

БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

УДК 519.635:624.044:624.15

DOI 10.31649/2311-1429-2019-2-6-11

А. С. Моргун
А. А. Тимченко**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМАТИВНОСТІ
БУРОНАБИВНИХ ПАЛЬ ЗА МГЕ**

Вінницький національний технічний університет

Проектування надійних і економічних сучасних будівельних об'єктів, які являють собою великомасштабні споруди є актуальним, тому вірне використання законів механіки ґрунтів особливо важливо при їх проектуванні і будівництві. Механіка ґрунтів – це механіка природних дисперсних (мілко подріблених) тіл, включає як закони теоретичної механіки (механіки твердих абсолютно нестикуваних тіл) так і закономірності будівельної механіки (закони пружності, пластичності). Успіхи фундаментобудування в цілому зобов'язані його науковій базі – механіці ґрунтів.

Граничний напружений стан ґрунту в даній точці відповідає такому напруженому стану, коли незначний додатковий силовий вплив порушує існуючу рівновагу і приводить ґрунт в нестійкий стан, в масиві ґрунту виникають поверхні ковзання, розриви, просідання і порушується міцність між його частинками і агрегатами. Такий напружений стан ґрунтів потрібно розглядати як недопустимий при будівництві на них споруд. Саме тому для інженерної практики дуже важливо вміти оцінювати максимально можливе навантаження на ґрунт, при якому він буде ще знаходитись в рівновазі, тобто не буде втрачати міцність і стійкість.

У зв'язку із зростанням об'єму використання буронабивних палей назріла необхідність напрацювання сучасних прогностичних методів визначення їх несучої спроможності з залученням ЕОМ, адже основною задачею при проектуванні споруд є інженерна оцінка несучої спроможності ґрунтових основ. В роботі за числовим МГЕ змодельовано процес деформативності буронабивної палі. Питання міцності (несучої спроможності), стійкості ґрунтів є задачами загальної теорії граничної рівноваги, початок якої було покладено ще трудами М. Кулона та Л. Прантля.

Ключові слова: буронабивна палія (БНП), напружено-деформований стан (НДС), дисперсія, несуча спроможність, метод граничних елементів (МГЕ).

Вступ

У зв'язку з розвитком будівництва споруд із значними зосередженими навантаженнями (на колону від 150 кН до 100000 кН) а також із забудовою в мало зручних і затиснених будівельних майданчиках спостерігається тенденція до збільшення об'ємів буронабивних палей (БНП), які часто дозволяють найбільш просто і економічно розв'язувати питання улаштування фундаментів без суттєвих динамічних впливів на існуючі будівлі. Тому

особливістю сучасного фундаментобудування є зміщення центра ваги на буронабивні палі, які є ефективніше за забивні, мають підвищену несучу спроможність, знижені витрати металу. Буронабивна технологія дозволяє забезпечити заглиблення на конкретну позначку.

Вибір для дослідження буронабивної палі пояснюється їх широким розповсюдженням в цивільному та промисловому будівництві та їх техніко-економічною перспективністю. Одним із ефективних шляхів прискорення технічного прогресу в будівництві є впровадження в практику актуальних сучасних методів розрахунку.

В прикладних технічних науках прогрес неможливий без переходу до математичного процесу. 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 охопчений 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.

В літературі неодноразово відмічалась необхідність напрацювання розрахункової моделі, що дозволяє враховувати одночасово широкий набір реальних властивостей ґрунту, і також таких, що обумовлені його дискретністю. Деформації дисперсних середовищ здійснюються при дислокації твердих частинок в поровий простір, що неминуче приводить до одночасової зміни об'єму і форми, це проява ефектів дилатансії матеріалу.

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.

Визначальні співвідношення

Реальні задачі геомеханіки моделюються диференційними рівняннями в частинних похідних і зводиться до класу крайових задач (1), точне рішення яких вдається отримати лише в не багатьох часткових випадках. Характерною особливістю крайової задачі є наявність деякої області R, що лежить всередині області С. Частина параметрів задається на границі С у вигляді граничних умов, решта параметрів визначається в результаті розрахунку.

Аналітичне рішення крайової задачі може бути отримано, коли дослідна область R – однорідна, вихідні диференціальні рівняння – лінійні, тобто, коли можна застосовувати принцип суперпозицій. В реальних задачах при оцінці можливих ситуацій ця умова часто не виконується і аналітичне рішення отримати неможливо. Тоді рішення шукають з залученням числових методів МСЕ, в основі якого лежить варіаційне числення, чи МГЕ (в основі лежать інтегральні рівняння [5]).

В роботі проведено числові дослідження за МГЕ визначення несучої спроможності по ґрунту буронабивної палі L=6.85 м, d=0.8 м дев'ятиповерхової будівлі. Розрахункове інтегральне рівняння МГЕ – (1). Інженерно геологічні умови будівельного майданчика та схема дискретизації активної зони БНП подано на рис. 1 а, б.

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

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^* – сингулярні фундаментальні рішення Р. Міндліна, що відповідають одиничним взбурюючим впливам в півпросторі [4, 5].

Від того наскільки достовірно визначені інженерно-геологічні показники ґрунту, що рекомендуються до розрахунку, в основному і залежать результати проектних рішень та їх надійність. Показники інженерно-геологічних характеристик ґрунтів в табл. 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики ґрунту

Вид ґрунту	γ_s , кН/м ³	γ_{ss} , кН/м ³	W	W _L	W _p	I _p	I _L	e	S _r	C, кПа	φ , °	E, МПа	R ₀ , кПа
1. Насипний ґрунт	17,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2. Супісок вологий, пластичний	18,7	27	0.21	0.23	0.18	0.05	0.6	0,75	0.76	11	21	10	190
3. Пісок середньої крупності, середньої щільності, маловологий	17,6	26,5	0,018	-	-	-	-	0,587	0,22	$\frac{1}{0}$	$\frac{37}{34}$	35	450
Рівень ґрунтових вод – 17,9 м.													

Для числового моделювання багатшарова основа замінювалась еквівалентним квазіоднорідним середовищем із середньозваженими в рамках активної зони характеристиками фізико-механічних властивостей ґрунтів. При розрахунку враховувалось, що паля і ґрунт працювали в умовах осевої симетрії.

Як впливає із результатів компресійних і штампових досліджень ґрунтів, вони деформують нелінійно. Перспективним шляхом розрахунку основ фундаментних конструкцій по двох нормативних граничних станах є використання співвідношень теорії пластичної течії, так як її математичний апарат дозволяє відобразити в розрахунках властиву ґрунтам нелінійність зв'язку між $\sigma - \varepsilon$ як в дограничній області, так і в області граничного стану.

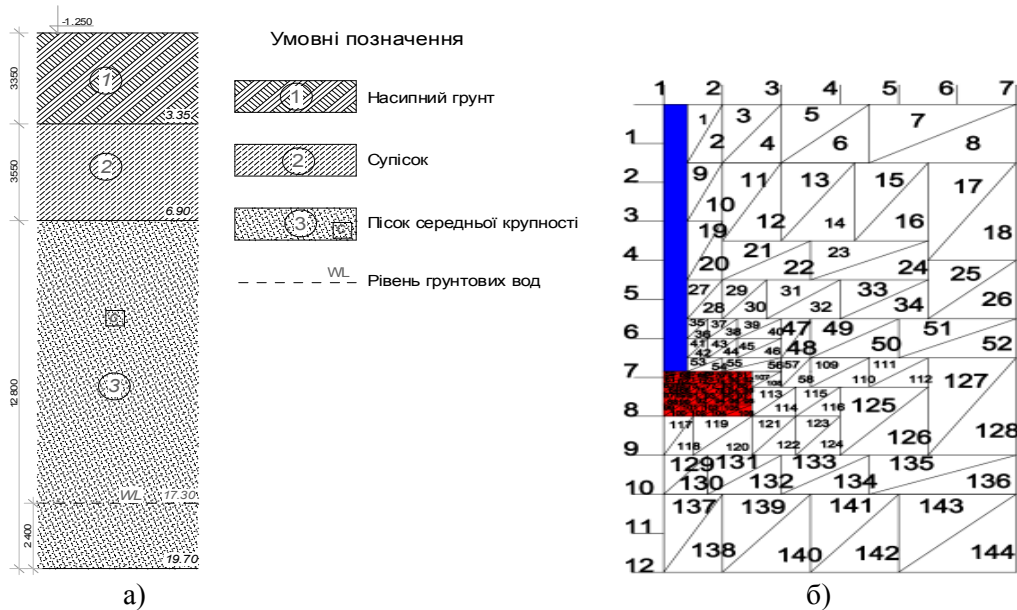


Рисунок 1 – а) – інженерно-геологічні шари ґрунту; б) – дискретизація навколо пальової активної зони ґрунтової основи

Теорія пластичної течії засновується на принципі максимуму Мізеса та швидкості дисипації механічної роботи, визначає приріст компонентів тензора пластичних деформацій пропорційно градієнту деякої функції, яку називають пластичним потенціалом і ототожнюють з функцією навантаження (із асоційованого закону пластичної течії):

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

Принцип дисипації механічної роботи (принцип максимуму Мізеса):

$$\sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^p > \sigma_{ij}^* d\varepsilon_{ij}^p, \tag{3}$$

де σ_{ij} – дійсні значення компонент напружень, що відповідають полю деформацій ε_{ij}^p . σ_{ij}^* – компоненти любого допустимого функцією навантаження напруженого стану $F(\sigma_{ij}^*, \varepsilon_{ij}^p, T, \chi) \leq 0$. В теорії пластичної течії поряд з повними деформаціями ε_{ij} розглядаються незворотні пластичні ε_{ij}^p і пружні деформації ε_{ij}^e :

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^e \tag{4}$$

Компоненти пружних деформацій пов'язані з законом Гука. Для визначення приростів деформацій пластичного відгуку ґрунтів використано неасоційований закон пластичної течії (2) та 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 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. [2,3]:

$$d\varepsilon_{шар}^p = \Lambda \cdot d\gamma. \quad (5)$$

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

Граничний напружений стан ґрунту визначався в формі октаедричної теорії міцності Мізеса-Шлейхера-Боткіна.

Результати розрахунку подано на рис. 2. Таким чином, запропонована пружно пластична модель ґрунту, що використовує умову міцності Мізеса-Шлейхера-Боткіна та неасоційований закон пластичної течії є ефективною нелінійною моделлю, що дозволяє розрахунковим шляхом оцінити вплив раніше визначених та зафіксованих в дослідях і натурних спостереженнях зон підвищеної деформативності основ на осідання будівель і зусилля в фундаменті та враховувати їх наявність ще при проектуванні.

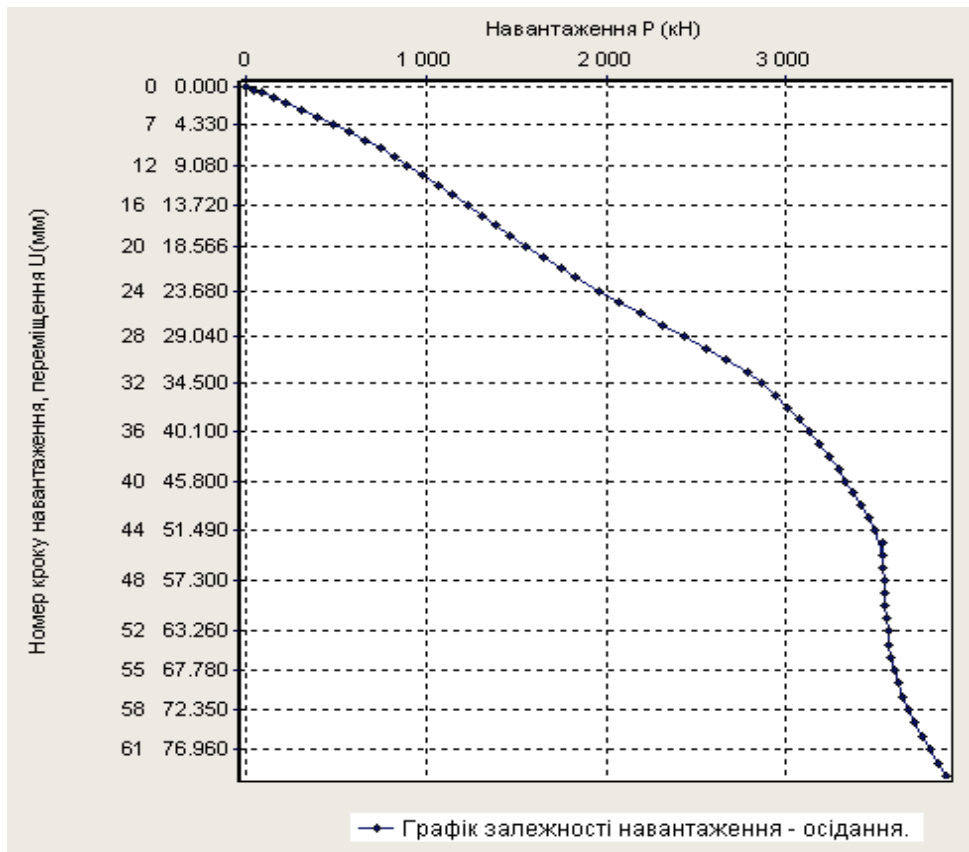


Рисунок 2 – Прогноз за МГЕ процесу деформування БНП L = 6.85 м, d = 0.8 м

Це може привести до підняття несучої спроможності в порівнянні з традиційним розрахунком. В роботі проведено визначення несучої здатності розглянутої буро набивної палі згідно нормативних документів [1].

Неврахування неоднорідності ґрунтів в інженерних нормативних розрахунках приводить до введення коефіцієнтів запасу, та степінь цієї компенсації для різних ґрунтових основ залишається поки що вельми не визначеною.

Несучу здатність палі визначено за нормативною формулою (4.1) [1].

Необхідні для розрахунку параметри: $\gamma_c = 1$, $\gamma_{cR} = 1$, $\gamma_{cf} = 0,7$ [1, табл. 5]; Площа вістря палі $A = \pi \cdot 0,8^2 / 4 = 0,5024$ (м²); Периметр бокової поверхні БНП $u = \pi \cdot 0,8 = 2,512$ (м); Розрахунковий опір ґрунту під нижнім кінцем бурової палі знайдено за таблицею 7 [1] $R = 980$ кПа при $H = 10,4$ м – глибина закладання нижнього кінця палі.

Для визначення розрахункового опору ґрунту по боковій поверхні палі ґрунтову товщу розділено на шари товщиною не більше 2 м. Обчислення виконано в таблиці 2.

Таблиця 2

Визначення несучої здатності буро набивної палі по боковій поверхні

№ шару	$H_{сер}, м$	$h_i, м$	$f_i, кПа$	$\gamma_{сф}$	$\gamma_{сф} f_i h_i, кН/м$	I_L
1	4,475	1,85	14,5	0,7	18,78	0,6
2	6,15	1,5	18,1	0,7	19	0,6
3	7,9	2,0	61,8	0,7	86,52	Пісок середньої крупності
4	9,65	1,5	64,5	0,7	67,7	Пісок середньої крупності

$$\Sigma \gamma_{сф} f_i h_i = 192 \text{ кН/м}$$

Сумарна несуча здатність БНП:

$$F_d = I(1 \cdot 980 \cdot 0,5024 + 2,512 \cdot 192) = 974.66 \text{ (кН)}$$

Висновок

1. Оскільки про навантаженні $P=975 \text{ кН}$, $s=0.9 \text{ см}$ згідно графіка нелінійних досліджень (рис. 2) паля не досягає допустимих деформацій ($s \leq 8 \text{ см}$), врахування нелінійності роботи БНП дозволяє в даному випадку в 2.5 раз підняти навантаження на палю, що сприятиме економічному ефекту.

2. Нові методи розрахунку нелінійно деформованих основ дають можливість використання переваг розрахунку основ по деформаціям.

3. Вирішення нелінійної задачі прогнозування несучої спроможності БНП має як наукове так і прикладне значення та тісно пов'язане з аналізом НДС ґрунту. Із результатів роботи видно, що подібне технічне рішення дозволяє суттєво скоротити терміни і кошторисну вартість спорудження підземної частини висотних будівель з дотриманням вимог надійності і довговічності споруд.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.2.1-10-2009. Основи і фундаменти будівель та споруд «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК) Київ-2010.
2. Николаевский В.М. Механические свойства грунтов и теория пластичности. Итого науки и техники. Механика твердых деформируемых тел. М. ВИНТИ. 1972.т.6.
3. Бойко И. П. Теоретические основы проектирования свайных фундаментов на упругопластическом основании /И. П. Бойко. Сб. КИСИ. «Основания и фундаменты». – 1985. - №18, С. 11-18.
4. Моргун А. С. Теорія пластичної течії в механіці ґрунтів / А. С. Моргун – Вінниця, ВНТУ. – 2013 – 108с.
5. Бреббия К. Методы граничных элементов / Бреббия К., Теллес Ж., Врорубел Л. – М.: Мир, 1987.- 524 с.

REFERENCES

1. DBN V.2.1-10-2009. Osnovy i fundamenti budivel ta sporud «Derzhavnyi naukovo-doslidnyi instytut budivelnykh konstrukttsii» (NDIBK) Kyiv-2010.
2. Nikolaevskiy V. M. Mekhanycheskiye svoistva hruntov y teoryia plastychnosty. Ytoho nauky y tekhnky. Mekhanika tverdyykh deformiruemyykh tel. M. VYNYTY. 1972.t.6.
3. Boiko Y. P. Teoretycheskiye osnovy proektyrovaniya svainykh fundamentov na upruhoplastycheskom osnovanyu / Y. P. Boiko. Sb. KYSY. «Osnovaniya y fundamenti». – 1985. - №18, S. 11-18.
4. Morhun A. S. Teoriya plastychnoi techi v mekhanitsi gruntiv / A. S. Morhun – Vinnytsia, VNTU. – 2013 – 108s.
5. Brebbyia K. Metody hranychnykh elementov / Brebbyia K., Telles Zh., Vroubel L. – M.: Myr, 1987.- 524 s.

Моргун Алла Серафимівна – д.т.н., професор, завідувач кафедри будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету.

Alla@morgun.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4701-339x>.

Тимченко Аліна Анатоліївна – магістрант кафедри будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету.

А. С. Моргун
А. А. Тымченко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ БУРО НАБИВНИХ СВАЙ ЗА МГЕ

Винницький національний технічний університет

Проектирование надёжных и экономичных современных строительных объектов, которые являются собой большемасштабные сооружения, есть актуальным, поэтому правильное использование механики грунтов особенно важно при их проектировании и строительстве. Механика грунтов – это механика природных дисперсных (мелко раздробленных) тел, включает как законы теоретической механики (механики твёрдых абсолютно несжимаемых тел) так и закономерности строительной механики (законы пружности, пластичности). Успехи фундаментостроения в целом обязаны его научной базе – механике грунтов.

Граничное напряжённое состояние грунта в данной точке отвечает такому напряжённому состоянию, когда незначительное дополнительное влияние нарушает существующее равновесие и приводит грунт в неустойчивое состояние, в массиве грунта возникают поверхности скольжения, разрывы, просадка и нарушается прочность между его частицами и агрегатами. Такое напряжённое состояние грунтов необходимо рассматривать как недопустимое при строительстве на них сооружений. Именно поэтому для инженерной практики очень важно уметь оценивать максимально возможное нагружение на грунт, при котором он будет ещё находиться в равновесии, то есть, не будет терять прочность и устойчивость.

В связи с увеличением объёмов использования буронабивных свай созрела необходимость разработок современных прогнозных методов определения их несущей способности с привлечением ЭВМ, так как основной задачей при проектировании сооружений есть инженерная оценка несущей способностей грунтовых оснований. В работе за числовым МГЕ смоделировано процес деформативности буронабивной сваи. Вопросы прочности, несущей способности, устойчивости грунтов есть задачами общей теории граничного равновесия, начало которой было положено еще трудами М.Кулона, Л. Прантля.

Ключевые слова: буронабивная свая (БНС), напряжённо-деформированное состояние (НДС), дисперсия, несущая способность, метод граничных элементов (МГЕ).

Моргун Алла Серафимовна – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой строительства, городского хозяйства и архитектуры Винницкого национального технического университета.

alla@morgun.com.ua <https://orcid.org/0000-0002-4701-339x>.

Тымченко Алина Анатольевна – магистрант кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры Винницкого национального технического университета.

SIMULATION OF THE PROCESS OF DEFORMATION OF BROWN PILES FOR IGE

Designing reliable and economic modern construction projects, which are themselves large-scale structures, is relevant, so the proper use of soil mechanics is especially important when design and construction. Soil mechanics is the mechanics of natural dispersed (finely crushed) bodies, includes both the laws of theoretical mechanics (mechanics of solid and non-compressible bodies) and the patterns of structural mechanics (the laws of prognosis, plasticity). The success of foundation engineering as a whole is tied to its scientific base - soil mechanics.

The boundary stress state of the soil at a given point of overstrained such stress condition, when a slight additional effect of disturbs the existing balance and makes the ground in an unstable condition in the soil mass occur of the sliding surface, discontinuities, subsidence and broken strength between its particles and aggregates. Such a stress state of soils must be considered as invalid if construction on their facilities. Therefore, for engineering practice, it is very important to be able to estimate the maximum possible loading on the soil in which it will still be in equilibrium, i.e., will lose strength and stability.

In connection with increase in volumes use of bored piles is a necessity of developments of modern predictive methods for the determination of their carrying capacity with the involvement of computers as the main challenge in the design of structures is an engineering assessment of the load-bearing capacity of soil based ... In working on numerical BEM modeled the process of deformation of the bored SAI. Questions of strength, bearing capacity, stability of soils is a task of the General theory of limit equilibrium, the beginning of which was laid by the works of M. Coulomb, L. Prantl.

Key words: bored piles, the stress-strain state (SSS), the dispersion, carrying capacity, boundary element method (BEM).

Morgun Alla – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction, Urban Economy and Architecture of Vinnitsa National Technical University.

alla@morgun.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4701-339x>.

Timchenko Alina – Master's Degree in Department of Construction, Urban Economy and Architecture, Vinnitsa National Technical University.