

**А. С. Моргун**  
**І. М. Меть**  
**В. О. Задорожнюк**

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЗА МГЕ НЕСУЧОЇ СПРОМОЖНОСТІ БУРОНАБИВНИХ ПАЛЬ З КАМУФЛЕТНИМ РОЗШИРЕННЯМ**

Вінницький національний технічний університет

*Розвиток будівельної галузі пов'язаний з впровадженням в будівельну практику нових технологій прогностичного розрахунку. Суттєві збільшення ваги сучасних споруд, яке передається на основу, викликає необхідність розвитку нелінійних методів розрахунку буронабивних паль, які в цих умовах є найбільш ефективними видами фундаментних конструкцій.*

*Методи нелінійного аналізу ґрунтової основи, призначені для числової реалізації, знаходять все більше використання в проектній будівельній практиці. З залученням числового методу граничних елементів в роботі запропоновано аналітичний комплексний підхід до оцінки НДС камуфлетної буронабивної палі-колони. Забезпечення надійності роботи фундаментної конструкції є визначальним при практичному проектуванні і вимагає, як експериментального обґрунтування, так і числового моделювання.*

*Ключові слова: камуфлетна буронабивна паля-колонна, числовий метод граничних елементів.*

### **Вступ**

В області будівництва висотних споруд при значних навантаженнях на підшві фундаментів використовують бурові палі з метою зниження деформацій та виконання вимог нормативних документів.

Взаємодія фундаментних конструкцій з оточуючим ґрунтом носить складний просторовий характер і залежить від багаточисленних факторів. На теперішній час вивчено не всі аспекти механізму деформування ґрунтової основи під навантаженням. Розвиток наукових основ розрахунку фундаментних конструкцій при експериментальному обґрунтуванні – актуальний напрям сучасного фундаментобудування.

### **Визначальні співвідношення**

При будівництві промислових споруд в якості фундаментів під колони економічно доцільно використовувати одиночні палі-колони. Це дозволяє виключити земляні роботи, скоротити терміни спорудження фундаментів під колони. Для надійного проектування системи «паля-колонна» необхідні знання дійсної несучої спроможності паль. Відсутність цих даних змушує проектувальника при розрахунках вводити значні запаси міцності, що сприяє необґрунтованому подорожчання споруди, яку проектують.

Дослідження несучої спроможності паль проводилось на трьох полігонах [1], фізико-механічні характеристики наведені в табл. 1. Камуфлетні палі виконувались з діаметром стовбура 0,45 м. і з розширеною п'ятою 1,2 м. на глибинах 3, 4, 5, 6 м. для вивчення питання впливу заглиблення на несучу спроможність паль. Результати цих досліджень [1] подано на рис. 1,2 .

Для обґрунтування проектних рішень несучої спроможності буро набивних паль з камуфлетним розширенням (рис.1,2) в роботі використано нелінійну дилатансійну модель ґрунту [2,3] та числовий метод граничних елементів (МГЕ) [4].

Проектування геотехнічних об'єктів пов'язано з необхідністю аналізу неперервних фізичних процесів, математичним описанням яких є диференційні рівняння в частинних похідних. Вихідні диференційні рівняння разом з краєвими умовами носять назву диференційної краєвої задачі і являють собою математичну модель дослідного об'єкта.

Точне рішення краєвої задачі вдається отримати для небагатьох часткових випадків. Тому в сучасних САПР рішення шукається з використанням наближених методів. В даній роботі розв'язання краєвої задачі геомеханіки побудовано на основі інтегральних рівнянь МГЕ. Числове

інтегрування – більш стійкий процес, ніж числове диференціювання. Інтегральне рівняння МГЕ – це синтез статичних, геометричних, фізичних рівнянь (1):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij,j} + b_j &= 0 \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \\ \sigma_{ij} &= C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \end{aligned} \right\} \Rightarrow C_{ij}(\xi)u_j(\xi) + \int_{\Gamma} p_{ij}^*(\xi, x)u_j(x)d\Gamma(x) = \int_{\Gamma} u_{ij}^*(\xi, x)p_j(x)d\Gamma(x), \quad (1)$$

де  $\sigma_{ij,j} + b_j = 0$  – статичні рівняння рівноваги;  $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$  – геометричні рівняння;  $\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl}$  – фізичні рівняння середовища.

