

БУДІВНИЦТВО

<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-148-1-7-12>

УДК 519.635:624.044:624.15

А. С. Моргун¹
І. М. Меть¹
В. О. Задорожнюк¹

МЕХАНІКА КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ БУРОНАБИВНИХ ПАЛЬ З ҐРУНТОВОЮ ОСНОВОЮ ЗА ЧИСЛОВИМ МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

¹Вінницький національний технічний університет

Будівництво — одна з основних галузей народного господарства, будь-якої держави, вона забезпечує створення нових, розширення і реконструкцію діючих основних фондів. Будівництву належить найголовніша роль в розвитку всіх галузей країни, в підвищенні продуктивності праці, підйомі матеріального благополуччя населення.

Проблема несучої спроможності основ до теперішнього часу продовжує залишатись актуальною у зв'язку зі зростанням обсягів промислового і цивільного будівництва, реконструкції і необхідністю проектування надійних і економічних споруд. Тому напрацювання і впровадження досконаліших і економічніших методів розрахунку та проектування фундаментних конструкцій, спрямованих на виявлення і реалізацію їх резервів, є важливою і актуальною проблемою будівельної науки. Врахування нелінійності деформування фундаментів в поєднанні з прийомами їх оптимального проектування дозволяє підняти адекватність розрахунків і отримати суттєву економію бетону та арматури.

У зв'язку зі зростанням обсягів використання буронабивних палей (зокрема й палей з розширеннями) нарізла необхідність напрацювань сучасних прогнозних методів визначення їх несучої спроможності із залученням ЕОМ, адже основною задачею в проектуванні споруд є інженерна оцінка несучої спроможності ґрунтових основ. Тому розвиток наукових основ розрахунку дисперсного ґрунту з використанням пружно-пластичної дилатансійної моделі — актуальний напрям сучасного фундаментобудування.

В роботі за числовим методом граничних елементів (МГЕ) з позицій механіки дисперсного пружно-пластичного середовища викладено уявлення прогнозування несучої спроможності буронабивної палі з розширеннями. Розв'язання нелінійної задачі прогнозування несучої спроможності буронабивної палі з розширеннями має як наукове, так і прикладне значення та тісно пов'язано з аналізом напружено-деформованого стану (НДС) ґрунту.

Ключові слова: буронабивна паля з розширеннями, напружено-деформований стан, дисперсія, несуча спроможність, метод граничних елементів.

Вступ

В прикладних технічних науках прогрес неможливий без переходу до математичного моделювання. Сучасний математичний апарат механіки ґрунтів оснований на розв'язаннях задач теорії пружності і теорії граничної рівноваги. Етап пружно-пластичного деформування від завершення пружної стадії до втрати стійкості не описаний розрахунковими моделями. Водночас, резерви пружно-пластичної зони дозволяють збільшити навантаження на фундаменти тоді, коли осідання пружної стадії не досягають гранично допустимого для цієї споруди значення.

В літературі неодноразово зазначалась необхідність розроблення розрахункової моделі, що дозволяє враховувати одночасно широкий набір реальних властивостей ґрунту, і також таких, що зумовлені його дискретністю. Тіла, що ущільнюються, мають особливості механічної поведінки: гідростатичний тиск може здійснювати вплив на формозміну, а дотичні напруження можуть впли-

вати на ущільнення — це прояв ефектів дилатансії матеріалу.

Деформації дисперсних середовищ здійснюються при дислокації твердих частинок в поровий простір, що неминуче призводить до одночасної зміни об'єму і форми.

Дискретна (зерниста) будова ґрунту є основною властивістю, що різнить його від твердих тіл. Оскільки механіка ґрунтів користується теоретичною базою, що відноситься до суцільних тіл — теорія дискретних середовищ є перспективною в розрахунках ґрунтів.

