

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

ПРОГНОЗУВАННЯ ПОВЕДІНКИ ДИСПЕРСНОГО ҐРУНТУ В ОСНОВАХ БУРОВИХ ОПОР-КОЛОН ЗА МҐЕ

Вінницький національний технічний університет

На теперішній час спорудження каркасних будівель проводиться на звичайних стовпчастих фундаментах, влаштування яких пов'язане з необхідністю виконання великого об'єму земляних робіт, значними затратами на виготовлення опалубки та підготовки бетонної суміші в стислих умовах. Зниження трудовитрат та економію можна отримати при використанні фундаментів із буро набивних паль та улаштуванні залізобетонних ростверків, а це також потребує відривки котлованів, додаткових витрат арматури, затрат праці та матеріалів. Крім того, бетонування ростверків з технологічною перервою після улаштування паль збільшує терміни будівництва.

Більш економічним є застосування одиночних бурових опор-колон. Вони мають більший діаметр стовбура ніж буро набивні палі та більш високу несучу здатність. Розширення у верхній частині стовбура збільшує опір ґрунту в горизонтальному напрямку за рахунок розвиненої бокової поверхні, а також сприяє використуванню вертикального навантаження для привантаження призми випору, що примикає до верхньої частини опори (по аналогії з пірамідальними палями). Розширена п'ята підвищує несучу здатність по ґрунту на дію вертикального навантаження.

Зростання об'ємів промислового і цивільного будівництва та необхідність проектування надійних і економічних споруд потребують напрацювання сучасних прогнозних методів визначення несучої спроможності такого виду фундаментів з метою забезпечення міцності будівель. Напрацювання і впровадження більш досконалих і економічних методів розрахунку та проектування фундаментних конструкцій, направлених на виявлення і реалізацію їх резервів є важливою і актуальною проблемою будівельної науки. Врахування нелінійності деформування фундаментів в сполученні з прийомами їх оптимального проектування дозволяє підняти адекватність розрахунків і отримати суттєву економію бетону та арматури.

В роботі за числовим методом граничних елементів (МҐЕ) з позицій механіки дисперсного пружно-пластичного середовища викладено уявлення прогнозування несучої спроможності бурових опор-колон з розширеннями в верхній та нижній частинах. Вирішення нелінійної задачі прогнозування несучої спроможності бурових опор-колон з розширеннями має як наукове так і прикладне значення та тісно пов'язане з аналізом НДС ґрунту.

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

Вступ

В роботі проведено розрахунок несучої спроможності за МҐЕ бурової палі-колони Білоцерківського комбінату шин (рис.1), результати статичних досліджень якої наведено в [4]. Будівельний майданчик на глибину 12-13 м складений лесоподібними суглинками і супісями II типу по просадковості, які підстиляються моренними суглинками. Бурова паля-колонна довжиною в ґрунті 12.9 м, діаметром стовбура 900 мм, розширена п'ята (камуфлет) – 1900 мм, верхнє розширення – 1200*1600*1800 мм. (рис.2). Граничне навантаження згідно експериментальних досліджень склало 5500 кН. При $S_{\text{граничне}} = 8 \text{ см}$.

Впровадження цього проекту знизило кошторисну вартість в порівнянні із запропонованими раніше забивними палями 30*30 см довжиною 12 м на 40 %, трудомісткість виготовлення зменшилась в 2.8 рази, об'єм земляних робіт зменшився в 6.7 рази, витрати бетону – на 23 %, арматури – на 59 %. Саме тому є актуальним напрацювання сучасного методу розрахунку такого виду фундаментів для забезпечення ними міцності та стійкості споруд. Тим більше, що проблема моделі ґрунтової основи, що забезпечує достатню відповідність між результатами розрахунку і дійсністю, все ще не вирішена. Сучасний математичний апарат механіки ґрунтів заснований на рішеннях теорії пружності і теорії граничної рівноваги. Етап пружно-пластичного деформування від кінця пружної стадії до втрати стійкості не охопений розрахунковими моделями. В той же час резерви пружно-пластичної зони дозволяють збільшити навантаження на фундаменти тоді, коли осідання пружної стадії не досягають гранично допустимого для даної споруди значення. Основна вимога розрахунку основ по другому граничному стану є в тім, що розрахункова деформація основи не має перебільшувати його граничну величину, яка гарантує експлуатаційну придатність споруди: $S_{\text{прозрах.}} \leq S_{\text{граничне}}$.