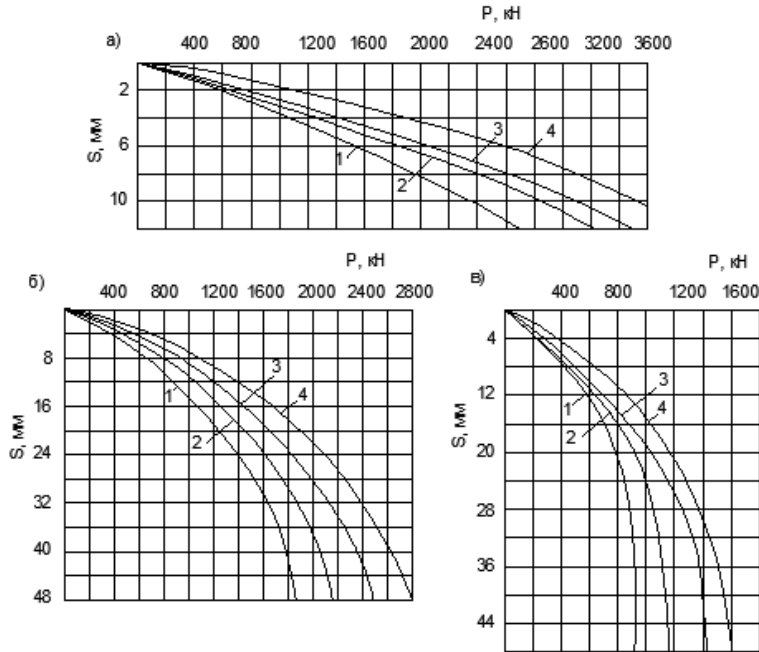


Рисунок 1 – Результати натурних досліджень палів: а) – першого полігону; б) – другого полігону; в) – третього полігону при відповідній глибині закладання палів 1 – 3 м., 2 – 4 м., 3 – 5 м., 4 – 6 м.

Таблиця 1

**Фізико-механічні характеристики ґрунтів дослідних полігонів**

Вид фізико-механічної характеристики ґрунту	Зеленувато-сіра глина (полігон №1)	Червоно-бура глина (полігон №2)	Коричневато-бурий суглинок (полігон №3)
Структурна щільність ґрунту $\rho_{s0}(\text{т/м}^3)$	2,75	2,7	2,68
Щільність ґрунту $\rho(\text{т/м}^3)$	2,1	2	1,9
Вологість $W, (\%)$	11,2	20,6	27,4
Коефіцієнт пористості $e$	0,52	0,65	0,73
Кут внутрішнього тертя $\varphi$ , (градуси)	20	23	28
Питоме зчеплення $C, (\text{МПа})$	50	28	12
Модуль деформації $E, (\text{МПа})$	21200	14000	9000
$\rho^{\max}$	2,35	2,092	1,97
$\rho^{\min}$	1,59	1,62	1,59
Коефіцієнт Пуассона $\nu$	0,42	0,42	0,35