В роботі розглянута методика моделювання поведінки під навантаженням буронабивної палі з розширенням в дисперсному середовищі ґрунту. Досвід використання фундаментів з буронабивних паль показав їх значні переваги порівняно з усіма видами забивних паль — це значне скорочення витрат арматури, збільшення несучої спроможності, зниження вартості. Недоліки забивних паль наводять на думку про використання камуфлетних (утворених енергією вибуху) і буронабивних паль з розширеною п'ятою (рис. 1). Використання розширень п'ят в основі паль викликано необхідністю досягнення їх рівномірності, тобто досягнення рівності між несучою спроможністю паль за опором ґрунту і за міцністю матеріалу, що дозволяє в 2—3 рази збільшити розрахункове навантаження на палю. З'являється можливість успішно вирішувати проблему будівництва на глинистих ґрунтах, що набухають.

Наявність розширеної п'яти значно підвищує несучу спроможність по ґрунту на дію як вертикального, так і горизонтального навантаження. Несуча спроможність забивних паль по матеріалу в глинистих ґрунтах підвищеної вологості недовикористовується в 2—3 рази. Як свідчать результати натурних досліджень [4]—[6], улаштування розширених п'ят (110...120 см) на глибині 4...5 м навіть в гранично вологих глинах дозволяє значно збільшити навантаження на палю. Відомо, що до набухання схильні переважно верхні шари ґрунту, що залягають до глибини — 3...4 м. Інший варіант вирішення проблеми — повне прорізання просадкового шару та заглиблення в непросадковий шар, може бути економічно менш доцільним. Вибір виду будівельних заходів має ґрунтуватися на техніко-економічному аналізі з урахуванням типу ґрунтових умов, ступеня надійності рішення та можливостей будівельної організації.

Вибір для дослідження буронабивної палі з розширенням пояснюється їх широким розповсюдженням в цивільному та промисловому будівництві, а також їхньою техніко-економічною перспективністю.

Визначальні співвідношення

Для використання нормативних положень допустимих деформацій споруд необхідні методи розрахунку, що дозволяють визначати їх нелінійні осідання. Для цього бажано використання пружно-пластичної (змішаної) задачі. Згідно з сучасними уявленнями під змішаною задачею теорії пружності і теорії пластичності вважається задача розрахунку ґрунтової основи, коли в ній є зони руйнування, які спрощено іменуються пластичними. Навколо пластичних зон ґрунт знаходиться в дограничному чи пружному стані. На теперішній час ця задача знаходиться на стадії уточнення розрахункових схем і вихідних передумов. Розв'язання змішаної задачі передбачає, що в ґрунті одночасно існують пружні і пластичні зони, границі між ними мають криволінійний характер. Розв'язання змішаної задачі передбачає, що в середині пластичних зон крім розв'язання звичайних рівнянь рівноваги для вагомого середовища

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \gamma = 0; \quad \frac{\partial \tau_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

враховуються ще умови граничного стану ґрунтового середовища.

Таким чином, реальні задачі геомеханіки моделюються диференціальними рівняннями в частинних похідних і зводяться до класу крайових задач. За навантажень, близьких до граничних (більше 0,8 частини від граничних), розв'язання змішаної задачі, яка повніше характеризує поведінку ґрунту, вказує на сильну некоаксиальність тензорів напружень і деформацій в пластичних зонах.

Для обґрунтування проектних рішень несучої спроможності буронабивної палі з розширенням використано числовий МГЕ. Прогнозування поведінки ґрунтів під навантаженням пов'язане з необхідністю аналізу складних фізичних процесів ущільнення та переупакування частинок ґрунту. Математичним описом цих процесів є неголономні диференціальні рівняння в частинних похідних. В роботі розв'язання задачі здійснено на основі інтегрального рівняння числового МГЕ [1], [3], який є синтезом статичних, геометричних, фізичних рівнянь

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

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; u, p — шукані вектори переміщень та напружень на границі фундаментної конструкції; інтеграл по зоні Ω (Ω — активна зона навколо фундаментної ґрунтової основи) включає вектор пластичних деформацій ε_p ; Γ — границя дослідного об'єкта; u^*, p^* — сингулярні фундаментальні розв'язки Р. Міндліна, що відповідають одиничним збурювальним впливам в півпросторі [1], [3].

МГЕ дає можливість розділити розрахункову систему рівнянь на основі кожного окремого граничного елемента, що дуже зручно в реалізації і є особливістю методу. В роботі використана кусочно-лінійна апроксимація граничних елементів.

