

**А. С. Моргун**  
**І. М. Меть**  
**А. Р. Козуб**

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗА МГЕ ПРОЦЕСУ ПІДСИЛЕННЯ ФУНДАМЕНТІВ**

Вінницький національний технічний університет

*З урахуванням наявності слабких ґрунтів на території України в ґрунтових основах виникають додаткові вертикальні деформації, пов'язані з руйнуванням їх структури. Водонасичення таких ґрунтів призводить до зміни НДС і впливає на умови надійної експлуатації будівельних об'єктів. В зв'язку з цим виникає необхідність підсилення фундаментів цих будівельних об'єктів, поліпшення несучої спроможності цих фундаментів. Тому на практиці весь час відбувається пошук нових способів підсилення фундаментів, поліпшення їх несучої спроможності.*

*В складних інженерно-геологічних умовах погіршення фізико-механічних властивостей ґрунту веде до підвищення деформацій та зменшення несучої спроможності фундаментів. Підсилення фундаментів виникають також при потребі надбудов.*

*В роботі за числовим методом граничних елементів спрогнозовано поведінку під навантаженням підсиленого доволі відомим способом (рис. 1) фундаменту мілкого закладання на натуральній основі нахиленими перехресними палями.*

*Підсилення фундаментних конструкцій потребує визначення їх несучої спроможності та напружено-деформованого стану (НДС) після проведеної реконструкції.*

*Нормативне проектування основ, виходячи з осідань і кренів, гранично допустимих з точки зору експлуатаційної придатності та надійності споруд, висуває підвищені вимоги до точності розрахунку переміщень фундаментів.*

*Складність властивостей ґрунту та множина факторів, що впливає на їх механічну поведінку, довго були бар'єром, перед якими були безсилі математичні методи механіки суцільних середовищ.*

*Поява сучасних ЕОМ дозволила алгебраїзувати математичну формулювання більшості задач механіки ґрунтів, які потребують врахування великої кількості нелінійних визначальних факторів та перейти до пружно-пластичних моделей. Використання числового експерименту як ніколи раніше тісно пов'язало фізичний зміст задачі, її математичну формулювання, числові методи розрахунку та ЕОМ.*

*В роботі для побудови прогнозу несучої спроможності підсиленого фундаменту використано пружно-пластичну модель дискретного середовища ґрунту та числовий МГЕ.*

**Ключові слова:** підсилення фундаментів, напружено-деформований стан, несуча спроможність, числовий метод граничних елементів.

### **Вступ**

На теперішній час в області будівництва досягнені значні успіхи – створено нові види пальових фундаментів, методи їх проектування, напрацьовано випуск машин та механізмів по їх улаштуванню, удосконалюється технологія виробництва робіт.

Особлива увага приділяється вибору економічних варіантів проектів розрахунково-організаційних, технологічних робіт при реконструкції діючих об'єктів. Не дивлячись на наявні в цій області досягнення будівництво фундаментів залишається трудоміським і дорогим. Недосконалими залишаються розрахунки по підсиленню фундаментів і основ під них при реконструкції промислових і цивільних споруд.

Реконструкція грає визначальну роль в технічному переоснащенні будівельних конструкцій. При здійсненні технічного переобладнання споруд збільшуються навантаження на фундаменти і основи. Характерною особливістю процесу реконструкції і підсилення фундаментів є необхідність його проведення в стиснених умовах, що потребує спеціальних механізмів, технологій та організації робіт, що веде до високої трудомісткості робіт і зростання кошторисної вартості.

В роботі напрацьовано методіку визначення несучої спроможності підсиленних фундаментів мілкого закладання заглибленням за допомогою пневмопробійників під фундамент горизонтальних паль (рис. 1) [3].

Цей метод зарекомендував себе як надійний, доступний для широкого застосування, економічний. Область його застосування відноситься до всіх слабких ґрунтових основ. В той же час такий варіант підсилення вимагає вдосконалення методів його розрахунку. Використання пневмопробійників суттєво скорочує об'єми земляних робіт.

