account precisely. The next task is to carry out the calculation of the strengthening of the landslide slope by soil-cement piles. **Practical value.** It is known that it is advisable to use soil-cement piles as a protective element, which interacts well with the soil environment due to its structure of the source material. A comparative analysis of the calculation results of the slope stability with the help of software systems «LIRA-CAD 2017» and «OTKOS» gives an answer to the question of the its reliability.

*Key words:* soil-cement pile; landslide, anti-slip support structure; landslide slope; comparative analysis

#### Introduction

In carrying out design work on the protection of landslide slopes, much attention should be paid to the study of the accuracy and reliability of calculations. Among all possible variants of shift development, the most attention deserve results in which the least value of the coefficient of stability  $K$  are obtained. In order to assess the probability of occurrence of a certain scenario, it is necessary to

determine the criteria of the danger of each situation, since the landslides are different in terms of the rate of origin and development, in volume earthen masses that are moving, and in general, one and the same slope at the same time is a different slope in the conditions of changing soil characteristics, for example, during soil flooding as a result of soil water level changes or during prolonged rainfall. Therefore, for the exact calculation it is necessary to consider as many options as possible,

on the basis of which it is necessary to compare the obtained results and to find out under what circumstances a shift can occur.

### Purpose

The purpose of this study is to analyze and evaluate the accuracy of calculation methods on the basis of the obtained results of the comparative finite-element modeling of the nonlinear stability problem of a landslide slope in the software complex «LIRA-CAD 2017» and «OTKOS».

### Methodology

The calculation of the stability of the landslide slope was carried out in the software complex «LIRA-CAD 2017». The engineering-geological elements of the soil were assigned as a type of finite elements of FE 271-276 (Volume Physically Nonlinear FE to simulate the one-sided operation of the soil on compression taking into account the shear). Soil-cement piles, simulated by rods with a rigidity of a round cross-section of type FE 10 (universal spatial rod FE), with a diameter of 0,6 m.

To estimate the justice of the using that methodology engineering-geological studies of the landslide area of car road in the Lvov region were obtained.

According to the administrative division, the studying area is located in Mostyskiy district of Lviv region. In geostuctural terms, the shifting area is located within the outer zone of the Precarpathian Trench, separating the East European platform from the folded region of the Carpathians.

In the geological structure, deposits of the rootstones, which are represented by the formation of the Neogene Age (NA), composed of clay with layers of dusty sands, mica, are involved. Montmorillonite clay with thinly mica, viscous, from hard to trophophilic, with layers of siltstones, sometimes very ironed. The sand including's reduce the strength of the clutch by 2-4 times. Slender layering, the presence of siliceous aquifers and sand contributes to the development of landslide deformations in clay and complicates their use as a basis. Sands are dusty and their filtration coefficient is 0,3-0,5 m/day. For these conditions, the results of calculating of the landslide and the slopes stability are carried out and presented in the form of calculated coefficients of stability  $K$  in Fig. 1-8.

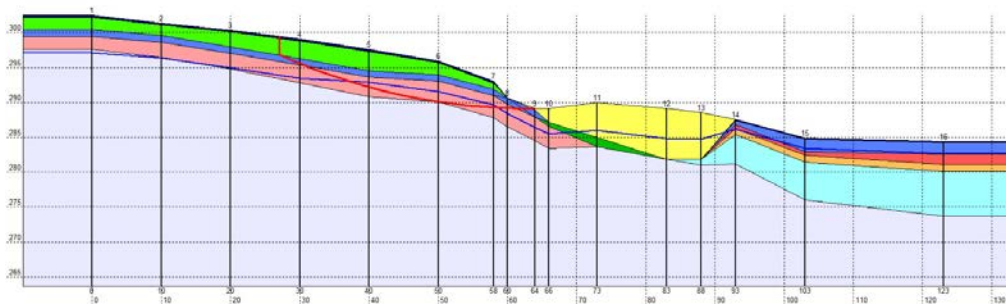


Fig. 1. Results of calculating the stability of the slope by the Bishop method (simplified),  $K = 1,449$