Визначальні співвідношення

В літературі неодноразово відмічалась необхідність напрацювання розрахункової моделі, що дозволяє враховувати одночасово широкий набір реальних властивостей ґрунту, і також таких, що обумовлені його дискретністю.

При розрахунках ґрунтових основ широко використовуються моделі лінійно-деформованого середовища і теорії граничної рівноваги, які взаємо виключають одна одну. Перша заснована на допуску, що ні в одній точці ґрунту нема стану граничної рівноваги, а друга – навпаки, що він є у всіх її точках. В дійсності в основах споруд в наявності зони як дограничного, так і граничного напруженого стану ґрунту.

Для використання нормативних положень допустимих деформацій споруд необхідні методи розрахунку, що дозволяють визначати нелінійні осідання.

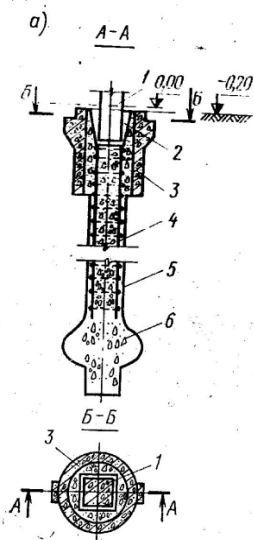


Рисунок 1 – Конструкція бурової опори-колони

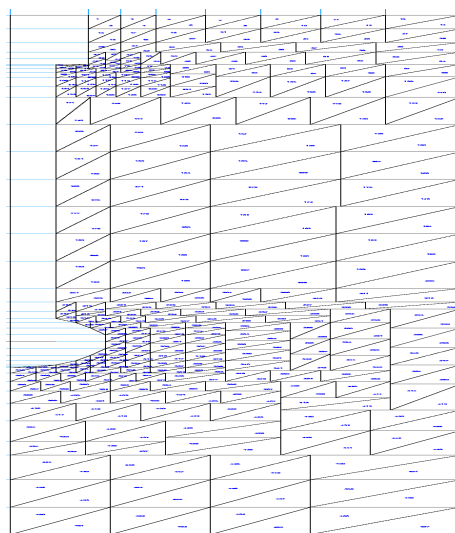


Рисунок 2 – Дискретизація навколопальнової ґрунтової основи бурової опори-колони L=12.9 м з розширеннями

Для цього бажано використання пружно-пластичної (змішаної) задачі. При навантаженнях, близьких до граничних (більше 0.8 частини від граничних) рішення змішаної задачі, яка повніше характеризує поведінку ґрунту, встановлює в пластичних областях сильну некоаксиальність тензорів напружень і деформацій.

Для обґрунтування визначення несучої спроможності бурової опори-колони з розширеннями в області п'яти та в верхній частині (рис.2) використано числовий МГЕ. Проектування поведінки ґрунтів під навантаженням пов'язане з необхідністю аналізу складних фізичних процесів ущільнення та переупакування частинок ґрунту, математичним описанням цих процесів є неголономні диференційні рівняння в частинних похідних. В роботі розв'язок заснований на основі інтегрального рівняння числового МГЕ [1,3], який є синтезом статичних, геометричних, фізичних рівнянь:

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

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; u, p – шукані вектори переміщень та напружень на границі фундаментної конструкції; інтеграл по області Ω (Ω – активна зона навколо фундаментної ґрунтової основи) включає вектор пластичних деформацій ε^p ; Γ – границя дослідного об'єкта; u^*, p^* – ядра (1), сингулярні фундаментальні рішення, використано рішення Р. Міндліна, що

відповідають одиничним взбуджуючим впливам в півпросторі [1, 3]. Оскільки фундаментальне рішення задовольняє граничним умовам на вільній від напружень поверхні півпростору потрібно дискретизувати лише граничну поверхню стикання фундаментної конструкції та ґрунту.

МГЕ дає можливість розчленувати 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.