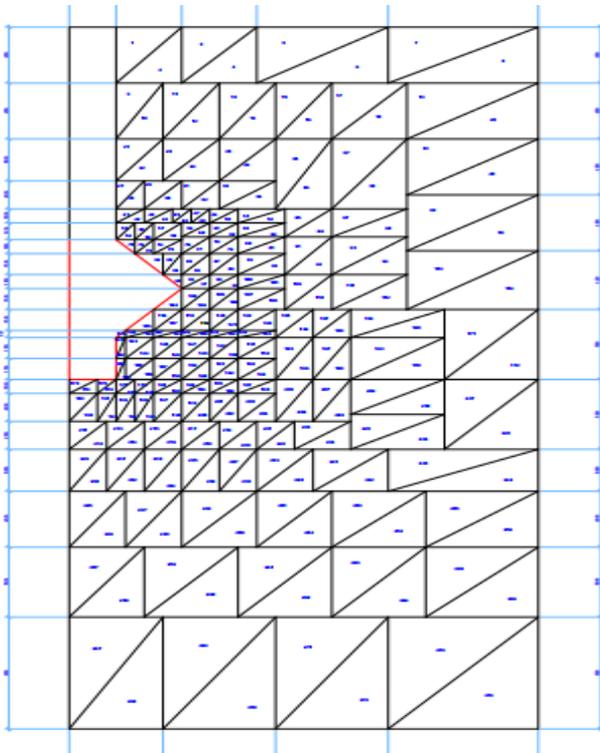


Рис. 1. Дискретизація буронабивної палі $L = 2,5$ м, діаметром 0,5 м з розширенням 1,2 м та активної зони навколо пальової ґрунтової основи

Як ядра (фундаментальних розв'язків) в МГЕ використано розв'язки Р. Міндліна для півплощини. Оскільки фундаментальний розв'язок задовольняє граничним умовам на вільній від напружень поверхні півпростору, потрібно дискретизувати лише граничну поверхню стикування фундаментної конструкції та ґрунту.

Для розв'язання поставленої геотехнічної задачі проводилась дискретизація границі контактної зони буронабивної палі $L = 2,5$ м діаметром стовбура 0,5 м з розширенням 1,2 м граничними лінійними елементами, рис. 1.

Інтенсивність шуканих на границі функцій (напружень) вважалась сталою в межах граничного елемента (ГЕ). Активна зона навколо фундаментної конструкції дискретизувалась трикутними осередками (рис. 1).

Застосування числового МГЕ до розв'язання нелінійної задачі геомеханіки обґрунтовано теоретичними викладками, підкріплено та проілюстровано даними числового розрахунку. Територія будівельного майданчика складалась з делювіальних суглинкових відкладень твердої консистенції [5]. В розрахунках використано значення їх восьми фізико-механічних показників

$$E = 29908 \text{ кН}; \nu = 0,407; \rho = 1,9 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}; \rho^{\min} = 1,61 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}; \rho^{\max} = 2,11 \frac{\Gamma}{\text{см}^3};$$

$$c = 5,4 \text{ кН}; \phi = 0,59 \text{ рад}; p_0 = -1900 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}.$$

В досліджуваній моделі ґрунт розглядався як пружно-пластичне середовище, що підкоряється неасоційованому закону пластичної течії (2), тобто в дограничному стані ґрунт вважається лінійно-деформованим середовищем, який переходить з подальшим навантаженням в граничний (пластичний) стан в залежності від критерію текучості Мізеса–Шлейхера–Боткіна [2], [3], рис. 2. Алгоритм числового розв'язання передбачає процедуру покрокового навантаження та використання числового МГЕ. В основі покрокової процедури лежить метод «пружних розв'язків» А. А. Іллюшина, який ґрунтується на реалізації серії пружних задач для неоднорідного ґрунтового середовища.

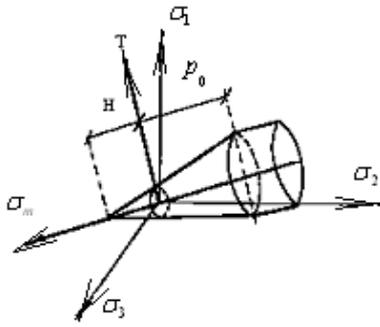


Рис. 2. Модифікований критерій пластичності Мізеса–Шлейхера–Боткіна в координатах головних напружень

Паля і ґрунт працювали в умовах осьової симетрії.