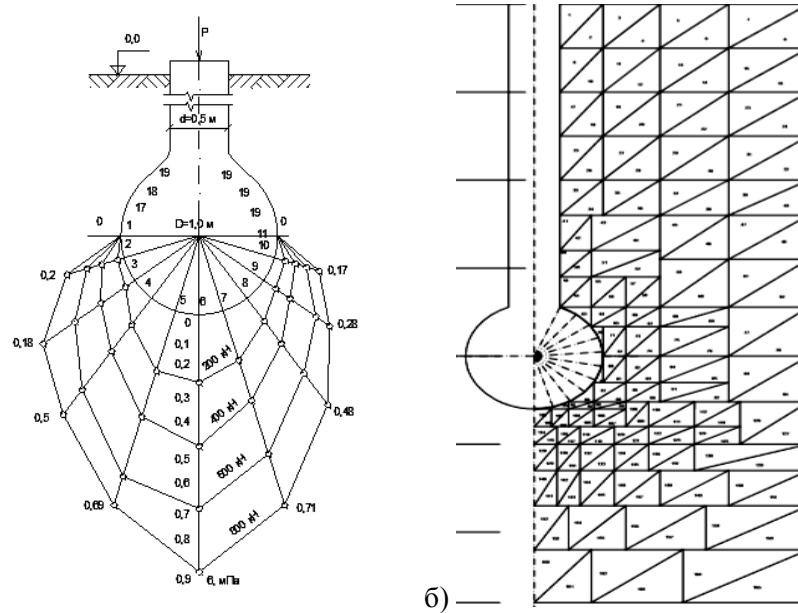


Рисунок 2 – А) – дані натурних досліджень епюр розподілення контактних напружень по сферичній поверхні п'яти камуфлетної палі в суглинку; б) – схема дискретизації контактної поверхні палі та ґрунту і дискретизація активної зони ґрунтової основи

При розгляді нелінійної задачі інтегральне рівняння, отримане К. Бреббія [4], набуває вигляду:

$$c_{ij} \cdot u_j + \int_{\Gamma} p_{ij}^* u_j d\Gamma = \int_{\Gamma} u_{ij}^* p_j d\Gamma + \int_{\Omega} \sigma^* \varepsilon_{jk}^p d\Omega, \quad (2)$$

де,  $u$  – заданий вектор переміщень на контактні границі фундаментної конструкції;  $p$  – шуканий вектор напружень на границі;  $u^*$ ,  $p^*$ ,  $\sigma^*$  – ядра граничного рівняння (2) чи функції впливу МГЕ, це двоточкові функції, їх компоненти – переміщення та напруження довільної точки поля в напрямку «і» (точка нагляду) від сили  $P = 1$ , прикладеної в «j» –му напрямку (джерелі) – прийнято рішення Р. Міндліна для переміщень, напружень та похідних від напружень, що відповідають одиничним взбуджуючим впливам ( $P=1$ ) в півпросторі. Ядра інтегрального рівняння характеризують собою досліджуване середовище;  $C_{ij}$  – постійна, визначається із умов руху тіла як цілого, з'являється при переводі краєвої задачі до інтегрального рівняння (2) для отримання єдиного рішення.;  $\Gamma$ ,  $\xi$ ,  $x$ ,  $\Omega$  – відповідно гранична поверхня фундаментної конструкції, точка збурення, точка нагляду та границя трикутних осередків активної зони ґрунту [4].

Перший крок до розв'язання вихідної краєвої задачі – перехід від системи диференціальних рівнянь до еквівалентного інтегрального рівняння. Оскільки в цьому випадку розглядається лише границя досліджуваної області – розмірність задачі понижається на одиницю.

В МГЕ використовується та обставина, що для півплощини для більшості диференціальних рівнянь в частинних похідних існують сингулярні (фундаментальні) рішення, що відповідають одиничним взбуджуючим впливам в напівобмеженій області. В роботі взято фундаментальні розв'язки Р. Міндліна для півплощини. Єдиним джерелом похибок в МГЕ є наближене інтегрування системи розрахункових інтегральних рівнянь.

Основою числової реалізації МГЕ є перехід від функціональних інтегральних співвідношень до їх алгебраїчних аналогів. Для отримання рішення системи розрахункових рівнянь проводилась дискретизація границі контактної області буронабивної палі граничними лінійними елементами (ГЕ), рис. 2, б.

Окремий ГЕ визначається координатою своєї середньої точки. Інтенсивність невідомих (шуканих на границі функцій) в межах ГЕ приймалась постійною. Активна зона навколопальнової основи дискретизувалась трикутними осередками, рис. 2,б.

Отримані графіки залежності «навантаження-осідання» для трьох полігонів досліджень наведено на рис. 3 для паль довжиною 3 м. та 6 м.

