

## БУДІВНИЦТВО

УДК 642:624.044:624.15

**А. С. Моргун<sup>1</sup>**  
**В. Ю. Плясовиця<sup>1</sup>**

# ПРОГНОЗУВАННЯ ЗА МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПОВЕДІНКИ ФУНДАМЕНТУ БАШТОВОЇ СПОРУДИ НА БУРОНАБИВНИХ ПАЛЯХ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Використовуючи числовий метод граничних елементів, дано кількісну оцінку механічних процесів в ґрунтовій основі буронабивних паль з розширенням, що утворюють фундаментну конструкцію баштової вишки висотою 70 м.*

**Ключові слова:** фундамент, буронабивна паля, напружено-деформований стан, метод граничних елементів, несуча спроможність.

### Вступ

Необхідність розв'язання задачі, пов'язаної з оцінкою міцності і деформативності ґрунтів, диктується вимогами інженерної практики. Ґрунтам властиві відносно мала міцність і велика деформативність, яка зумовлює їх значну стисливість у порівнянні з деформацією самої фундаментної конструкції. Визначення осідань — кінцевий стан розрахунку споруд і передбачає обмеження деформацій споруди межами  $s \leq s_u$  (осідання  $s$  споруди мають бути менші допустимих  $s_u$ ).

Великий розкид інженерно-геологічних умов основи та різноманіття конструкцій самих споруд унеможливають стандартний підхід до проектування фундаментів і в кожному конкретному випадку потребують творчого осмислення та застосування моделей теорії пластичної течії. Це зумовлює актуальність роботи.

Як відомо, для математичного описання деформованості ґрунтів слугують диференціальні рівняння в частинних похідних. Для розв'язання цих рівнянь в роботі використано числовий метод граничних елементів (МГЕ).

*Метою роботи є отримання на основі напрацьованої математичної моделі системи «основа—фундамент» [1] даних не лише описового, але і прогнозного характеру поведінки під навантаженням буронабивної палі з розширенням.*

### Постановка задачі, визначальні співвідношення

Розвиток нових розрахункових моделей із залученням ЕОМ та сучасних числових методів став одним з найекономічніших прийомів прикладного дослідження, оскільки зберігає час і витрати на проведення вартісних натурних експериментів. Прикладні задачі пружно-пластичності є суттєво нелінійним. Розв'язання таких задач потребує використання достатньо ефективних методів лінеаризації нелінійної задачі, адже дискретизація та квантування неперервних процесів — це складові прийняття рішень в багатьох складних системах.

Спорудження сучасних висотних будівель потребує на етапі проектування здійснювати прогноз їх напружено-деформованого стану та напружено-деформованого стану основи з використанням новітніх досягнень прикладної геомеханіки.

Під час дії навантажень на ґрунт порушуються структурні зв'язки між окремими частинками ґрунту. Тому в ґрунтах крім загальних закономірностей є низка особливостей, зумовлених природою рихлих ґрунтів. Міцність зв'язків у ґрунті набагато менша міцності самих частинок. У слабких та водонасичених ґрунтах основною складовою є деформації формозміни і під час обчислення осідань цим деформаціям потрібно приділяти особливу увагу.

У роботі зпрогнозовано поведінку під навантаженням фундаменту металеві башти висотою 70 м

для антен мобільного зв'язку [1] в складних геологічних умовах будівництва. Відстань між опорами башти 8,5 м (рис. 1). Фундаментами башти є буронабивні палі довжиною 18 м, діаметром 50 см з розширенням в нижній частині до 1,2 м для зниження тиску на ґрунти основи. Фундаменти спіралися на лесоподібні слабкопросадкові тверді супіски (ІГЕ 4), що характеризуються малим значенням граничних деформацій ( $\varepsilon_u = 0,005 \dots 0,01$ ) і великим значенням початкового просадкового тиску ( $P_u = 400 \dots 450$  кПа). Основа складалась із чотирьох прошарків: I — супісь пилувата (12 м), II — супісь просадкова (8 м), III — супісь тверда макропориста (3 м), IV — суглинок (3 м).