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

Приріст повних деформацій ґрунту складався з суми пружних та пластичних приростів

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p. \quad (4)$$

В пружній зоні роботи ґрунту ($f(\sigma_{ij}) < 0$) прирости пружних

деформацій $d\varepsilon_{ij}^e$ визначались за законом Гука. Для визначення приростів деформацій пластичного відгуку ґрунтів використано неасоційований закон пластичної течії (2) та до основних фізи-

ко-механічних характеристик ґрунту додався коефіцієнт дилатансії $\Lambda = dV/d\gamma$ — швидкість деформування ґрунту в граничному стані. Відмічений вперше О. Рейнольдсом в 1885 р. ефект дилатансії (зміна об'єму, що супроводжує зсувні деформації) характерний для незворотного деформування ґрунтів.

Аналітичне визначення умов настання граничного НДС базувалось на залежності граничного опору зсуву на октаедричних площадках від величини діючих напружень на них $\tau_{\text{окт}} = f(\sigma_{\text{окт}})$, тобто використано октаедричну теорію міцності Мізеса–Шлейхера–Боткіна [2], [3]

$$\begin{cases} f = T + \sigma_{\text{окт}} \cdot \text{tg} \psi - \tau_s = 0, & \text{якщо } \sigma_{\text{окт}} \leq p_0, \\ f = T + p_0 \cdot \text{tg} \psi - \tau_s = 0, & \text{якщо } \sigma_{\text{окт}} > p_0, \end{cases} \quad (5)$$

де T — інтенсивність дотичних напружень (інтенсивність девіатора напруг), $\sigma_{\text{окт}}$ — гідростатичний тиск; ψ — граничний кут тертя на октаедричній площині, аналогічний куту внутрішнього тертя, τ_s — значення граничних напружень на октаедричній площині при $\sigma_m = 0$; p_0 — величина гідростатичного тиску на девіаторній площині, коли ґрунт працює як суцільне середовище, межа пластичної стисливості [2] чи максимальний гідростатичний тиск (межа переходу від конуса до циліндра в теорії Мізеса–Шлейхера–Боткіна, рис. 2).

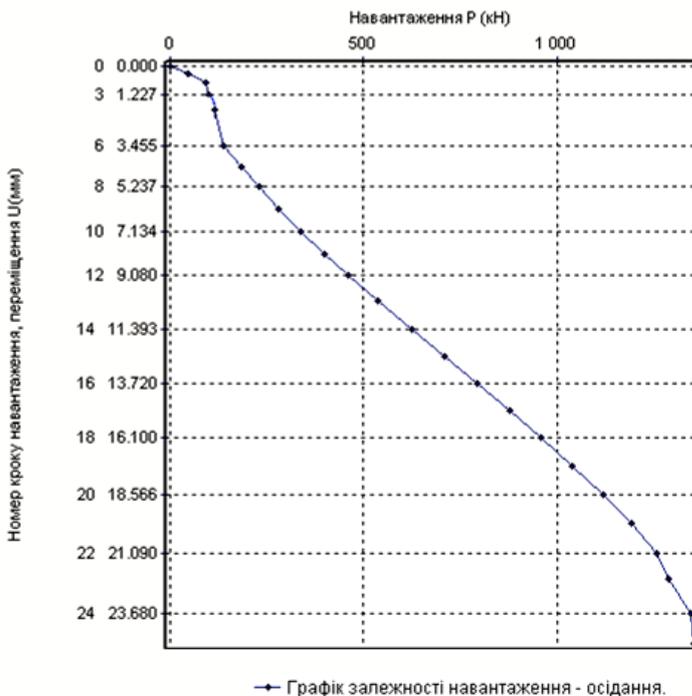


Рис. 3. Результати числових досліджень за МГЕ роботи буронабивної паля з розширенням під навантаженням

Як додаткову умову до неасоційованого закону пластичної течії (2) замість вимоги ортогональності вектора пластичних деформацій $d\varepsilon_{ij}^p$ до поверхні навантаження f використано дилатансійну теорію ґрунтового середовища Ніколаєвського–Бойка [2]

$$d\varepsilon_{\text{шар}}^p = \Lambda \cdot d\gamma, \quad (6)$$

де $d\varepsilon_{\text{шар}}^p$ — приріст об'ємних деформацій при зсуві ґрунту; $d\gamma$ — приріст інтенсивності зсуву.

