

## АНОТАЦІЯ

Раздуй Р.В. Напружено-деформований стан системи «грунтоцементна основа – фундамент – будівля». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 05.23.02 «Основи і фундаменти» (192 – Будівництво та цивільна інженерія). – Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, 2023.

Зміст дисертації. У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета та задачі дослідження, наукова новизна і практичне значення роботи, представлена її загальна характеристика.

У розділі 1 проаналізовано геотехнічний досвід використання грунтоцементу, передусім, проблематика проектування та експлуатації фундаментів будівель і споруд на армованих грунтоцементом слабких основах, особливості методів їх покращення, методи та результати лабораторних досліджень у світовій практиці. Розглянуто недоліки та переваги нормативних методів розрахунку деформацій системи «грунтоцементна основа – фундамент – споруда». Узагальнено плюси та мінуси різних типів чисельних методів оцінювання напружено-деформованого стану (НДС) цієї системи, програмні розрахункові комплекси, котрі використовують у геотехніці, моделі задання поведінки ґрунту та елементів армування. Доведено, що методи, реалізовані в діючих на даний момент нормативних документах, не повною мірою враховують технологічні особливості виготовлення грунтоцементних елементів (ГЦЕ), їх взаємодію між собою у групі та із навколишнім ґрунтом. Методи, реалізовані в програмних комплексах для оцінювання цієї системи при використанні ГЦЕ, більш точні й достовірні, але без достатньої бази отриманих даних порівнянь натурних спостережень та аналітичних досліджень. В кінці розділу подано структурну схему досліджень, викладених у дисертації.

У розділі 2 описано результати лоткових досліджень армованих

вертикальними ГЦЕ основ під жорстким стрічковим штампом. Випробування виконано за планом одночинникового експерименту з варіюванням відсотку вертикального армування ґрунтової основи 0,0%; 2,1%; 4,4% та 7,1% при діаметрі поперечного перерізу елементу 5 мм і щільності скелета ґрунту  $\rho_d = 1,45 \text{ г/см}^3$ . Наведено методику лоткового експерименту, зокрема, описано методику приготування ґрунтової пасти, характеристики лотку та вантажної системи, представлено обладнання, технологію і виконання армування основи. Викладено графіки статичних штампових випробувань при усіх відсотках армування основи, із розвитком осідань у часі та з впливом розвантаження. Показано фото системи «слабка штучна основа, посилена вертикальними ГЦЕ – жорсткий стрічковий штамп» до, під час і після проведення досліду. Проаналізовано графіки залежності осідань основи штампу від тиску на неї. Встановлено, що при заданих параметрах ґрунтової основи та висоти армування величини першого та другого критичних тисків системи «армувана основа – жорсткий штамп» зростають залежно від відсотка за лінійною залежністю. Апроксимовано емпіричні залежності значень першого та другого критичних тисків на основу в залежності від відсотку її армування.

У розділі 3 всебічно показано серію циклів геодезичних натурних спостережень за багатопверховими цегляними будівлями зі стрічковими фундаментами на армованих ГЦЕ основах. Зокрема, описано інженерно-геологічні умови ділянок, конструктивно-технологічні рішення основ і фундаментів будівлі, її надземної частини. Наведені фото процесу армування основи ГЦЕ, виготовленими за бурозмішувальною технологією, влаштування буферної подушки, стрічкових монолітних фундаментів тощо. Показано встановлені осадкові стінові марки. Описано принципи влаштування та розміщення осадкових марок, зв'язкових точок, тощо. Представлено схему геометричного нівелювання з розміщенням марок. Отримано нові дослідні дані розвитку фактичних деформацій слабких глинистих основ армованих вертикальними ГЦЕ у часі. За результатами геодезичних натурних спостережень приведено наочні графіки розвитку мінімальних, максимальних і

середніх осідань деформаційних марок у часі, суміщені з графіками зведення та експлуатації будівлі. Наведено кінцеві величини стабілізованих абсолютних і відносних осідань, епюри осідань марок. Проаналізовано отримані результати осідань, частку величини осідань за періоди зведення, монтажу, заселення та експлуатації. Підтверджено ефективність використання ґрунтоцементу за умов ґрунтів з високим вмістом органічних речовин.