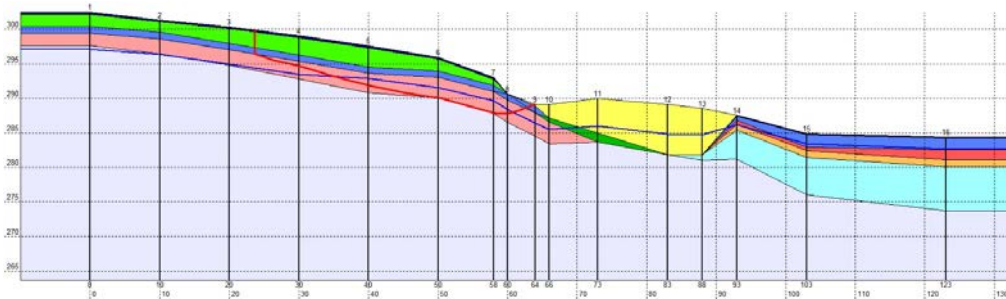


Fig. 2. Results of calculating the stability of the slope by the method of the Corps Engineers number 1,  $K = 1,203$

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

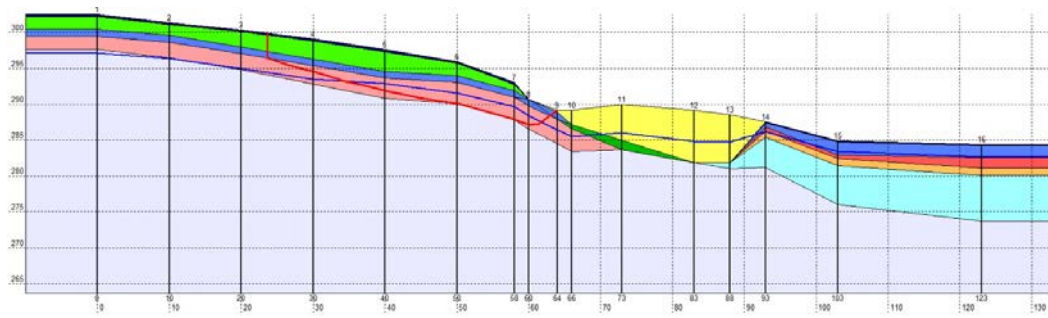


Fig. 3. Results of calculating the stability of the slope by the method Lowe and Caraffaite,  $K = 1,134$

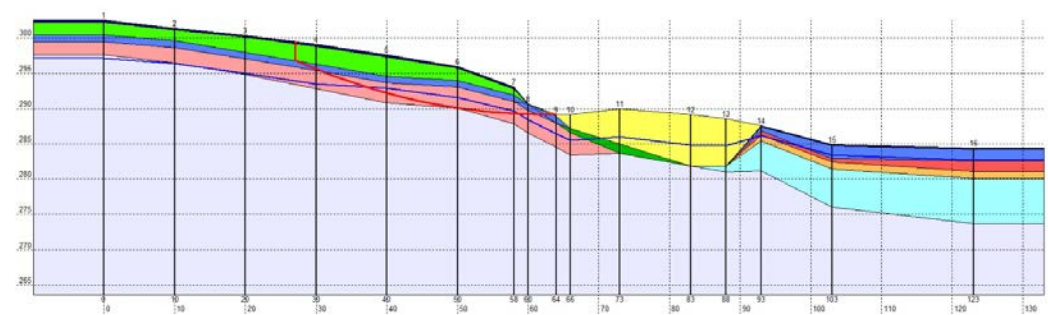


Fig. 4. Results of calculating the stability of the slope by the Spencer method,  $K = 1,452$

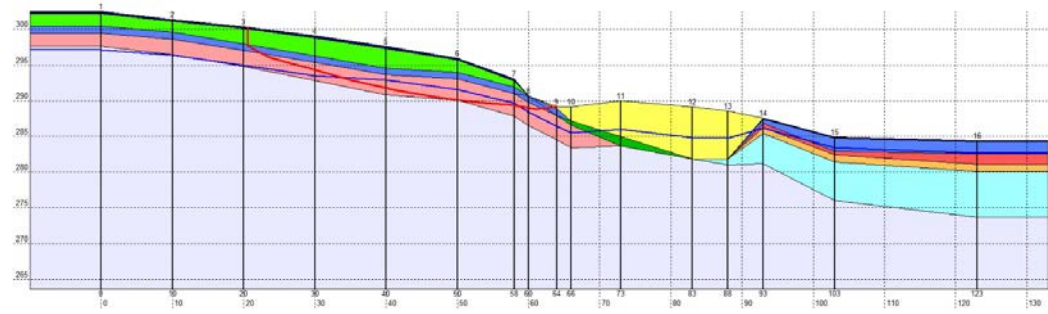


Fig. 5. Results of calculating the stability of the slope by the method of Fedorovsky-Kurilo,  $K = 1,369$