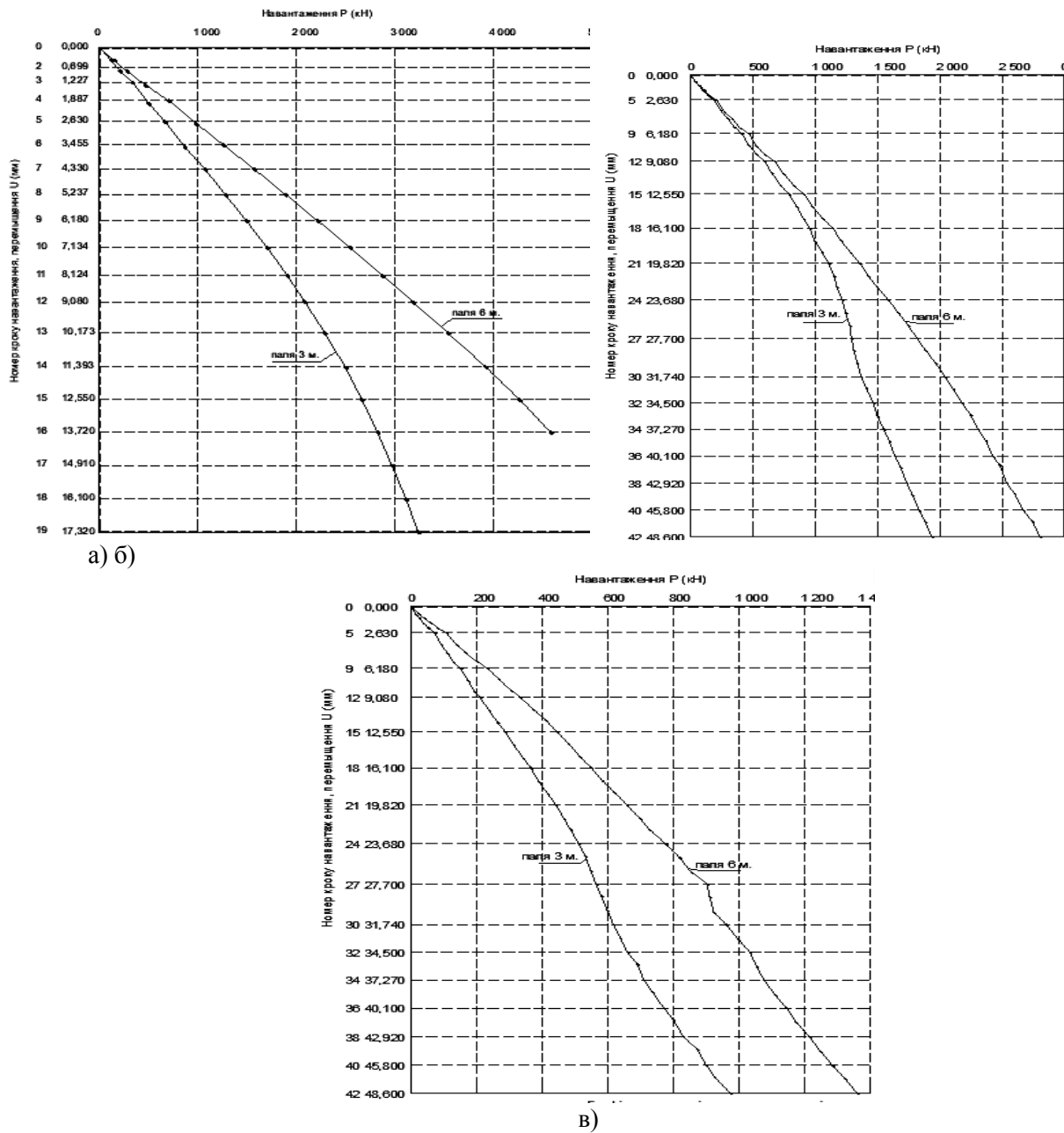


Рисунок 3 – Отримані за МГЕ графіки «навантаження-осідання» для а) I полігону; б) II полігону; в) III полігону

Порівняння числових за МГЕ досліджень несучої спроможності камуфлет них паль з натурними даними [1] наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Дані порівнянь числових за МГЕ досліджень несучої спроможності камуфлет них паль з натурними даними