Методика дає можливість відслідковувати НДС ґрунтової основи на всіх етапах навантаження та отримати графік роботи фундаментної конструкції «навантаження–осідання». За результатами числового експерименту побудовано графік «P—s» (рис. 3).

З метою налаштування параметрів алгоритму та оцінки похибок результату числового дослідження порівняно з експериментом. Для порівняння отриманих

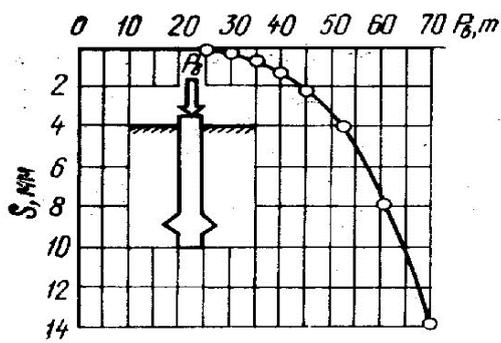


Рис. 4. Графік залежності «навантаження-осідання» натурних експериментальних досліджень роботи буронабивної палі з розширенням під навантаженням згідно з [5]

даних використано результати досліджень натурної буронабивної палі з розширенням, виготовленої на експериментальній площадці [5] (рис. 4).

При осіданні $s = 14$ мм, згідно з натурним експериментом, величина навантаження склала $P = 700$ кН. Згідно з числовими дослідженнями за МГЕ, коли $s = 14$ мм, величина навантаження склала $P = 740$ кН.

Висновки

Дилатансійні пружно-пластичні моделі ґрунту, що використовують умову міцності Мізеса–Шлейхера–Боткіна та неасоційований закон пластичної течії, є ефективними нелінійними моделями, що дозволяють розрахунковим шляхом оцінити вплив раніше визначених та зафіксованих в досліді і натурних спостереженнях зон підвищеної деформативності основ на осідання будівель і зусилля в фундаменті та враховувати їх наявність ще під час проектування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] К. Бреббиа, Ж. Теллес, и Л. Врубел, *Методы граничных элементов*. Москва: Мир, 1987.
- [2] И. П. Бойко «Теоретические основы проектирования свайных фундаментов на упругопластическом основании,» *Основания и фундаменты, сб. КИСИ, № 18, с. 11-18, 1985.*
- [3] А. С. Моргун, *Теория пластичной течи в механике грунтов*, Вінниця: вид-во ВНТУ, 2013, 108 с.
- [4] В. Н. Беляев, и Ю. П. Рудь, «О влиянии способа устройства скважины на несущую способность коротких набивных свай,» *Основания, фундаменты и механика грунтов, № 4, с. 14-16, 1979.*
- [5] Н. В. Бойко, «Исследование работы набивных свай с уширенной пятой в глинистых набухающих грунтах,» *Основания, фундаменты и механика грунтов, № 1, с.21-23, 1972.*
- [6] А. М. Ягудин, Г. А. Дружинин, и Ю. П. Рудь, «Исследование распределения контактных давлений в короткой буронабивной свае с лучевидным уширением,» *Основания, фундаменты и механика грунтов, № 3, с. 18-19, 1975.*

Моргун Алла Серафимівна — завідувач кафедри будівництва, міського господарства та архітектури; e-mail: alla@morgun.com.ua ;

Меть Іван Миколайович — доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, e-mail: vanmet@ukr.net ;

Задорожнюк Віолета Олегівна — аспірантка кафедри будівництва, міського господарства та архітектури; e-mail: zadorozhnyuk.vita@ukr.net .

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

A. S. Morgun¹
I. M. Met¹
V. O. Zadorozhniuk¹

Mechanics of Contact Mode Drilling Balls with a Primary Basis According to Numerical Method of Boundary Elements

¹Vinnitsia National Technical University

Construction is one of the main sectors of the national economy of any state, it provides creation of new, expansion and reconstruction of existing fixed assets. Construction plays the most important role in the development of all sectors of the country, in raising productivity, raising the material well-being of the population.