При моделюванні в роботі поведінки під навантаженням бурової опори-колони враховано пружно-пластичну стадію роботи ґрунту. Тіла, що ущільнюються (в даному випадку ґрунт), мають особливості механічної поведінки: гідростатичний тиск може здійснювати вплив на формозміну, а дотичні напруження можуть впливати на ущільнення – це проява ефектів дилатансії. Наявність пор в ґрунті дає можливість отримувати свободу руху. З місць тимчасової дислокації частинки ґрунту можуть переміщуватись в пори. При ущільненні ґрунту зменшується поверхнева енергія. Не дивлячись на великий різновид підходів до вивчення деформованого стану ґрунтового дискретного середовища, найбільш коректною аж до теперішнього часу залишається запропонована Д. Друкером і В. Прагером (1952) теорія пластичної течії.

Використана в роботі методика дослідження НДС ґрунтової основи базується на теорії пластичності течії в формі неасоційованого закону пластичної течії, який описує роботу ґрунту на після граничній стадії деформування:

$$d\varepsilon_{ij}^p = \frac{dF}{d\sigma_{ij}} d\lambda, \quad F \neq f \tag{2}$$

та дилатансійних співвідношеннях В. Н. Ніколаєвського, І. П. Бойка [5,2], методу пружних рішень Ільюшина. В (2) F - пластичний потенціал – така функція напружень, частинна похідна від якої по σ_{ij} пропорційна приросту пластичних деформацій $d\varepsilon_{ij}^p$, $d\lambda$ - коефіцієнт пропорційності. Функція F визначається лише в точках миттєвої поверхні текучості.

При неасоційованому законі пластичної течії характеристики поля напружень і швидкостей деформацій не співпадають, що відповідає саме класу задач течії гранульованих ґрунтових середовищ.

За умову проходу граничного стану взято критерій Мізеса-Шлейхера-Боткіна [2,3], який в просторі головних напружень подається поверхнею із циліндричної та конічної частин (рис.3):

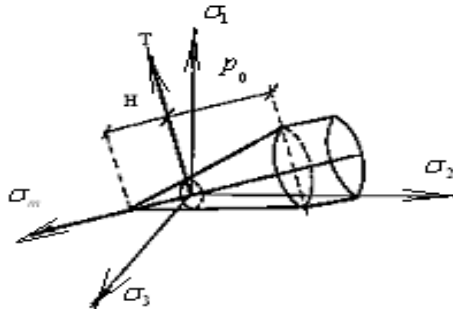


Рисунок 3 – Модифікований критерій пластичності Мізеса-Шлейхера-Боткіна в координатах головних напружень

$$\begin{cases} f = T + \sigma_{окт} \cdot tg\psi - \tau_s = 0 & \text{при } \sigma_{окт} \leq p_0 \\ f = T + p_0 \cdot tg\psi - \tau_s = 0 & \text{при } \sigma_{окт} > p_0 \end{cases}, \tag{3}$$

де T – інтенсивність дотичних напружень (інтенсивність девіатора напруг), $\sigma_{окт}$ – 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. 3).

В якості додаткової умови 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 В. М. - Бойка І. П. [5, 2]:

$$d\varepsilon_{iarp}^p = \Lambda(\chi) \cdot d\gamma^p \quad (4)$$

де $d\varepsilon_{iarp}^p$ – приріст непружних змін об’єму, що супутні зсуву;

$d\gamma^p$ – скалярний еквівалент приросту зсувної пластичної деформації на октаедричній площині (приріст інтенсивності зсуву). Λ – швидкість дилатансії, χ – параметр зміцнення ґрунтового середовища, прийнято щільність ґрунту ρ , яка є своєрідною пам’яттю ґрунту.

Математична реалізація процесу прогнозування несучої спроможності фундаменту за МГЕ передбачає дискретизацію граничної поверхні фундаментної конструкції та активної зони ґрунту граничними елементами, рис. 2, активну зону основи дискретизували 467 трикутні осередки. Центр кожного ГЕ вибирався в якості вузлової точки. Значення шуканої функції (напруження) рахувались постійними в межах кожного відрізка і рівним значенню в вузлі.

Якщо щільність ґрунту в n -му осередку активної зони ґрунту сягала максимального значення критичної величини щільності (згідно модифікації дилатансійної теорії І. П. Бойка [2]), то деформування ґрунту рахувалось подібним роботі суцільного середовища. Для описання цього випадку роботи ґрунту використовується циліндрична частина критерію (циліндр Мізеса). В межах зміни щільності ґрунту при його навантаженні в якості поверхні текучості (рис.3), використано конічну поверхню – критерій Мізеса-Шлейхера-Боткіна.