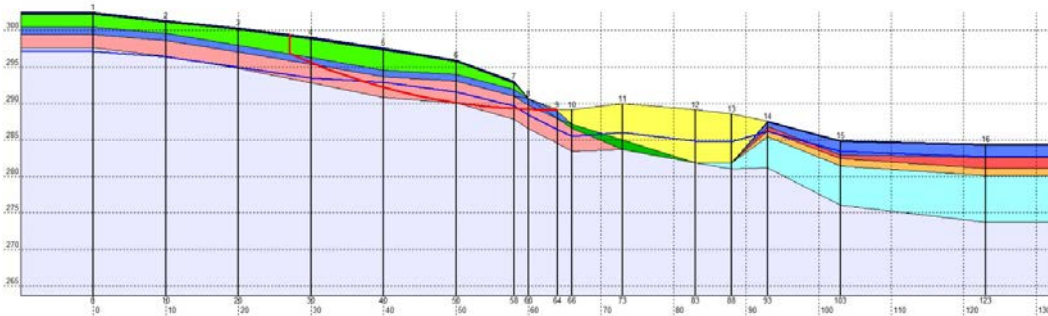


Fig. 6. Results of calculating the slope stability using the Felenius method,  $K = 1,449$

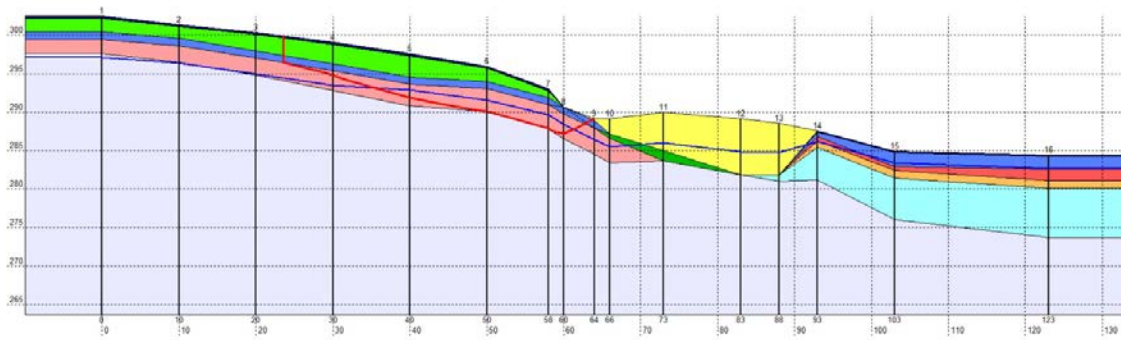


Fig. 7. Results of calculating the stability of the slope using the Yanbu method (adjusted),  $K = 1,193$

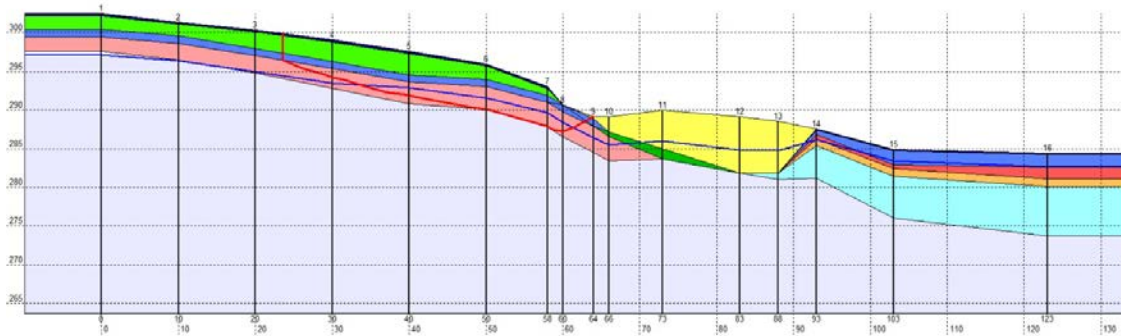


Fig. 8. Results of calculating the stability of the slope using the Yanbu method (simplified),  $K = 1,146$

The results of calculations are summarized in the table 1.

least value of the coefficient of stability), and placed the results in order of growth (table 2).