The problem of load-bearing capacity of the basics still remains relevant due to the growing volume of industrial and civil construction, reconstruction and the need to design reliable and economic structures. Therefore, the development and implementation of more sophisticated and cost-effective methods of calculating and designing foundation structures aimed at identifying and implementing their reserves is an important and relevant problem of construction science. Taking into account the nonlinearity of deformation of the foundations in combination with the methods of their optimal design allows to raise the adequacy of calculations and to obtain significant savings of concrete and reinforcement.

Due to the growing volume of use of drilling piles (including extensions), it is necessary to develop modern predictive methods for determining their bearing capacity with the involvement of computers, because the main task in the design of structures is the engineering assessment of bearing capacity of soil bases. Therefore, the development of the scientific basis for the calculation of dispersed soil using elastic-plastic dilatancy model is a relevant trend of modern foundations.

In the work, the presentation of the prediction of the bearing capacity of the drilling pile with extension is presented according to the numerical method of boundary elements (MGE) from the standpoint of mechanics of dispersed elastic-plastic medium. The solution of the nonlinear problem of predicting the bearing capacity of a drilling pile with extension is of scientific and applied importance and is closely related to the analysis of soil VAT.

Keywords: brown pile with expansion, stress-strain state, dispersion, load-bearing capacity, boundary element method.

Morgun Alla S. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Construction, Urban Economy and Architecture; e-mail: alla@morgun.com.ua ;

Met Ivan M. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Construction, Urban Economy and Architecture; e-mail: vanmet@ukr.net ;

Zadorozhnyiuk Violeta O. — Post-Graduate Student of the Chair of Construction, Urban Economy and Architecture, e-mail: zadorozhnyuk.vita@ukr.net

А. С. Моргун¹
И. М. Меть¹
В. А. Задорожнюк¹

Механика контактного взаимодействия буронабивных свай с грунтовым основанием по числовому методу граничных элементов

¹Вінницький національний технічний університет

Строительство — одна из основных отраслей народного хозяйства любой страны, она обеспечивает создание новых, расширение и реконструкцию действующих основных фондов. Строительству принадлежит самая главная роль в развитии всех отраслей страны, в повышении производительности труда, подъеме материального благополучия населения.

Проблема несущей способности оснований к настоящему времени продолжает оставаться актуальной в связи с ростом объемов промышленного и гражданского строительства, реконструкции и необходимостью проектирования надежных и экономичных сооружений. Поэтому наработки и внедрение более совершенных и экономичных методов расчета и проектирования фундаментных конструкций, направленных на выявление и реализацию их резервов является важной и актуальной проблемой строительной науки. Учет нелинейности деформирования фундаментов в сочетании с приемами их оптимального проектирования позволяет поднять адекватность расчетов и получить существенную экономию бетона и арматуры.

В связи с ростом объема использования буронабивных свай (в том числе и свай с расширениями) назрела необходимость наработок современных прогнозных методов определения их несущей способности с привлечением ЭВМ, ведь основной задачей при проектировании сооружений является инженерная оценка несущей способности грунтовых оснований. Поэтому развитие научных основ расчета дисперсного грунта с использованием упруго-пластической дилатансионной модели — актуальное направление современного фундаментостроения.

В работе, используя численный метод граничных элементов (МГЭ), с позиций механики дисперсной упруго-пластической среды изложены представления прогнозирования несущей способности буронабивной сваи с расширением. Решение нелинейной задачи прогнозирования несущей способности буронабивной сваи с расширением имеет как научное так и прикладное значение и тесно связано с анализом напряженно-деформированного состояния грунта.

Ключевые слова: буронабивная свая с расширением, напряженно-деформированное состояние, дисперсия, несущая способность, метод граничных элементов.

Моргун Алла Серафимовна — заведующая кафедрой строительства, городского хозяйства и архитектуры, e-mail: alla@morgun.com.ua ;

Меть Иван Николаевич — доцент кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры, e-mail: vanmet@ukr.net ;

Задорожнюк Виолетта Олеговна — аспирант кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры, e-mail: zadorozhnyuk.vita@ukr.net