Невеликі габарити і мала маса пневмопробійників дозволяє влаштувати палі всередині будівлі в приміщеннях висотою до 2 м. поряд із стінами, забивати труби  $d=150-325$  мм, внутрішній простір яких заливається бетонною сумішшю.

Експериментальні дослідження фундаментів мілкового закладання розміром в плані 1\* 1 м. і глибиною закладання 0.5 м. , підсилених п'ятьма горизонтальними трубами діаметром 0.168 м довжиною 3.5 м. проведено [3] в твердих та напівтвердих суглинках і супісках з коефіцієнтом пористості  $e=0.9$ , вологістю  $W=0.11-0.22$ .

Фундаменти спочатку були досліджені а потім підсилені перехрестними трубами. В результаті цього підсилення несуча спроможність фундаментів мілкового закладання піднялась більше ніж в три рази, рис. 1 [3].

Використання пневмопробійників для улаштування паль в стиснених умовах відкриває широкі перспективи для розробки і впровадження різних способів підсилення фундаментів неглибокого залягання.

Технічні можливості пневмопробійників дозволяють заглиблювати нахилені (рис.1) і горизонтальні палі, використання яких для підсилення фундаментів суттєво скорочує об'єми земляних робіт. Та будівництво вимагає від інженера-будівельника надійних та достовірних методів розрахунку фундаментних конструкцій і виникає потреба напрацювання методики визначення несучої спроможності підсиленних фундаментів.

Дослідження несучої спроможності фундаментів, підсиленних нахиленими палями-трубами, були виконані [3] в котловані, засипаному місцевим ґрунтом з пошаровим ущільненням. На насипний ґрунт були встановлені збірні залізобетонні фундаменти розміром 1\*1 м і глибиною закладання 0.5 м та проведено дослідження їх роботи під навантаженням до осідання 40 мм, рис.1, крива 1.

Два фундамента було підсилено шляхом забивання під них п'яти нахилених паль-труб (2 і 3 з двох протилежних сторін) діаметром 168 мм з закритим кінцем, порожнечі яких після заглиблення були заповнені бетоном. Довжина кожної палі підсилення 3.5 м. Результати експериментальних досліджень подано на рис. 1, крива 2. Польові дослідження [3] зафіксували різке збільшення граничного опору фундаментів (> ніж в 3 рази).

Підсилення фундаменту перехрестними палями (рис.1) сприяє зниженню сил навантажуючого тертя, що діють на фундамент.

Оскільки палі підсилення працюють боковою поверхнею та вістрям, для моделювання за числовим МГЕ роботи такого підсиленого фундаменту його розміри були збільшені на еквівалентну величину сумарних значень бокової поверхні та вістря нахилених паль-труб підсилення (рис. 3).

### Методика та результати досліджень

Для визначення несучої спроможності підсиленого фундаменту використано пружньо-пластичну модель дисперсних середовищ, яка забезпечує достатню відповідність між результатами розрахунку і дійсністю. Модель пояснює фізичні причини фактів, які спостерігаються в ґрунтах при навантаженні, адже 97% деформацій в ґрунтах – нелінійні.

Поведінка ґрунту під навантаженням в роботі описувалась інтегральним рівнянням, отриманим К. Бреббія [1], яке являє собою інтегральний синтез рівнянь рівноваги, геометричних та фізичних :

$$c_{ij}u_j + \int_{\Gamma} q^*_{ij}u_{ij}d\Gamma = \int_{\Gamma} u^*_{ij}q_{ij}d\Gamma + \int_{\Omega} \sigma^* \varepsilon^p_{jk}d\Omega \quad (1)$$

де  $u, q$  – шукані вектори переміщень та напружень на границі фундаментної конструкції; інтеграл по області  $\Omega$  ( $\Omega$  – активна зона навколо фундаментної основи) включає вектор пластичних деформацій  $\varepsilon_p$ ;

$\Gamma$  – границя досліджуваного об'єкта;

$u^*, q^*$  – сингулярні фундаментальні рішення Р. Міндіна, що відповідають одиничним взбуджуючим впливам в півпросторі.

Дискретизація бокової поверхні та вістря проводилась постійними граничними елементами, активна зона ґрунтової основи дискретизувалась трикутними елементами, рис. 2, 3.