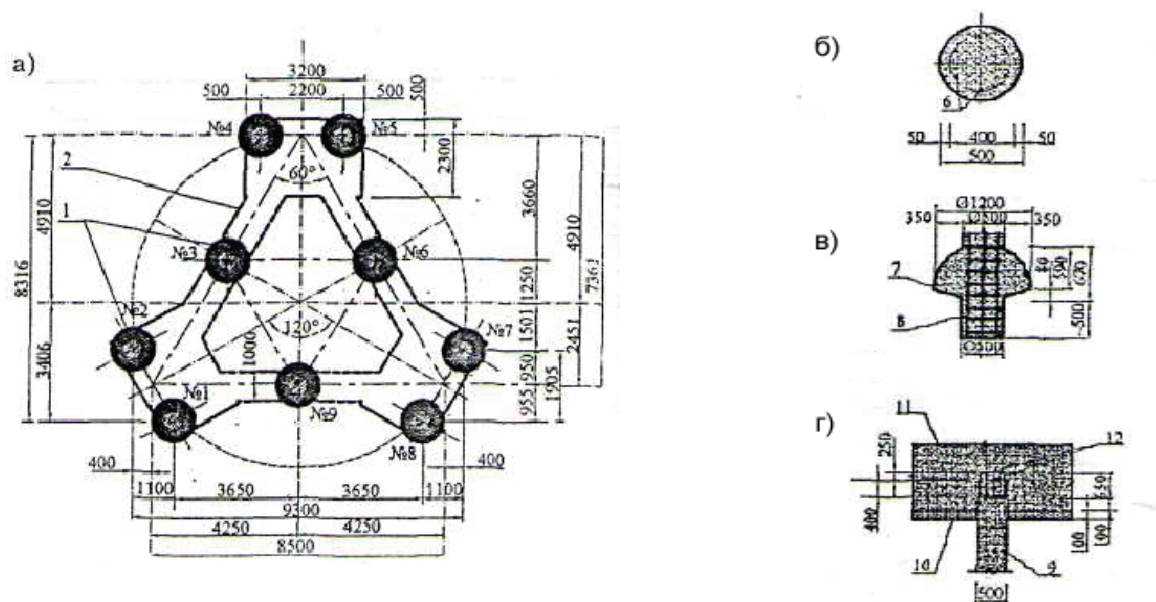


Рис. 1: а — план пального поля фундаменту башти із буронабивних палі марки БП 180.50/120; б — залізобетонний перетин палі; в — деталь нижнього кінця палі; г — деталь з'єднання палі з ростверком

Математичною формалізацією поведінки матеріалу ґрунту в роботі є основне інтегральне рівняння МГЕ, отримане К. Бреббія [2] в результаті розгляду статичних, геометричних, фізичних рівнянь та зведення їх до інтегрального рівняння Вольтера другого порядку:

$$C_{ij}(\xi)u_j(\xi) + \int_{\Gamma} p_{ij}^*(\xi, x)u_j(x)d\Gamma(x) = \int_{\Gamma} u_{ij}^*(\xi, x)p_j(x)d\Gamma(x), \quad (1)$$

де  $u$  — заданий вектор переміщень по границі фундаментної конструкції;  $p$  — шуканий вектор напружень на границі;  $u^*$ ,  $p^*$ ,  $\sigma^*$  — ядра граничного рівняння — розв'язку Р. Міндліна для переміщень, напружень і похідних від напружень, які залежать від відстані між точкою  $\xi$  (точка прикладання одиничного навантаження) і точкою  $x$  (точкою спостереження);  $\Gamma$  — гранична поверхня фундаментної конструкції [2].

В роботі замість вимог ортогональності вектора приросту пластичних деформацій ґрунтової основи  $d\varepsilon_{ij}^p$  до поверхні пластичності  $f$  використано неасоційований закон пластичної течії, який доповнювався дилатансійним співвідношенням [3, 4]

$$d\varepsilon_{ij}^p = \Lambda(\chi) \cdot d\gamma^p, \quad (2)$$

де  $d\gamma^p$  — скалярний еквівалент приросту зсувної пластичної деформації на октаедричній площині;  $d\varepsilon_{ij}^p$  — приріст непружних змін об'єму, що супутні зсуву;  $\Lambda$  — швидкість дилатансії;  $\chi$  — параметр зміцнення ґрунтового середовища (взято щільність ґрунту  $\rho$ ).