У пункті 4.1 наведено тестове моделювання лоткових досліджень методом скінченних елементів (МСЕ). Проведено моделювання МСЕ у просторовій (3D) постановці з використанням ідеальної пружно-пластичної моделі ґрунту з критерієм міцності Мора-Кулона та моделі ізотропного ущільнення ґрунту. Описано можливі типи моделей поведінки ґрунту. Проведено моделювання основ без армування ІЦЕ та при різному відсотку армування з глибиною елементів 100 мм при діаметрі елементів 6 мм із варіюванням значення відсотка армування. Виконано два варіанти розрахунку, базуючись на методі задання ґрунтоцементних елементів: перший – з моделюванням об'ємними елементами та постадійним заданням виймання ґрунту, заповнення свердловин ґрунтоцементом, влаштування подушки, штампу й поступовим навантаження; другий – з моделюванням пальовими елементами із постадійним заданням стадій улаштування паль і прикладення навантаження. Описано прийняті процедури та параметри задання сітки скінченних елементів і розрахунку. Отримано залежності осідань основи штампа від тиску на основу за різними моделями поведінки ґрунту та ґрунтоцементних елементів. Наведено графіки осідань за обома розрахунковими моделями (тобто, за обома варіантами задання ІЦЕ) для неармованої основи штампа та варіативних параметрів армованої основи. Приведено величини першого та другого критичних тисків на основу. Наведено графіки осідань від тиску, перерізи із візуалізацією деформацій основи.

У пункті 4.2 наведено вихідні дані та методики моделювання НДС системи «будівля – стрічковий фундамент – слабка основа, підсилена ґрунтоцементними елементами» із заданням коефіцієнтів жорсткості основи.

Складено та візуалізовано просторові схеми конструкцій системи. Наведено алгоритм визначення коефіцієнтів жорсткості основи, коефіцієнтів жорсткості елементів армування. Отримано нові дослідні дані про зміну НДС системи. Моделюванням МСЕ у 3D постановці з використанням пружно-пластичної моделі ґрунту Мора-Кулона досліджено розвиток деформацій у разі зведення будівлі на природній основі, за наявності шарів слабких глинистих ґрунтів і порівняно з моделюванням основи, армованої вертикальними ГЦЕ.

Виявлено, що модель поведінки ґрунту ізотропного ущільнення (зміцнення) показує доволі точне співпадіння графіків осідання від тиску, як для моделювання об'ємними елементами, так і для пальовими елементами, тоді як ідеально пружно-пластична модель ґрунту Мора-Кулона завищує осідання, а моделювання елементів армування об'ємними тілами коректніше описує розподіл осідань ґрунту в масиві, як в пружній, так і в пластичній стадії роботи ґрунту. Після переходу із пружної до пластичної поведінки ґрунту моделювання пальовими елементами завищує несучу здатність основи при застосуванні ГЦЕ, а використання моделі Мора-Кулона не дає різниці для пружної частини графіку при застосуванні різних процентів армування.

У розділі 5 проведено порівняльний аналіз аналітичних і чисельних методів визначення осідань основи. Наведено наочні порівняльні графіки. Наведено в табличній та графічній формах дані відповідно до розміщення осадних марок посекційно згідно до результатів аналітичних обчислень, чисельного моделювання та геодезичних спостережень. Подано дані щодо впровадження результатів роботи. Визначено найбільш точні методи обчислення осідань системи «ґрунтоцементна основа – фундамент – будівля», найбільш оптимальні способи задання вертикальних ГЦЕ.

Ключові слова: вертикальне армування основи, бурозмішувальний метод, вертикальний ґрунтоцементний елемент, відсоток армування основи, довготривалі геодезичні спостереження, ґрунтоцементна основа, лоткове дослідження, метод скінченних елементів, осідання, слабка основа, стрічкові фундаменти, чисельне моделювання, напружено-деформований стан.

## ABSTRACT

Razdui R.V. Stress-strain state of the system "soil-cement soil base – foundation – building". – Qualifying scientific work as manuscript.

The thesis for the degree of philosophy doctor on specialty 05.23.02 «Bases and Foundations» (192 – Construction and civil engineering). – National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, 2023.

The content of the thesis. In the introduction the urgency of the topic, the purpose and objectives of research, scientific novelty and practical value of work are grounded, its general characterization is represented.

Chapter 1 presents the analysis of geotechnical experience in the use of soil cement, especially, the problems of designing and exploitation of foundations of buildings on weak soil bases that reinforced with soil cement, the features of their improvement methods, methodology and results of laboratory researches in world practice. Disadvantages and advantages of the regulatory methods for calculating of deformations of the system "soil cement base – foundation – construction" are considered. The pros and cons of various types of numerical methods for assessing the stress-strain state (SSS) of this system, software calculation complexes used in geotechnics, models of soil behavior and reinforcement elements are summarized. It has been proven that the methods implemented in the current regulatory documents do not fully take into account the technological features of the production of soil-cement elements (SCE), their interaction with each other in the group and with the surrounding soil. The methods implemented in the software complexes for evaluating this system when using SCE are more accurate and reliable but without a sufficient base of the obtained data comparisons of field observations and analytical studies. At the end of the chapter, a structural diagram of the research presented in the dissertation is given.

Chapter 2 describes the tray experiment of reinforced soil bases under a rigid strip stamp. The test was carried out according to the plan of a one-factor experiment with a variation of the vertical reinforcement ratio of the soil base of 0.0%; 2.1%;

4.4% and 7.1% when the distance between the axes of the SCE is from 15.5 mm (7.1%) to 33.6 mm (2.1%), the cross-sectional diameter of the element is 5 mm and the density of the soil skeleton  $\rho_d = 1.45 \text{ g/cm}^3$ . The method of the tray experiment is given, in particular, the method of preparing soil paste, the characteristics of the tray and the loading system are described, the equipment, technology and performance of soil base reinforcement are presented. Graphs of static tests at all reinforcement ratios of soil base reinforcement, including the development of settlements in time and the effect of unloading, are outlined. Photos of the "weak artificial soil base reinforced with vertical SCE – rigid strip stamp" system are shown before, during and after the experiment. Graphs of the dependence of the settlements of the soil base under the stamp on the pressure were analyzed. It was established that with the specified parameters of the soil base and the height of the reinforcement, the values of the first and second critical pressures of the "reinforced soil base – rigid stamp" system increase depending on the percentage according to the linear graph. Empirical dependences of the values of the first and second critical pressures on the base depending on the percentage of its reinforcement are approximated.

Chapter 3 comprehensively shows a series of cycles of field geodetic observations of multi-story brick buildings with strip foundations on SCE reinforced bases. In particular, the engineering and geological conditions of the sites, constructive solutions of the soil bases and foundations of the building and its above-ground part are described. Photos of the process of reinforcing the base with SCE made by drilling-mixing technology and the arrangement of the buffer cushion strip monolithic foundations etc. are given. The established deformational marks are shown. The principles of arrangement and placement of marks, connecting points are described. The scheme of geometric leveling with placement of marks is presented. New research data on the development of actual deformations of weak clay soil bases reinforced with vertical SCE over time have been obtained. According to the results of field geodetic observations, visual graphs of the development of minimum, maximum and average settlements of deformational marks in time are given, combined with the graphs of construction and exploitation of the building. The final

values of stabilized absolute and relative settlements, epuras of deformational marks are given. The obtained results of settlements, the proportion of the amount of settlement during the periods of construction, installation, occupancy and exploitation were analyzed. The effectiveness of the use of soil cement under the conditions of soils with a high content of organic substances has been confirmed.

Chapter 4.1 provides a test modelling of tray experiment with usage of the finite element method (FEM). The FEM simulation in a spatial (3D) setting was carried out using an ideal elastic-plastic soil model with the Coulomb-Mohr strength criterion and a model of isotropic soil compaction (Hardening soil model). Possible types of soil behavior models are described. Modeling of bases without SCE reinforcement and with different reinforcement ratios with a depth of elements of 100 mm and a diameter of elements of 6 mm with variation of the value of the reinforcement ratio was carried out.

Two calculation options were performed, based on the method of setting soil-cement elements: the first – with modeling by volumetric elements and a step-by-step assignment of soil extraction, filling of wells with soil cement, installation of a pillow, stamp and gradual loading; the second – with pile elements (as embedded beam) modeling with step-by-step setting of stages of pile installation and load application. The accepted procedures and parameters of setting the finite element mesh and calculation are described. The dependences of the settlements of the soil base of the stamp on the pressure on the base were obtained according to various models of the behavior of the soil and soil-cement elements. The graphs of settlements according to both calculation models (according to both variants of the SCE modeling) for the non-reinforced base of the stamp and variable parameters of the reinforced soil base are given. Values of the first and second critical pressures on the base are given. Graphs of settlements due to pressure, cross-sections with visualization of the settlements of the base are given.

Chapter 4.2 gives the initial data and methods of SSS modeling of the system "building - strip foundation - weak base, reinforced with soil-cement elements" with the setting of base stiffness coefficients. Compiled and visualized spatial schemes of

system structures. The algorithm for determining the stiffness coefficients of the base and the stiffness coefficients of the reinforcement elements are given. New research data on changes in the SSS of the system have been received. The development of deformations in the case of construction a building on a natural foundation, in the presence of layers of weak clay soils, and in comparison with the modeling of a foundation reinforced with vertical SCE was investigated by the FEM modeling in a 3D setting using the Mohr-Coulomb elastic-plastic soil model.

In Chapter 5, a comparative analysis of analytical and numerical methods for determining base settlement is carried out. Visual comparative graphs are provided. The data are presented in tabular and graphic forms according to the placement of deformational marks section by section according to the results of analytical calculations, numerical modeling and geodetic observations. Data on the implementation of work results is provided. The most accurate methods of calculating the settlement of the system "soil-cement base – foundation – building", the most optimal methods of specifying the SCE have been determined.

It was found that the soil behavior hardening soil model shows a fairly accurate coincidence of the settlement-pressure graphs, both for modeling with volumetric elements and for pile elements, while the elastic-plastic model of the Coulomb-Mohr soil overestimates the settlement, and the simulation of reinforcement elements with volumetric bodies more correctly describes the distribution of soil settlements in the massif, both in the elastic and in the plastic stage of soil work. After the transition from elastic to plastic phase of the soil behavior, modeling with pile elements overestimates the bearing capacity of the vertical SCE reinforced soil base and the use of the Coulomb-Mohr model does not give a difference for the elastic part of the graph when using different percentages of reinforcement.

Key words: vertical soil base reinforcement, drilling-mixing method, vertical soil-cement element, reinforcement ratio, long-term geodetic observations, soil-cement soil base, tray experiment, finite element method, settlements, weak soil base, strip foundations, numerical simulation, stress-strain state.



## ГОЛОВНІ ДРУКОВАНІ ПРАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Винников Ю.Л., Гранько О.В., Раздуй Р.В., Суходуб О.В. Результати оцінювання технічного стану надбудованих будівель на фундаментах, які влаштовані без виймання ґрунту. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. № 53. Одеса : Зовнішрекламсервіс, 2014. С. 67–72.
2. Vynnykov Y.L., Miroshnychenko I.V., Razduy R.V., Zotsenko V.L. The simulation of deformed state system «reinforced base – strip foundations». *Energy, energy saving and rational nature use : coll. of scient. art.* №2 (3). 2014. Radom : Kazimierz Pułaski University, 2014. P. 74–80.  
<http://reposit.nupp.edu.ua/handle/PolNTU/13943>
3. Vynnykov Yu., Aniskin A., Razdui R. Tray research of the strain state of soil bases reinforced by soil-cement elements under the strip stamp. *Academic Journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. Poltava : National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, 2019. №53. P. 90–97. **Фахова**.  
<https://doi.org/10.26906/znp.2019.53.1898>
4. Зоценко М.Л., Винников Ю.Л., Раздуй Р.В. Осідання у часі будівель і споруд на армованих ґрунтоцементними елементами основах. *Збірник наукових праць за матеріалами III Міжнародної азербайджансько-української науково-практичної конференції «Building Innovations – 2020»* (Баку, Полтава, 1–2 червня, 2020). Полтава : НУПП ім. Юрія Кондратюка, 2020. С. 103–105.
5. Раздуй Р.В., Винников Ю.Л. Порівняння результатів лоткових досліджень деформованого стану армованих ґрунтоцементними елементами основ під жорстким стрічковим штампом та їх моделювання у 2D версії ПК PLAXIS. *Восьма ювілейна міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих учених, присвячена 20-річчю ради молодих вчених Дніпропетровської області «Молодь: наука та інновації 2020»* (Дніпро, 26–27 листопада, 2020). Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2020.
6. Раздуй Р.В. Результати моделювання лоткових досліджень деформованого стану основ, армованих ґрунтоцементними елементами. *Тези*

73-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, 21 квітня – 13 травня, 2021). Том 1. Полтава : НУПП ім. Юрія Кондратюка, 2021. С. 308–311.

7. Винников Ю.Л., Раздуй Р.В. Сумісний розрахунок системи «Будівля – стрічковий фундамент – слабка основа, підсилена ґрунтоцементними елементами армування». *Збірник наукових праць за матеріалами XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Академічна й університетська наука: результати та перспективи»* (Полтава, Чернігів, 9 грудня, 2021). Полтава : НУПП ім. Юрія Кондратюка, 2021. С. 305–310.

8. Vynnykov Yu., Razdui R. The results of modeling the strain state of soil base reinforced by soil-cement elements under strip foundations of the building. *Academic Journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. Poltava : National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, 2021. №57. P. 74–81. **Фахова.** <https://doi.org/10.26906/znp.2021.57.2588>

9. Раздуй Р.В. До розрахунку осідань будівель на ґрунтоцементних основах. *Тези 74-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»* (Полтава, 25 квітня – 20 травня, 2022). Том 1. Полтава : НУПП ім. Юрія Кондратюка, 2022. С. 164–166.

10. Винников Ю.Л., Раздуй Р.В., Аніскін А. Аналіз методів розрахунку осідань ґрунтоцементних основ на прикладі лоткового експерименту. *Збірник наукових праць за матеріалами XIV Міжнародної науково-технічної конференції «Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного стану»* (Полтава, 20–22 червня, 2022). Полтава : НУПП ім. Юрія Кондратюка, 2022. С. 135–138.

11. Vynnykov Yu., Razdui R. Comparative analysis of calculation models of soil behavior on the example of the tray experiment`s modeling. *Academic Journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. Poltava : National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, 2022. №58. P. 66–73. **Фахова.**

<https://doi.org/10.26906/znp.2022.58.3081>

12. Vynnykov Yu., Razdui R., Onyshchenko V., Aniskin A. Settlements of Buildings on Soil–Cement Base. Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Vol. 299. P. 321–333. **Scopus**.

[https://doi.org/10.1007/978-3-031-17385-1\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-031-17385-1_26).

13. Раздуй Р.В., Винников Ю.Л. Достовірність моделювання системи «природний масив ґрунту – ґрунтоцементна основа – стрічковий фундамент – цегляна будівля». 82-а міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпро, 20–21 квітня, 2023). Дніпро : УДУНТ, 2023. С. 367–369.

14. Раздуй Р.В., Винников Ю.Л. До вибору моделей поведінки ґрунту при армуванні основи вертикальними ґрунтоцементними елементами. 16-а міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, аспірантів і студентів «Перспективи розвитку будівельних технологій» (Дніпро, 28 квітня, 2023). Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2023. С. 6–10.

15. Раздуй Р.В. Порівняння методик та моделей розрахунку осідань основ, покращених ґрунтоцементом. Тези 75-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, 2–25 травня, 2023). Том 1. Полтава : НУПП ім. Юрія Кондратюка, 2023. С. 170–171.

16. Винников Ю.Л., Раздуй Р.В. Порівняння осідань ґрунтоцементних основ будівель, визначених аналітично та тривалими геодезичними спостереженнями *Problems of Emergency Situations: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції* (Харків, 18 травня, 2023). Харків : Національний університет цивільного захисту України, 2023. С. 26–27.

17. Раздуй Р.В., Винников Ю.Л. Результати комплексних досліджень армованих ґрунтоцементними елементами основ, виготовлених за бурозмішувальною технологією. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. № 23. Дніпро : УДУНТ, 2023. С. 66–78. **Фахова**.

<https://doi.org/10.15802/bttrp2023/281152>.

18. Vynnykov Y., Razdui R. Comparison of settlements of buildings on soil-cement soil bases determined analytically and by long-term geodetic observations.

*Construction Technologies and Architecture*. 2023. Vol. 9. P. 39–47.

<https://doi.org/10.4028/p-x7fhpi>