Table 1

| Name of method              | Received stability factor |
|-----------------------------|---------------------------|
| Bishop (Simplified)         | 1,449                     |
| Corps of engineers number 1 | 1,203                     |
| Lowe and Caraffaite         | 1,134                     |
| Spencer                     | 1,452                     |
| Fedorovsky-Kurilo           | 1,369                     |
| Fellenius                   | 1,449                     |
| Yanbu (adjusted)            | 1,193                     |
| Yanbu (Simplified)          | 1,146                     |

Table 2

| Name of method              | The obtained coefficient of stability |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| Lowe and Caraffaite         | 0,00 %                                |
| Yanbu (Simplified)          | +1,06 %                               |
| Yanbu (adjusted)            | + 5,2 %                               |
| Corps of engineers number 1 | + 6,09 %                              |
| Fedorovsky-Kurilo           | +20,72 %                              |
| Fellenius                   | + 27,78 %                             |
| Bishop (Simplified)         | + 27,78 %                             |
| Spencer                     | +28,04 %                              |

From the analysis, we can conclude that the worst scenario of the development of the shift occurs in the case when the coefficient of stability is the minimum, that is, by the method Lowe and Caraffaite (Figure 3).

We defined the deviation of the results of the calculation by different methods, taking the method Lowe and Karafayt for the main one (with the

As a confirmation of the correctness of the calculation results in the software complex «OTKOS», the calculation in the software complex "LIRA-CAD 2017" in the processor "Installation" in order to compare the results at different stages of model calculation were perform (Figures 9-11).

1) Stage «Soil». Displays the operation of the system without the placement of the pile under conditions when the slope is in equilibrium. Soils are in a state of natural moisture.

2) Stage «Arrangement of Piles». Vertical displacements from the soil mass solidification are

nullified. Soils are in a state of natural moisture. Piles are fitted. The weight of the pile acts on an array of soil.

3) Stage «Work Pile». Reflects the work of the pile under full water saturation of all layers of the soil except the deepest, below the thalweg ravine.

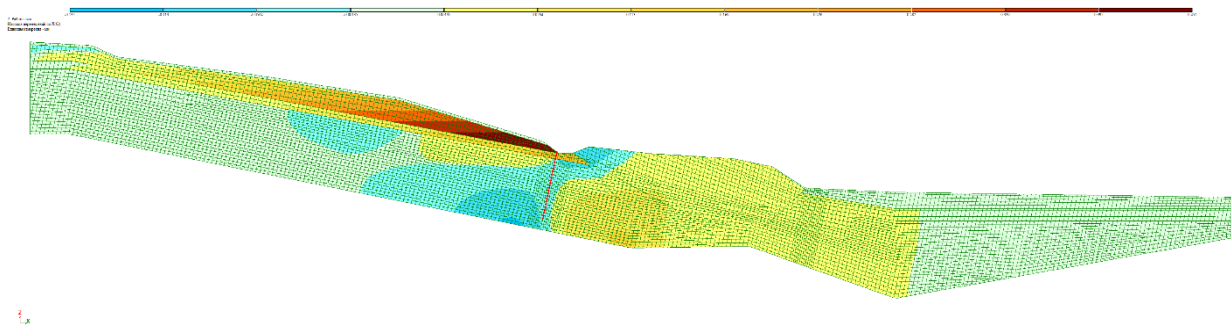


Fig. 9. Stage "Arrangement of Piles". Isolation of displacement. The maximum value for the X axis is 0.45 mm.

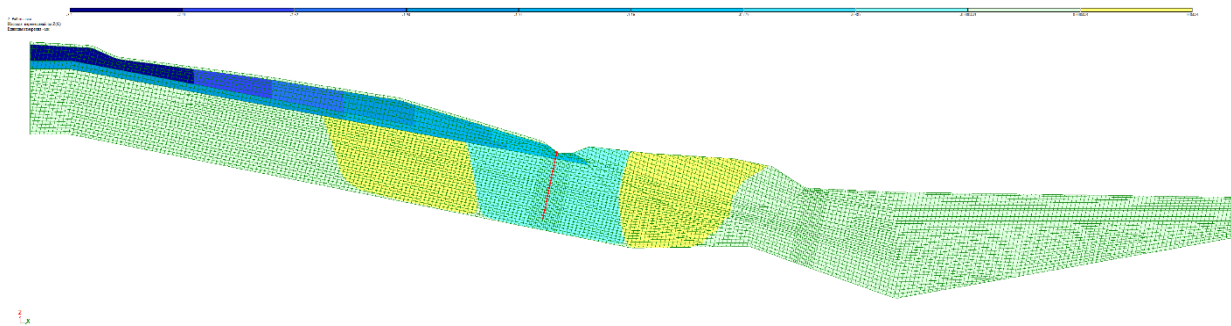


Fig. 10. "The Pile of Work". Isolation of displacement. The maximum value for the Z axis is 3.1 mm.