Розв'язання такої нелінійної задачі процесу деформування буронабивної палі проведено методом «пружних» розв'язків О. А. Ільюшина, який є дієвим наближеним методом, що дозволяє звести розв'язання нелінійної пружно-пластичної задачі до послідовного розв'язання лінійних задач [5]. Для реалізації цього методу синтезовані рівняння рівноваги, геометричні рівняння, які відповідають теорії пружності, та фізичні рівняння, що відповідають теорії пружно-пластичної течії,

розв'язувались числовим МГЕ [1, 6]. Для обчислення інтегралів в (1) використано квадратурні формули Гаусса.

За руйнування основи прийнято низку відхилень від граничної рівноваги по поверхнях руйнування дискретного ґрунтового середовища. Визначення межі пружної поведінки ґрунтової основи проводилось з використанням моделі поверхні руйнування Мізеса–Шлейхера–Боткіна [4]

$$f = \begin{cases} T + \sigma_m t g \psi - \tau_s = 0, & \text{якщо } \sigma_m \leq p_0; \\ T + p_0 t g \psi - \tau_s = 0, & \text{якщо } \sigma_m > p_0, \end{cases} \quad (3)$$

де  $T, \sigma_m$  — напруження на девіаторній площині;  $T$  — інтенсивність дотичних напружень,  $\sigma_m$  — гідростатичний тиск;  $p_0$  — рівень гідростатичного тиску, коли ґрунт працює як суцільне середовище (межа переходу від конуса до циліндра в моделі пружнопластичного середовища Мізеса–Шлейхера–Боткіна).

На кожному  $n$ -му етапі наближення ітераційного процесу «пружних» розв'язків О. А. Ільюшина розв'язується система лінійних алгебраїчних рівнянь з кожним разом з більш уточненою правою частиною. На кожному наступному кроці навантаження використовуються дані з попереднього кроку. Оскільки зв'язок напружено-деформованого стану в ґрунтах ( $\sigma - \varepsilon$ ) нелінійний, то визначення постійних лінійної пропорційності обмежувались умовами нескінченно малих змін приростів напружень і відповідних їм приростів деформацій. Процес навантаження основи розглядався як квазістатичний, який характеризувався нескінченно повільною течією. Саме такі процеси відповідають термінам забудови споруди.

Метод послідовних пружних розв'язків О. А. Ільюшина разом з кроковим способом навантаження дозволяє вести розрахунок шляхом послідовного додавання значень напружень на границях, переміщень та напружень у внутрішніх точках.

Для дослідження НДС буронабивної палі використано просторову версію пружно-пластичної дилатансійної моделі [3].

Експериментами встановлено, що навіть у дуже слабких ґрунтах текучої консистенції за межами границі зони деформацій переміщення ґрунту не спостерігаються. Це говорить, що зона деформацій є активною робочою зоною основи фундаменту, в межах якої протягом деякого часу розвивається динамічний процес ущільнення ґрунту, який відображає суть спільної роботи фундаменту і основи до набуття нею стану рівноваги.

З огляду на те, що розглянута задача є вісесиметричною, на рис. 1 показано дискретизацію половини активної зони навколо пальової основи 128-ми трикутними осередками. Гранична бокова поверхня та вістря палі дискретизувались кожна 10-ма граничними елементами.

За вагові функції вибрано фундаментальні розв'язки Р. Міндліна, які перетворюють в нуль інтеграли по області, зводячи задачу до визначення граничних функцій розрахункового рівняння стану (1). Саме тому в МГЕ використовується дискретне подання лише границі досліджуваного об'єкта, що і є перевагою числового МГЕ. Розрахунок проведено за розробленою в середовищі Delphi програмою [1, 6].