Це дало можливість здійснити перехід від функціонального інтегрального співвідношення (1) до його алгебраїчного аналога - системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

Прихід граничного стану (перехід ґрунту в стан пластичної течії) визначався за октаедричною теорією міцності та критерієм текучості Мізера-Шлейхера-Боткіна [2, 5]:

$$\begin{cases} f = T + \sigma_{окт} \cdot tg\psi - \tau_s = 0 & \text{при } \sigma_{окт} \leq p_0 \\ f = T + \rho_0 \cdot tg\psi - \tau_s = 0 & \text{при } \sigma_{окт} > p_0 \end{cases}, \quad (2)$$

де  $f$  – поверхня текучості, вона дає співвідношення між гідростатичним тиском (першим інваріантом тензора швидкостей напружень) та інтенсивністю напружень  $T$  (другим інваріантом девіатора напружень) на октаедричній площині (рівнонахилений до головних осей) та разом з рівняннями рівноваги забезпечує кількість рівнянь і кількість невідомих для замикання розрахункової моделі.

В використанні в роботі пружньо-пластичні моделі на цих потенціальних плоскостях граничної рівноваги повністю мобілізуються сили внутрішнього тертя в ґрунті та ґрунт переходить в пластичний стан роботи.

Виникнення та розвиток дилатансійних зон в ґрунтовій основі, які є головним джерелом дисипації механічної енергії, описувалось неасоційованим законом пластичної течії [5]:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{dF}{d\sigma_{ij}}, \quad F \neq f \quad (3)$$

та дилатансійними співвідношеннями В.М. Ніколаєвського, І.П. Бойка [2, 5, 4]:

$$d\varepsilon_{ij}^e = d\varepsilon_{шарове}^p + d\varepsilon_{девіаторне}^p, \quad d\varepsilon_{шарове}^p = \lambda(x)d\gamma^p \quad (4)$$

де  $d\varepsilon_{ij}^p$  – вектор приросту пластичних деформацій ґрунтової основи,  $d\gamma^p$  – скалярна характеристика формозміни, другий інваріант девіатора деформацій  $I_2(D\varepsilon)$ ;  $\lambda(x)$  – коефіцієнт дилатансії.

$$d\varepsilon_{девіаторне}^p = D_{ij}d\lambda, \quad (5)$$

де  $D_{ij}$  – девіатор напруг;

$d\lambda$  – скалярний коефіцієнт простого навантаження.

В процесі розрахунку компонується матриця впливу МГЕ, яка з точки зору будівельної механіки є матрицею піддатливості ґрунтової основи, а як відомо, матриця, обернена до матриці піддатливості, дає матрицю жорсткості.

Числові дослідження проводились із наступними середньозваженими фізико-механічними властивостями ґрунту :

$$\rho = 1.7 \text{ т/м}^3, \quad \rho_{dry} = 1.49 \text{ т/м}^3, \quad e = 0.84,$$

$$E = 10.54 \text{ МПа}, \quad \varphi = 24^\circ, \quad c = 14 \text{ КПа} \quad \varepsilon_{sw} = 0.08, \quad \nu = 0.33.$$

### Аналіз результатів числових досліджень

На рис. 2 подано дані експериментальних статичних досліджень [3] поведінки під навантаженням пірамідальних паль С5 та С6 та проведено порівняння з ними результатів числових досліджень за МГЕ (рис. 3).

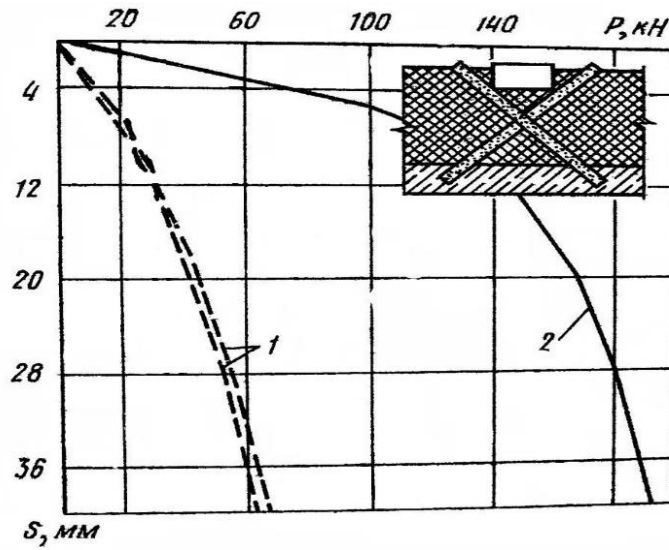


Рисунок 1 – графіки експериментальних досліджень фундаментів [3], встановлених на насипний ґрунт; 2 – після підсилення нахиленими палями - трубами [3]

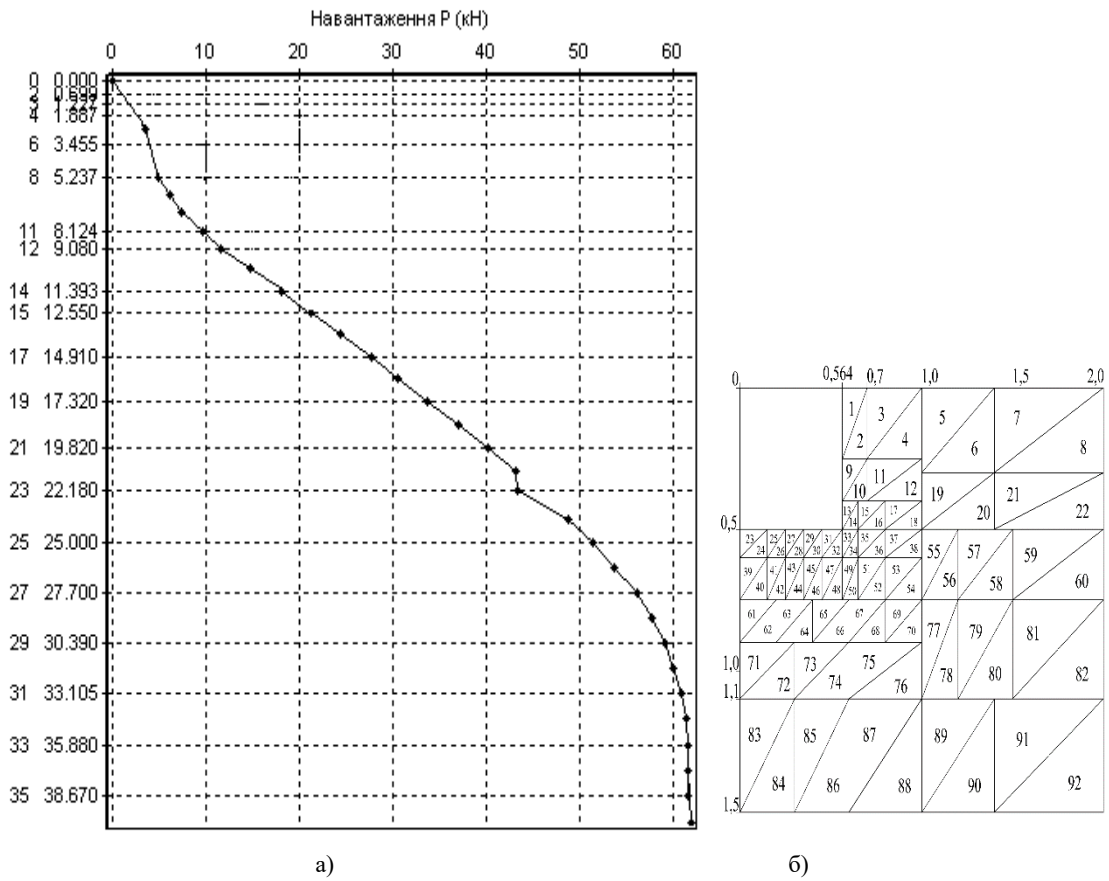
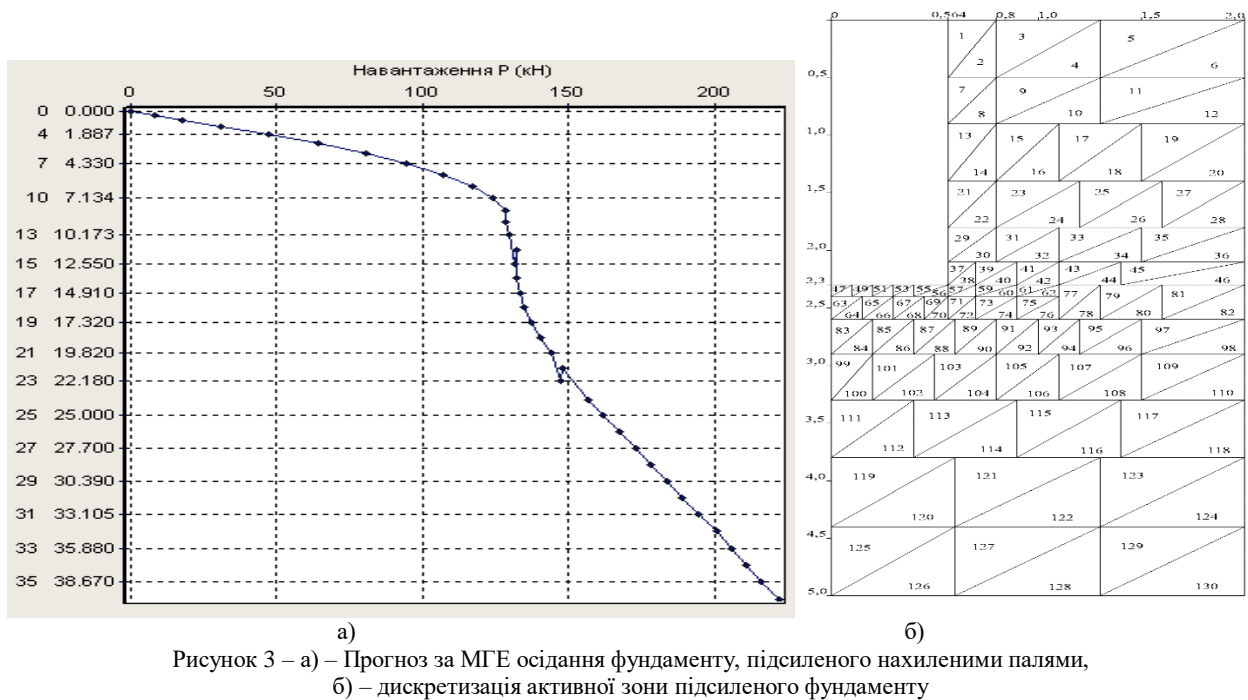


Рисунок 2 – а) –Результати прогнозування поведінки фундаменту за МГЕ без підсилення; б) – дискретизація активної зони фундаменту без підсилення



### Висновки

- Напрацьована за числовим МГЕ нелінійна модель для визначення несучої спроможності підсиленого нахиленими палями фундаменту фіксує збільшення несучої спроможності більше ніж в три рази (в 3.16 рази). Згідно експериментальних даних збільшення несучої спроможності склало 3.24 рази.
- Достовірність моделі підтверджено проведенням аналізом результатів числових досліджень за МГЕ, та виконаним співвідношенням з експериментальними даними, які отримані безпосереднім заміром тиску в ґрунтові основі мездозами [3], та дають хорошу відповідність.
- Дане конструктивне рішення є ефективним проектним рішенням підсилення фундаменту мілкого закладання і гарантує надійність експлуатації споруди.

### ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Бреббиа К., Теллес Ж., Врубел Л. Методы граничных элементов. М.: Мир, 1987.
2. Бойко И.П. Теоретические основы проектирования свайных фундаментов на упругопластическом основании / И.П. Бойко, Сб. КИСИ "Основания и фундаменты". – 1985 – №18, С 11-18.
3. Козаков Ю.Н., Буланкин Н.Ф., Стоян Ю.Ф. Усиление фундаментов сваями, устраиваемыми с помощью пневмопробойников. М.: Стройиздат. Сб. Основания, фундаменты и механика грунтов № 4. 1990, С 26-29.
4. Моргун А.С. Теория пластичной течи в механике грунтов./А.С. Моргун – Винница, ВНТУ. – 2013 – 108 С.
5. Николаевский В.Н. Современные проблемы механики грунтов // Определяющие механики грунтов // В.Н. Николаевский – М.: Стройиздат. 1975 г. – С. 210-227.