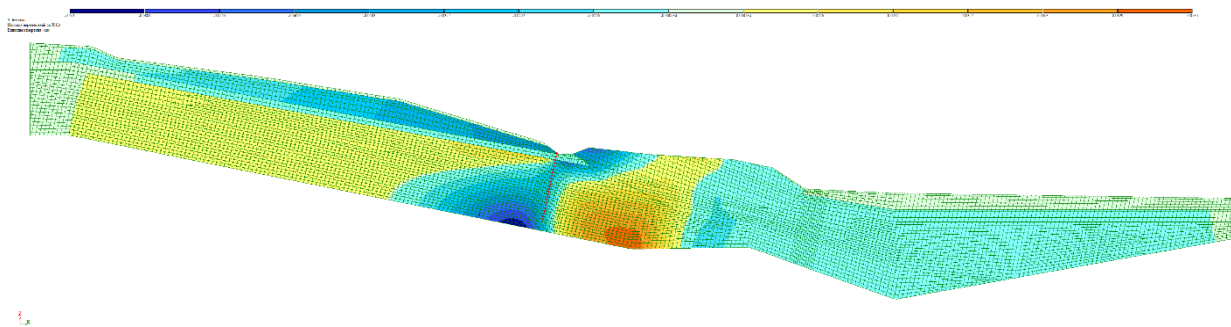


Fig. 11. The slope is strengthened by ground cement piles. Isolation of displacement. The maximum value for the X axis is - 0.1 mm.

### Conclusions

Based on the calculations made, the following conclusions can be drawn.

1. Application of soil-cement piles as support structures in landslide areas gives the opportunity to prevent landslide processes if the work is carried out on the basis of the preliminary calculation of

the nonlinear stability problem. The location of the piles should be done in such a way that they can be technologically implemented, that is, the plot should be close to the horizontal surface in the area for the equipment to perform. The length of the piles should be determined by calculation and taken in such a way that the pile passes through the

surface of the slip of the possible shear and dipped below into a steady layer of soil.

2. The results obtained by calculating the parameters and bearing capacity of the pile always depend on the given conditions and the initial data of the problem. Error in geological data can lead to false results and discrepancies in the operation of the calculation model in reality.

3. The error of calculation of this task in the amount of 2400 iterations is 0.46%. That is, with a displacement of 3.1 mm, the error of the results is  $\pm 0.014$  mm, which is quite enough for this task.

4. With the help of finite-element simulation it becomes possible to solve a practical problem of any complexity, regardless of the diversity of geological conditions and the shape of the slope.

#### REFERENCES

1. ДБН В.1.1-24:2009. Інженерний захист територій, будинків і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення [Текст]. Надано чинності 2010-01-07. – Київ : Держстандарт України, 2010. – 69 с.
2. Гинзбург, Л. К. Противооползневые сооружения [Текст] : монографія / Л. К. Гинзбург. – Днепропетровск : Лира ЛТД, 2007. – 188 с.
3. Ковров, О. С. Оцінка впливу гідрогеологічних характеристик ґрунтів на стійкість природних схилів для прогнозу зсувів [Текст] / Ковров О. С. // Екологічна безпека. Оцінка та прогнозування техногенного впливу на довкілля. – Дніпропетровськ, Національний гірничий університет, 2013. – С. 72-76.
4. Ковров, А. С. Геомеханическое обоснование параметров устойчивых откосов карьеров в сложноструктурном массиве мягких пород [Текст] : дисс. канд. техн. наук : 05.15.09 / Ковров Александр Станиславович ; – Днепропетровск, 2011. – 175 с.
5. Строкова, Л. А. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов [Текст] / Л. А. Строкова // Известия Томского политехнического университета. – №1. – Томск : ТПУ, 2008. – С. 69-74.
6. Кіріяк, К. К. Обґрунтування технологічних параметрів ін'єкційного закріплення зсувонебезпечних ґрунтових структур [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.15.09 / Кіріяк К. К.; Дніпропетр. нац. гірн. ун-т. – Дніпропетровськ, 2013. – 17 с.
7. Griffiths, D. V. and P. A. Lane. Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, 1999. – Vol. 49, – № 3, – pp. 387-403.
8. Дорфман, А. Г. Исследование устойчивости склонов [Текст] / А. Г. Дорфман, А. Я. Туровская // Вопросы геотехники : Межвуз. сб. научн. трудов. – Днепропетровск, 1975. – № 24. – С. 132-156.
9. Оползни. Исследование и укрепление [Текст] / под ред. Шустера Р. и Кризека Р. – Москва : Мир, 1981. – 368 с.
10. Ковров, О. С. Оцінка впливу гідрологічних характеристик ґрунтів на стійкість природних схилів для прогнозу зсувів [Текст] / О. С. Ковров // Екологічна безпека. – № 1/2003 (15). – С. 72-76.
11. Федоровский, В. Г. Метод расчета устойчивости откосов и склонов [Текст] / В. Г. Федоровский, С. В. Курилло. – Москва : Геоэкология, 1997. – № 6. – С. 95-106.
12. The application of injection - grouting for strengthening of the weak subgrade foundations [Текст] / V. D. Petrenko, I. O. Sviatko, D. O. Yampolskyu // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения. – 2014. – Вып. 77. – С. 144-147.
13. Оцінка стійкості природних схилів методами математичного моделювання в програмі «ОТКОС» [Текст] / В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін, О. І. Дубінчик, В. Р. Кільдєєв // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2015. – Вип. 8. – С. 23-32.
14. Estimation of Subgrade Strengthening Influence Using Soilcement Elements [Текст] / V. D. Petrenko, O. L. Tyutkin, I. O. Sviatko // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2016. – № 4. – С. 161-168.
15. Albataineh, N. Slope stability analysis using 2D and 3D methods [Текст] / N. Albataineh. – Ohio, United States : The university of Akron, 2006. – 126 p.

В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup>, О. Л. ТЮТЬКІН<sup>2\*</sup>, Д. Ю. ІГНАТЕНКО<sup>3</sup>, В. В. КОВАЛЬЧУК<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, ел. пошта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

<sup>2</sup> Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка

© V. D. Petrenko, O. L. Tyutkin, D. YU. Ihnatenko, V. V. Kovalchuk, 2018

В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта alexeyutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3</sup> Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 442 36 63, ел. пошта undulula@gmail.com, ORCID 0000-0001-6805-6703

<sup>4</sup> ПБКП «Технотранспроєкт», вул. Криворізьська, 72, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (067) 566 09 15, ел. пошта mostk@ukr.net

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК СТІЙКОСТІ ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНОЇ ДІЛЯНКИ СХИЛУ В ПРОГРАМНИХ КОМПЛЕКСАХ «ОТКОС» І «ЛІРА-САПР 2017»

**Мета.** Аналіз і порівняння результатів розрахунку скінченно-елементної моделі зсувонебезпечного схилу у програмному комплексі «ЛІРА-САПР 2017» з розрахунком стійкості схилу в програмному комплексі «ОТКОС» дозволяють визначити точність отриманих результатів розрахунку стійкості та визначити найбільш сприятливі умови для розвитку зсуву, а також параметри найбільш небезпечної поверхні ковзання для подальшого розрахунку протизсувних підпірних конструкцій. **Методика.** Аналіз геоморфологічних даних, отриманих за результатами проведених лабораторних досліджень ґрунтів ділянки схилу, що розглядається. Створення об'ємної скінченно-елементної моделі схилу згідно побудованих розрізів та глибин залягання шарів ґрунту. Розрахунок нелінійної задачі скінченно-елементного моделювання схилу в програмному комплексі «ЛІРА-САПР 2017». Створення та розрахунок задачі стійкості зсувонебезпечного схилу в програмному комплексі «ОТКОС». Порівняння отриманих результатів напружено-деформованого стану схилу та визначення відхилень у розрахунках за кривими ковзання. **Результати.** Отримано результати розрахунку скінченно-елементної моделі зсувонебезпечного схилу в програмному комплексі «ЛІРА-САПР 2017». Отримано результати розрахунку стійкості зсувонебезпечної ділянки схилу в програмному комплексі «ОТКОС». Проведено аналіз отриманих результатів дослідження поверхонь ковзання. Виконаний розрахунок укріплення зсувонебезпечної ділянки схилу за допомогою ґрунтоцементних пальових підпірних конструкцій, розташованих під прямим кутом відносно напрямку зсуву. **Наукова новизна.** Незважаючи на наявність великої кількості різноманітних методів дослідження поверхонь ковзання зсувів, неможливо визначити достеменно за яким саме сценарієм буде розвиватися зсув, використовуючи лише один з методів розрахунку. Перш за все, це пов'язано з досить високою варіативністю вихідних даних задачі, які в свою чергу залежать від умов середовища та допущень, а також від зовнішніх факторів, які неможливо врахувати точно. Наступною задачею постає виконання розрахунку укріплення зсувонебезпечного схилу ґрунтоцементними палями. **Практична значимість.** Відомо, що ґрунтоцементні палі доцільно застосовувати як захисний елемент, який досить добре взаємодіє з ґрунтовим середовищем завдяки своїй структурі вихідного матеріалу. Порівняльний аналіз результатів розрахунку стійкості схилу за допомогою програмних комплексів «ЛІРА-САПР 2017» і «ОТКОС» дає відповідь на питання достовірності отриманих результатів розрахунку.

*Ключові слова:* ґрунтоцементна паля; зсув; протизсувна підпірна конструкція; зсувонебезпечний схил; порівняльний аналіз

В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup>, А. Л. ТЮТЬКИН<sup>2\*</sup>, Д. Ю. ИГНАТЕНКО<sup>3</sup>, В. В. КОВАЛЬЧУК<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра «Мости и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академии В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, эл. почта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

<sup>2</sup> Кафедра «Мости и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академии В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, эл. почта alexeyutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3</sup> Кафедра «Мости и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академии В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (097) 442 36 63, эл. почта undulula@gmail.com, ORCID 0000-0001-6805-6703

<sup>4</sup> ЧПКП «Технотранспроєкт», ул. Криворожская, 72, Днепр, Украина, 49000, тел. +38 (067) 566 09 15, эл. почта mostk@ukr.net

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ОПОЛЗНЕОПАСНОГО УЧАСТКА СКЛОНА В ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСАХ «ОТКОС» И «ЛИРА-САПР 2017»

**Цель.** Анализ и сравнение результатов расчета конечно-элементной модели оползнеопасного склона в программном комплексе «ЛИРА-САПР 2017» с расчетом устойчивости склона в программном комплексе «ОТКОС» позволяют определить точность полученных результатов расчета устойчивости и определить наиболее благоприятные условия для развития сдвига, а также параметры наиболее опасной поверхности скольжения для дальнейшего расчета противооползневых подпорных конструкций. **Методика.** Анализ геоморфологических данных, полученных по результатам проведенных лабораторных исследований почв участка, рассматриваемого склона. Создание объемной конечно-элементной модели склона, согласно построенных разрезов и глубин залегания слоев грунта. Расчет нелинейной задачи конечно-элементного моделирования склона в программном комплексе «ЛИРА-САПР 2017». Создание и расчет задачи устойчивости оползнеопасных склонов в программном комплексе «ОТКОС». Сравнение полученных результатов напряженно-деформированного состояния склона и определение отклонений в расчетах по кривым скольжения. **Результаты.** Получены результаты расчета конечно-элементной модели оползнеопасного склона в программном комплексе «ЛИРА-САПР 2017». Получены результаты расчета устойчивости оползнеопасного участка склона в программном комплексе «ОТКОС». Проведен анализ полученных результатов исследования поверхностей скольжения. Выполнен расчет укрепления оползнеопасного участка склона с помощью грунтоцементных свайных подпорных конструкций, расположенных под прямым углом относительно направления смещения. **Научная новизна.** Несмотря на наличие множества разнообразных методов исследования поверхностей скольжения оползней, невозможно определить точно по какому именно сценарию будет развиваться сдвиг, используя лишь один из методов расчета. Прежде всего, это связано с достаточно высокой вариативностью исходных данных задачи, которые в свою очередь зависят от условий среды и допущений, а также от внешних факторов, которые невозможно учесть точно. Следующей задачей является выполнение расчета укрепления оползнеопасных склонов грунтоцементными сваями. **Практическая значимость.** Известно, что грунтоцементные сваи целесообразно применять как защитный элемент, который достаточно хорошо взаимодействует с грунтовой средой, благодаря своей структуре исходного материала. Сравнительный анализ результатов расчета устойчивости склона с помощью программных комплексов «ЛИРА-САПР 2017» и «ОТКОС» дает ответ на вопрос достоверности полученных результатов расчета.

**Ключевые слова:** грунтоцементная свая; сдвиг; противооползневая подпорная конструкция; оползнеопасный склон; сравнительный анализ

### REFERENCES

1. DBN V.1.1-24:2009. *Inzhenernyj zakhyst terytorij, budynkiv i sporud vid zsuviv ta obvaliv. Osnovni polozhennja* [Engineering protection of lands, buildings and structures from landslides and landslides. Substantive provision]. Kyjiv, Derzhstandart Ukrainy Publ., 2010. 69 p.
2. Ginzburg L. K. *Protivoopolznevyje sooruzhenija: monografija* [Anti-landslide structures: monograph]. Dnepropetrovsk, Lira LTD Publ., 2007. 188 p.
3. Kovrov O. S. *Ocinka vplyvu ghidrogheologichnykh kharakterystyk gruntiv na stijkistj pryrodnykh skhyliv dlja proghnozu zsuviv* [Estimation of the influence of soil hydrogeological characteristics on the stability of natural slopes for prediction of landslides]. *Ekologhichna bezpeka. Ocinka ta proghnozuvannja tekhnoghennogho vplyvu na dovkilja – Estimation of the influence of soil hydrogeological characteristics on the stability of natural slopes for prediction of landslides*. Dntpropetrovsjk, Nacionalnyj ghirnychyj universytet, 2013. pp. 72-76.
4. Kovrov A. S. *Geomehaničeskoe obosnovanie parametrov ustojčivyh otkosov kar'erov v slozhnostrukturnom massive mjagkih porod* [Geomechanical substantiation of parameters of stable slopes of quarries in a complex structural array of soft rocks]. Diss. kand. tehn. Nauk, 05.15.09, Kovrov Aleksandr Stanislavovich. Dnepropetrovsk, 2011. 175 p.
5. Strokova L. A. *Opredelenie parametrov dlja čislennogo modelirovanija povedenija gruntov* [Determination of parameters for numerical modeling of soil behavior]. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta*. Tomsk, TPU Publ., 2008. №1. pp. 69-74.
6. Kirijak K. K. *Obgruntuvannja tekhnologhichnykh parametriv in'jekcijnogho zakriplennja zsuvenebezpečnykh grun-tovykh struktur* [Substantiation of technological parameters of injectable fastening of landslide soils]



## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- structures]. Avtoref. dys. kand. tekhn. nauk, 05.15.09, Kirijak K. K. Dnipropetr. nac. ghirn. un-t. Dnipropetrovsjk, 2013. 17 p.
7. Griffiths D. V. and P. A. Lane. Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, 1999. Vol. 49, № 3, pp. 387-403.
  8. Dorfman A. G., Turovskaja A. Ja. Issledovanie ustojchivosti sklonov [The study of the stability of the slopes]. *Voprosy geotekhniki. Mezhvuz. sb. nauchn. trudov. Dnepropetrovsk*, 1975. № 24. pp. 132-156.
  9. Opolzni. Issledovanie i ukreplenie [Landslides. Research and strengthening]. Pod red. Shustera R. i Krizeka R. Moscow, Mir Publ., 1981. 368 p.
  10. Kovrov O. S. Ocinka vplyvu ghidrologichnykh kharakterystyk gruntiv na stijkestj pryrodnykh skhyliv dlja pronozu zsuviv [Estimation of the influence of soil hydrological characteristics on the stability of natural slopes for slipping]. *Ekologichna bezpeka. – Ecological safety*. № 1/2003 (15). pp. 72-76.
  11. Fedorovskij V. G., Kurillo S. V. Metod rascheta ustojchivosti otkosov i sklonov [Method for calculating the stability of slopes and slopes]. Moscow, Geojekologija Publ., 1997. № 6. pp. 95-106.
  12. Petrenko V. D., Sviatko I. O., Yampolsky D. O. The application of injection - grouting for strengthening of the weak subgrade foundations. *Stroitel'stvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Serija: Innovacionnye tehnologii zhiznennogo cikla ob'ektov zhilishhno-grazhdanskogo, promyshlennogo i transportnogo naznachenija*. 2014. issue 77. pp. 144-147.
  13. Petrenko V. D., Tjutjkin O. L., Dubinchuk O. I., V. R. Kiljdjejev Ocinka stijkesti pryrodnykh skhyliv metodamy matematychnogho modeljuvannja v proghrami «OTKOS» [Estimation of stability of natural slopes by methods of mathematical modeling in the program "OTKOS"]. *Mosty ta tuneli : teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels : theory, research, practice*, 2015, issue 8, pp. 23-32.
  14. Petrenko V. D., Tiutkin O. L., Sviatko I. O. Estimation of Subgrade Strengthening Influence Using Soilcement Elements. Science and progress of transport. *Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan*, 2016, № 4, pp. 161-168.
  15. Albataineh N. Slope stability analysis using 2D and 3D methods. Ohio, United States, The university of Akron, 2006. 126 p.

Received: Oct. 17, 2018.

Accepted: Nov. 26, 2018.