№ полігону	Довжина палі L, м	Осідання, см	Несуча здатність палі	
			за МГЕ, кН	згідно експеримента, кН
I	3 м	12 см	2510 кН	2460 кН
	6 м	10 см	3490 кН	3500 кН
II	3 м	4,8 см	1860 кН	1880 кН
	6 м	4,8 см	2830 кН	2800 кН
III	3 м	4,8 см	970 кН	980 кН
	6 м	4,8 см	1635 кН	1640 кН

## Висновки

- Результати числового аналізу НДС реального об'єкта (камуфлетної буронабивної палі) за числовим МГЕ з використанням запропонованої дилатансійної моделі задовольняють очікуванню осіданням, отриманим із експерименту.
- Вирішення питань визначення несучої здатності камуфлетних паль має як наукове, так і прикладне значення.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Филатов А. В., Бойко Н. В. Исследование о несущей способности коротких буронабивных свай с камуфлетным расширением. М.:Стройиздат, ОФМГ, №3, 1975, С. 15-17.
1. Бойко И. П. Теоретические основы проектирования свайных фундаментов на упругопластическом основании. И. П. Бойко // Основания и фундаменты. – 1985. – №18. – С.11 - 18.
2. Моргун А. С. Теорія пластичної течії в механіці ґрунтів: монографія. А. С. Моргун. – Вінниця, ВНТУ. – 2013. – 108 с.
3. Бреббия К. Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел.; пер. с англ. Л. Г. Кернейчука. – М.: Мир, 1987. – 524 с.

**Моргун Алла Серафимівна** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету.

**Меть Іван Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету.

**Задорожнюк Віолета Олегівна** – аспірант кафедри будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету.

**A. Morgun**

**I. Met**

**V. Zadorozhniuk**

## RESEARCH ON MEGA OF CAPACITY CAPACITY OF BURONABLE FUEL WITH CAMOUFLET EXTENSION

Vinnitsia National Technical University

*The development of the construction industry is associated with the introduction in the building practice of new technologies of predictive calculation. Significant increase in the weight of modern structures, which is transferred to the basis, necessitates the development of non-linear methods for calculating drill piles, which in these conditions are the most effective types of foundation structures.*

*Methods of nonlinear ground-based analysis, designed for numerical implementation, are increasingly used in project design practice. With the involvement of the numerical method of boundary elements in the work, an analytical comprehensive approach to the estimation of the VAT of a camouflage drill-bored Pile-Column is proposed. Ensuring the reliability of the work of the underlying structure is decisive in practical design and requires both experimental substantiation and numerical simulation.*

*Key words: camouflage drilling pile-column, numerical method of boundary elements.*

**Alla Serafimivna** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction, Urban Management and Architecture of Vinnitsia National Technical University.

**Ivan Nikolaevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction, Urban Management and Architecture of Vinnitsia National Technical University.

**Violeta Zadorozhniuk** – postgraduate student of the Department of Construction, Urban Management and Architecture of Vinnitsia National Technical University.

**A. С. Моргун**

**И. М. меть**

**В. А. Задорожнюк**

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПО МГЭ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ С КАМУФЛЕТНЫМ РАСШИРЕНИЕМ

Винницкий национальный технический университет

*Развитие строительной отрасли связан с внедрением в строительную практику новых технологий прогнозного расчета. Существенные увеличения веса современных сооружений, которое передается на основание, вызывает необходимость развития нелинейных методов расчета буронабивных свай, которые в этих условиях являются наиболее эффективными видами фундаментных конструкций.*

*Методы нелинейного анализа грунтового основания, предназначенные для числовой реализации, находят все большее применение в проектной строительной практике. С привлечением численного метода граничных элементов в работе предложено аналитический комплексный подход к оценке НДС камуфлетного буронабивной сваи-колонны. Обеспечение надежности работы фундаментной конструкции является определяющим при практическом проектировании и требует, как экспериментального обоснования, так и численного моделирования.*

*Ключевые слова: камуфлетного буронабивная свая-колонна, численный метод граничных элементов.*

**Моргун Алла Серафимовна** - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства, городского хозяйства и архитектуры Винницкого национального технического университета.

**Меть Иван Николаевич** - кандидат технических наук, доцент кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры Винницкого национального технического университета.

**Задорожнюк Виолетта Олеговна** - аспирант кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры Винницкого национального технического университета.