В розрахунок взято значення восьми фізико-механічних показників ґрунтової основи будівельного майданчика (модуль деформації E , коефіцієнт Пуассона ν , щільність ґрунту ρ , зчеплення c , кут внутрішнього тертя φ , межа переходу ґрунту в пластичну стадію P_0 – рис.3):

$$E=20570 \text{кПа}, \nu=0.32, \rho=1.814 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}, \rho^{\min}=1.67 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}, \rho^{\max}=2.2 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}, c=5.4 \text{кН}, \varphi=0.325 \text{рад}, c=11 \text{кН}, p_0=-1800 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$$

Для отримання розв’язку нелінійної задачі процесу деформування основи бурової опори-колони з розширеннями використано еволюційний алгоритм рішення, який базується на кроковому методі О. А. Ільюшина – на наступному кроці використовуються дані з попереднього кроку. На кожному кроці навантаження в кінці ітерації визначались напруження та проводилось порівняння з критерієм пластичності (тобто, з умовою міцності Мізеса-Шлейхера-Боткіна, яка розглядає напруження на октаедричній площині). Робота ґрунту в нелінійній стадії моделювалась дилатансійною теорією співвідношень В. Н. Ніколаєвського, І. П. Бойка [5,2] і до основних

фізико-механічних характеристик ґрунту додався коефіцієнт дилатансії $\Lambda = \frac{dV}{d\gamma}$ – швидкість деформування ґрунту в граничному стані. Відмічений вперше О. Рейнольдсом в 1885 р. ефект дилатансії (зміна об’єму, що супутня зсувним деформаціям) характерний для незворотнього деформування ґрунтів.

В пружній області роботи ґрунту ($f(\sigma_{ij}) < 0$) прирости пружних деформацій $d\varepsilon_{ij}^e$ визначались із закону Гука.

Приріст повних деформацій ґрунту складався із суми пружних та пластичних приростів:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (5)$$

Приріст пластичних деформацій визначався згідно (4).

Методика дає можливість відслідковувати НДС ґрунтової основи на всіх етапах навантаження та отримати графік роботи фундаментної конструкції «навантаження-осідання».

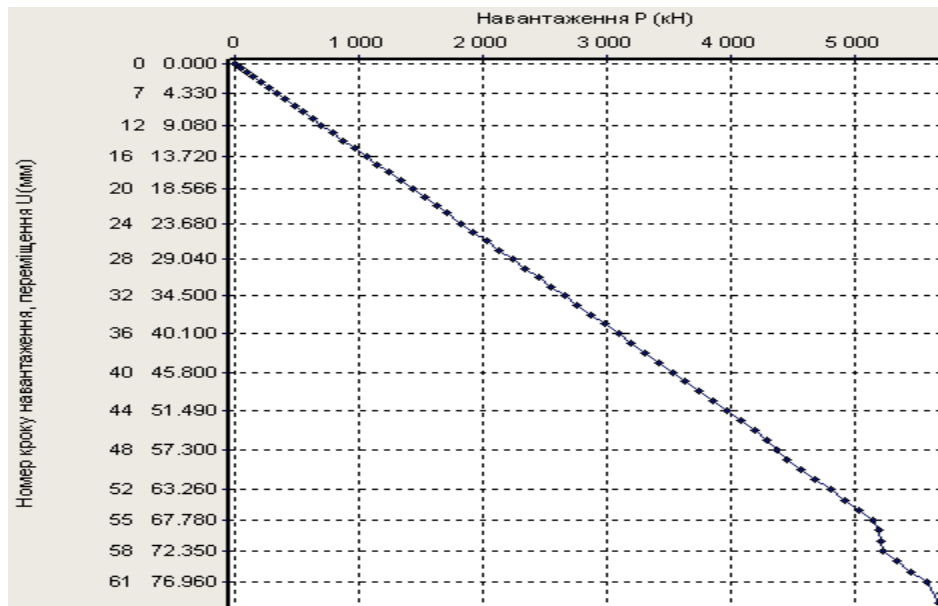


Рисунок 4 – Графік “навантаження – осідання” бурової опори-колони L=12,9 з розширеннями

Для відпрацювання параметрів алгоритму та оцінки похибок результати числового за МГЕ дослідження порівняно з експериментом. При осіданні $s=8$ см. згідно натурального експерименту [4] величина навантаження склала $P=5500$ кН. Згідно числових досліджень за МГЕ при $s=8$ см. величина навантаження склала $P=5610$ кН.

Висновки

1. Дискретизація та квантування неперервних процесів – це складові прийняття рішень в багатьох складних системах. Запропонована концепція восьми параметричної математичної моделі дозволяє враховувати в більшій степені всю складність ґрунтових умов будівельного майданчика. Використання запропонованої дилатансійної моделі дає можливість ще на стадії проектування прогнозувати стан основи споруди в різних інженерно-геологічних умовах, що дозволяє підняти якість проектного розрахунку, можливість збільшити термін експлуатації будівлі шляхом регулювання її НДС. Вирішення цього питання має як наукове так і прикладне рішення.

2. Головний шлях розвитку механіки ґрунтів – дослідження пружньо-пластичних дилатансійних моделей і їх удосконалення на основі порівняння з експериментом.

3. Перспективним шляхом розрахунку основ фундаментних конструкцій по двох граничних станах є використання співвідношень теорії пластичної течії, так її математичний апарат дозволяє відобразити в розрахунках властиву ґрунтам неоднорідність зв'язку між $\sigma - \varepsilon$ як в дограничній області, так і в області граничного стану.

4. Одним із ефективних шляхів прискорення технічного прогресу в будівництві є впровадження в практику актуальних сучасних методів розрахунку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бреббиа К, Теллес Ж, Вроубел Л. Методы граничных элементов. Москва: 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. Моргун А.С. Теория пластичной течи в механике грунтов / А.С. Моргун. – Винница, ВНТУ. – 2013. – 108 с.
4. Романов Д.А. Проектирование и устройство буровых опор-колон. – М.: Стройиздат. ОФМГ № 3. – 1978. – С.6-8.
5. Николаевский В. Н. Современные проблемы механики грунтов // Определяющие законы механики грунтов / В.Н. Николаевский. – М.: Стройиздат, 1975 – С. 210 – 227.

REFERENCES

1. Brebbia K, Telles Zh, Vroubel L. Metody hranychnykh elementov. Moskva: Myr, 1987.
2. Boiko Y.P. Teoretycheskye osnovy proektyrovaniya svainykh fundamentov na uprugoplastycheskom osnovanyu / Y.P. Boiko. Sb. KYSY. «Osnovaniya y fundamenti». – 1985. - №18, S. 11-18.
3. Morhun A.S. Teoriia plastychnoi techii v mekhanitsi gruntiv./ A.S. Morhun – Vinnytsia, VNTU. – 2013 – 108s.

4. Romanov D.A. Proektyrovanye u ustroistvo burovnykh opor-kolon. M.: Stroiyzdat. OFMH № 3, 1978, S.6-8.
 5. Nikolaevskiy V. N. Sovremennyye problemy mekhanyky hruntov // Opredelianiushchye zakony mekhanyky hruntov / V.N. Nikolaevskiy. – M.: Stroiyzdat, 1975 – S. 210 – 227.

Моргун Алла Серафимівна – завідувач кафедри будівництва, міського господарства та архітектури; Вінницький національний технічний університет, e-mail: alla@morgun.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4701-339x>.

Меть Іван Миколайович – доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури; Вінницький національний технічний університет, e-mail: vanmet@ukr.net.

Задорожнюк Віолета Олегівна – аспірант кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, e-mail: zadorozhnyuk.vita@ukr.net.

**A. Morgun
I. Met
V. Zadorozhnyuk**

FORECASTING THE DISPERSION SOIL BEHAVIOR IN THE BASIS OF THE DRILL SUPPORT-COLUMNS BY THE MBE METHOD

Vinnitsa National Technical University

At present, the construction of frame buildings is carried out on ordinary pillar foundations, the device of which is associated with the need to carry out a large amount of excavation, significant costs for the manufacture of formwork and preparation of concrete mix in cramped conditions. Reduced labor costs and savings can be obtained by using foundations from bored piles and the installation of reinforced concrete grouting, and this also requires fragments of pits, additional outlets of reinforcement, waste of materials. In addition, concreting of grillages with a technological break after the installation of piles increases the construction time.

More economical is the use of single drill support columns. They have a larger trunk diameter than brown stuffed piles and higher bearing capacity. The extensions at the top of the trunk increase the ground resistance in the horizontal direction due to the developed lateral surface, and also favors the use of vertical loading to load the vipore prism, which is adjacent to the upper part of the support (by analogy with pyramidal piles). Expanded plate raises the bearing capacity on the ground to the effect of vertical loading.

The increase in industrial and civil construction and the need to design reliable and economical structures require the development of modern forecasting methods for determining the bearing capacity of this type of foundations in order to ensure the strength of structures. The development and implementation of more advanced and economical methods of calculating and designing foundation structures aimed at the development and implementation of their reserves is an important and relevant problem of building science. Taking into account the nonlinearity of the deformation of foundations in conjunction with the principles of their optimal design allows us to increase the adequacy of the calculations and obtain a significant economy of concrete and reinforcement.

In the work on the numerical method of boundary elements (SEM) from the positions of the mechanics of a dispersed elasto-plastic medium, the concepts of predicting the bearing capacity of drill columns with extensions in the upper and lower parts are laid out. The solution of the nonlinear problem of predicting the bearing capacity of drill-pillars with extensions is of both scientific and practical importance and is directly related to the analysis of the ground VAT.

Key words: drill support-column, pile with extensions, stress-strain state, dispersion, bearing capacity, boundary element method.

Morgun Alla S. – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of construction, urban economy and architecture; Vinnitsa national technical university, e-mail: alla@morgun.com.ua.

Met Ivan M. - Cand. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of construction, urban economy and architecture; Vinnitsa national technical university, e-mail: vanmet@ukr.net.

Zadorozhniuk Violeta O. - Post-graduate student of the Chair of construction, urban economy and architecture; Vinnitsa national technical university, e-mail: zadorozhnyuk.vita@ukr.net.

**A. С. Моргун
И. М. Меть
В. А. Задорожнюк**

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ В ОСНОВАНИИ БУРОВЫХ ОПОР-КОЛОН С МГЭ

Винницкий национальный технический университет

На настоящее время сооружение каркасных зданий проводится на обычных столпчатых фундаментах, устройство которых повязано с необходимостью выполнения большого объема земляных работ, значительными издержками на изготовление опалубки и подготовки бетонной смеси в стеснённых условиях. Снижение трудозатрат и экономию можно получить при использовании фундаментов из буров набивных свай и устройства железобетонных ростверков, а это также требует отрывки котлованов, дополнительных затрат арматуры, затрат труда материалов. Кроме того, бетонирование ростверков с технологическим перерывом после устройства свай увеличивает сроки строительства.

Более экономичным есть использование одиночных буровых опор-колон. Они имеют больший диаметр ствола чем буров набивные сваи и более высокую несущую способность. Розширения у верхней части ствола увеличивает сопротивление грунта в горизонтальному направлению за счет развитой боковой поверхности, а также благоприятствует использованию вертикального нагружения для пригрузки призмы вилора, которая примыкает к верхней части опоры (по аналогии с пирамидальными сваями). Розширенная плита поднимает несущую способность по грунту на действие вертикального нагружения.

Увеличение объёмов промышленного и гражданского строительства и необходимость проектирования надёжных и экономичных сооружений требует разработки современных прогнозных методов определения несущей способности такого вида фундаментов с целью обеспечения прочности сооружений. Нарботка и внедрение более совершенных и экономичных методов расчета и проектирования фундаментных конструкций, направленных на выявление и реализацию их резервов есть важной и актуальной проблемой строительной науки. Учёт нелинейности деформирования фундаментов в союзе с приемами их оптимального проектирования разрешает поднять адекватность расчетов и получить существенную экономию бетона и арматуры.

В работе за числовым методом граничных элементов (МГЭ) з позиций механики дисперсной упруго-пластичной среды выложены представления прогнозирования несущей способности буровых опор-колон с розширениями в верхней и нижней частях. Решение нелинейной задачи прогнозирования несущей способности буровых опор-колон з розширениями имеет как научное так и практическое значение и непосредственно повязано с анализом НДС грунта.

Ключевые слова: буровая опора-колонна, свая с розширениями, напряженно-деформированное состояние, дисперсия, несущая способность, метод граничных элементов.

Моргун Алла Серафимовна - заведующий кафедрой строительства, городского хозяйства и архитектуры; Винницкий национальный технический университет, e-mail: alla@morgun.com.ua.

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

Задорожнюк Виолетта Олеговна - аспирант кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры; Винницкий национальный технический университет, e-mail: zadorozhnyuk.vita@ukr.net.