Перевірка будь-якої теорії в будівництві основана на її спроможності передбачити поведінку споруди, а міра придатності рішень залежить від вхідних параметрів. Використано в розрахунках характеристики стану (восьми реальних фізико-механічних параметрів ґрунту

$$E = 20038 \text{ кН}; \quad \nu = 0,3058; \quad \rho = 1,665 \text{ т/м}^3; \quad \rho^{\min} = 1,472 \text{ т/м}^3; \\ \rho^{\max} = 2,29 \text{ т/м}^3; \quad c = 14 \text{ кН}; \quad \varphi = 0,38 \text{ рад},$$

де  $E$  — модуль деформації ґрунту;  $\nu$  — коефіцієнт поперечного розширення;  $\rho$  — щільність ґрунту;  $c$  — зчеплення ґрунту;  $\varphi$  — кут внутрішнього тертя ґрунту, який дозволяє враховувати більшою мі-

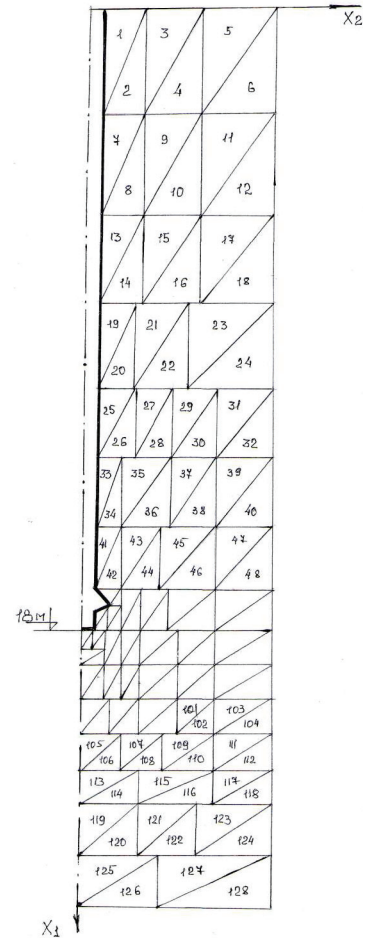


Рис. 2. Схема дискретизації активної зони буронабивної палі

рою всю складність ґрунтових умов будівельного майданчика. Це дає можливість управління процесом деформування, визначення НДС ґрунтової основи, який є кількісною мірою прогнозування геомеханічних процесів.

Результати розрахунку з використанням запропонованої дилатансійної моделі (рис. 3) дають можливість ще на стадії проектування спрогнозувати стан основи споруди в різних інженерно-геологічних умовах.

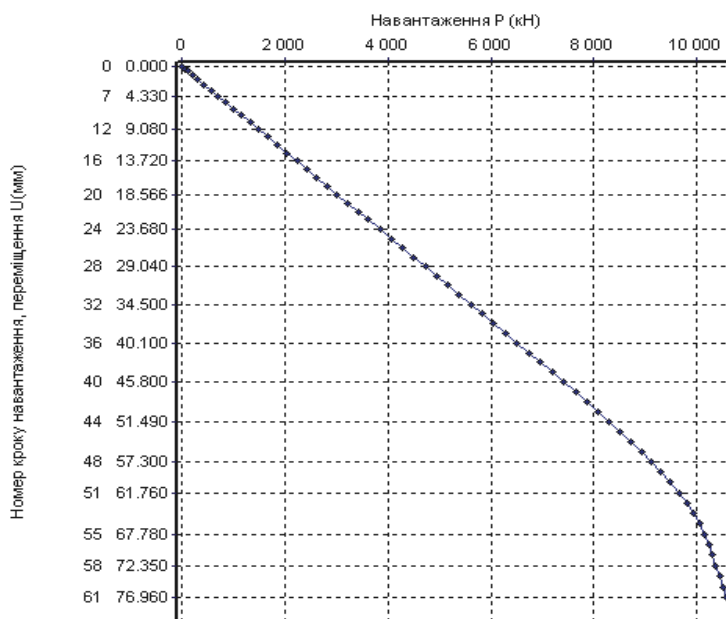


Рис. 3. Графік залежності навантаження–осідання для буронабивної палі висотою 18 м

Фактично паля, що розглядається, передає зусилля на ґрунти основи  $P = 550$  кН [7]. Розрахункові навантаження на палю [7] визначені за таблицями 7, 2, 18 СНиП 2.02.03-85 для сейсмічності 8 балів і склали  $P = 1500$  кН. За  $P = 1500$  кН, згідно з графіком на рис. 3 осідання складає 9,51 мм, а розрахункова деформація фундаменту згідно зі СНиП 2.02.01-83\* — 12,09 мм, що є задовільною кореляцією.