### REFERENCES

1. Brebbia K., Telles J., Vrubel L. Methods of boundary elements. M.: Mir, 1987.
2. Boiko IP Theoretical bases of design of pile foundations on the elastic-plastic basis / I.P. Boyko, Sat. KISI "Foundations and Foundations". - 1985 - №18, pp. 11-18.
3. Sorochan EA, Lee EA Study of the work of pyramidal piles in swelling soils. M.: Stroyizdat. Sat. Foundations, foundations and soil mechanics № 2. 1993, pp. 8-11.
4. Morgun AS The theory of plastic flow in soil mechanics. Morgun - Vinnytsia, VNTU. - 2013 - 108 C.
5. Nikolaevsky VN Modern problems of soil mechanics // Determining soil mechanics // VN Nikolaevsky - M.: Stroyizdat. 1975 - P. 210-227.

**Моргун Алла Серафимівна** – професор кафедри будівництва, міського господарства та архітектури; Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: morgunallaS@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-4701-339X>

**Меть Іван Миколайович** – декан ФБТЕГП; Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [vanmet@ukr.net](mailto:vanmet@ukr.net)

**Козуб Андрій Русланович** – студент Вінницького національного технічного університету, Вінниця, e-mail: [Kozub.vntu@gmail.com](mailto:Kozub.vntu@gmail.com).

**A. Morgun  
I. Met  
A. Kozub**

## **MATHEMATICAL MODELING FOR MHE OF THE PROCESS OF STRENGTHENING OF FOUNDATIONS**

Vinnitsia National Technical University

*Taking into account the presence of weak soils on the territory of Ukraine, additional vertical deformations occur in soil foundations, associated with a violation of their structure. Water saturation of such soils leads to a change in VAT and affects the conditions for the reliable operation of construction objects. In this regard, it becomes necessary to strengthen the foundations of these building objects, to improve the bearing capacity of these foundations. Therefore, in practice, the search for new ways to strengthen the foundations, improve their bearing capacity is constantly being carried out. In difficult engineering and geological conditions, the deterioration of the physical and mechanical properties leads to a rise in deformations and a decrease in the bearing capacity of the foundations. Reinforcement of foundations is also necessary when constructing superstructures. In the robot, using the numerical method of boundary elements, the behavior under load of a shallow foundation on a natural basis reinforced with cross piles is predicted. Reinforcement of foundation structures requires determination of their bearing capacity and stress-strain state (SSS) after reconstruction. Normative design of foundations, based on subsidence and rolls, which are borderline permissible from the point of view of the operational suitability and reliability of structures, puts forward increased requirements for the accuracy of calculating the displacements of foundations. The complexity of the properties of soils and the many factors that influence their mechanical behavior have long been a barrier before which the mathematical methods of continuum mechanics were de-strengthened. The emergence of modern ECM allowed algebraicizing the mathematical formulation of most problems in soil mechanics, which require taking into account a large number of nonlinear determining factors and the transition to elastic-plastic models. The use of a numerical experiment, as never before, closely linked the physical meaning of the problem, its mathematical formulation, numerical methods of calculation and the ECM. In the robot, to obtain a forecast of the bearing capacity of a reinforced foundation, an elastic-plastic model of a discrete soil medium and a numerical MGE are used.*

**Key words:** reinforcement of foundations, stress-strain state, bearing capacity, numerical method of boundary elements.

**Morgun Alla** – Professor of the Department of Construction, Municipal Economy and Architecture; Vinnitsia National Technical University, Vinnitsa, e-mail: morgunallaS @ .qmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-4701-339X>

**Met Ivan** – Dean of FBTEGP; Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, e-mail: [vanmet@ukr.net](mailto:vanmet@ukr.net)

**Kozub Andrey** – student of Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, e-mail: Kozub.vntu@gmail.com.