## Висновки

1. Отриманий за МГЕ прогнозний графік поведінки буронабивної палі під навантаженням « $P-s$ » аж до його «зриву» дає можливість визначити несучу спроможність фундаментної конструкції згідно з критерієм  $s \leq s_u$  (осідання  $s$  споруди мають бути менші допустимих  $s_u$ ) та повніше (економічніше) використати резерви несучої здатності за конкретних ґрунтових умов. Це дозволяє підвищити якість проектного розрахунку, дає можливість збільшити термін експлуатації споруди управлінням її НДС.

2. Використання результатів числових досліджень дозволяє отримати якісну інформацію про реальні можливості буронабивних паль, побудувати прогнозну модель функціонування фундаментної конструкції з точки зору попередження її руйнування.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Моргун А. С. Пружно-пластичні аспекти прогнозу за МГЕ деформування основи буронабивних та буроін'єкційних паль / А. С. Моргун, В. Ю. Плясовиця. — Вінниця : ВНТУ, 2016. — 82 с.
2. Бреббия К. Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел. — М. : Мир, 1987. — 525 с.
3. Бойко І. П. Напружено-деформований стан ґрунтового масиву при побудові нових фундаментів поблизу існуючих будинків / І. П. Бойко, О. В. Сахаров // Основи і фундаменти : міжвідомчий наук.-техн. зб. — К. : КНУБА. — 2004. — Вип. 28. — С. 3—10.
4. Николаевский В. Н. Современные проблемы механики ґрунтов / В. Н. Николаевский // Определяющие законы механики ґрунтов. — М. : Стройиздат, 1975. — С. 210—227.
5. Ильюшин А. А. Труды (1946—1966). Т. 2. Пластичность / сост. Е. А. Ильюшина, М. П. Короткина. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 480 с.
6. Моргун А. С. Комп'ютерні технології розрахунку фундаментних конструкцій на основі МГЕ / А. С. Моргун, І. М. Меть, А. В. Ніцевич. — Вінниця : ВНТУ, 2009. — 162 с.

7. Остроумов Б. В. Применение буронабивных свай в фундаменте башенного сооружения в сложных грунтовых условиях / Б. В. Остроумов, Р. Е. Ханин // ОФМГ. — 2006. — № 5. — С. 26—29.

Рекомендовано кафедрою будівництва, міського господарства та архітектури ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 29.11.2016

**Моргун Алла Серафимівна** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, e-mail: [alla@morgun.com.ua](mailto:alla@morgun.com.ua) ;

**Плясовиця Віталій Юрієвич** — пошукач кафедри будівництва, міського господарства та архітектури. Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**A. S. Morgun<sup>1</sup>**  
**V. Yu. Pliashovytzia<sup>1</sup>**

## **Prognostication on the Method of Border Elements of Behavior of Foundation of Tower Building on Bore Piles**

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*Using the numerical method of border elements, the quantitative estimation of mechanic process has been given in the ground basis of bore piles with expansion, forming the fundamental construction of tower of 70 m in height.*

**Keywords:** mode of deformation, method of boundary element, load-bearing capacity.

**Morgun Alla S.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Building, Municipal Economy and Architecture, e-mail: [alla@morgun.com.ua](mailto:alla@morgun.com.ua) ;

**Pliashovytzia Vitalii Yu.** — Post-Graduate Student of the Chair of Building, Municipal Economy and Architecture

**A. С. Моргун**  
**В. Ю. Плясовица**

## **Прогнозирование по методу граничных элементов поведения фундамента башенного сооружения на буронабивных сваях**

Винницкий национальный технический университет

*Используя числовой метод граничных элементов, дана количественная оценка механических процессов в грунтовой основе буронабивных свай с расширением, образующих фундаментную конструкцию башенной вышки высотой 70 м.*

**Ключевые слова:** фундамент, буронабивная свая, напряженно-деформированное состояние, метод граничных элементов, несущая способность.

**Моргун Алла Серафимовна** — д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой строительства, городского хозяйства и архитектуры, e-mail: [alla@morgun.com.ua](mailto:alla@morgun.com.ua) ;

**Плясовица Віталій Юрієвич** — соискатель кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры