

## БУДІВНИЦТВО

<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-144-3-7-12>

УДК 519.635:624.044:624.15

А. С. Моргун<sup>1</sup>  
Е. О. Мойсеєнко<sup>1</sup>

# ВИВЧЕННЯ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ЗУСИЛЬ В СТРІЧКОВИХ ПАЛЬОВИХ ФУНДАМЕНТАХ МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

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

*За числовим методом граничних елементів проведено дослідження несучої спроможності стрічкових однорядних пальових фундаментів з кількістю паль в стрічці від однієї палі до шести, проаналізовано характер розподілу сил тертя по боковій поверхні стрічкових пальових фундаментів, нормальних напружень під нижнім кінцем їх з метою прийняття оптимальної кількості паль в стрічці.*

*Пальові фундаменти відомі і широко використовуються в будівництві. В сучасному висотному будівництві їх широко застосовують замість розповсюджених раніше стрічкових фундаментів. Цьому сприяли такі фактори:*

- створення раціональної конструкції пальових фундаментів, в результаті чого вони стали рентабельними і конкурентоспроможними зі стрічковими фундаментами;*
- використання пальових фундаментів відповідає вимогам індустріальності, зниженню кошторисної вартості та трудомісткості будівництва;*
- масове будівництво споруд, які вимагають фундаментів з мінімальними загальними і нерівномірними осадками.*

*Це сприяло підвищенню цікавості до їх проектування та методів прогнозування їх поведінки під навантаженням. Перевагою пальових фундаментів є малі осідання, це вельми важливо для висотних споруд, яким властива велика жорсткість і, відповідно, велика чутливість до нерівномірних осідань. Не дивлячись на широке використання пальових фундаментів, ще недостатньо вивчені численні фактори, що впливають на несучу спроможність і осідання паль в їх роботі в складі різних пальових фундаментів в різних ґрунтових умовах. Це пояснюється надмірною складністю та трудомісткістю проведення натурних досліджень пальових фундаментів. Запропоновано новий метод з точнішими передумовами для описання деформативності найвживаніших в висотному будівництві пальових фундаментів. Отримані дані про закономірності зростання загального зусилля на фундамент зі збільшенням кількості паль і зміни середнього навантаження на палю в складі стрічкового однорядного пальового фундаменту. Крім того, стрічкові пальові фундаменти дозволяють зменшити кількість використаного матеріалу і вартість будівництва, що є досить важливим для інвестора. Здійснено порівняння числових досліджень з експериментальними даними за величиною несучої здатності стрічкових пальових фундаментів.*

**Ключові слова:** стрічковий пальовий фундамент, напружено-деформований стан, несуча здатність, метод граничних елементів, плоско-деформований стан.

### Вступ

Фундаменти є структурними елементами, які передають навантаження від споруди на ґрунтову основу. Для належної передачі цих навантажень, фундаменти повинні бути спроектовані таким чином, щоб запобігти їх надмірному осіданню та забезпечити достатню стійкість. Тому створення надійних, науково обґрунтованих методів визначення їх напружено-деформованого стану (НДС) є актуальною задачею фундаментобудування.

Наукова новизна роботи складається в дослідженні особливостей перерозподілу зусиль в стрічковому пальовому фундаменті (СПФ) саме для однорядного стрічкового фундаменту під несучу

стіну з відстанню між палями  $bd$  ( $d$  — діаметр палі). Необхідність розв'язання задач, пов'язаних з оцінкою міцності і деформативності ґрунтів визначається вимогами інженерної практики.

*Метою роботи є* напрацювання точніших передумов для описання перерозподілу зусиль в СПФ.

### Постановка задачі, визначальні співвідношення

Розрахунковим рівнянням стану для розв'язання задачі поведінки під навантаженням СПФ є інтегральне рівняння, отримане К. Бреббія [8]. Рівняння стану встановлює залежність між переміщеннями та напруженнями на границі дослідного об'єкта (палі).

Як відомо, числове інтегрування — це процес стійкіший, ніж числове диференціювання. Числовий метод граничних елементів (МГЕ) потребує використання ЕОМ і, що є загальним для сучасних наближених числових методів, зводить розрахункові рівняння до розв'язків СЛАР високих порядків.

Запис системи 15 диференціальних розрахункових рівнянь в узгодженнях про підсумовування Ейнштейна має такий вигляд [1], [2]:

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

де  $\sigma_{ij,j} + b_j = 0$  — статичні рівняння рівноваги (теорія напружень заснована на вимогах рівноваги);  $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$  — геометричні рівняння (вивчення деформацій являє собою по суті геометричний напрям аналізу, відомий під назвою теорія деформацій);  $\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl}$  — фізичні рівняння середовища (фізичні рівняння являють математичну ідеалізацію механізму поведінки матеріалу);  $u$  — заданий вектор переміщень на контактні границі фундаментної конструкції;  $p$  — шуканий вектор напружень на границі;  $u^*, p^*$  — ядра граничного рівняння чи функції впливу МГЕ, це двочкові функції, їх компоненти — переміщення та напруження довільної точки поля в напрямку « $i$ » (точка нагляду) від сили  $P = 1$ , прикладеної в  $j$ -му напрямку (джерелі). Прийнято рішення Р. Міндліна для переміщень та напружень, що відповідають одиничним збурювальним впливам ( $P = 1$ ) в півпросторі. Ядра інтегрального рівняння характеризують собою досліджуване середовище. Саме розв'язки Р. Міндліна тотожно задовольняють граничним умовам на границі (рівність нулю напружень на границі півпростору) і значно знижують обсяг обчислювальних робіт, необхідний для розв'язання задачі;  $c_{ij}$  — постійна, визначається з умов руху тіла як цілого, з'являється при зведенні крайової задачі до інтегрального рівняння (1) для отримання єдиного рішення;  $\Gamma$  — гранична поверхня фундаментної конструкції,  $\xi, x, \Omega$  — відповідно, точка збурення, точка нагляду та границя трикутних осередків активної зони ґрунту [1], [2].

Розв'язання граничних задач подаються, як такі, що випливають з принципів взаємності (теорема Бетті).

Фундаментальні розв'язки Р. Міндліна ( $u^*, p^*$ ) і є тим одиничним універсальним допоміжним станом принципу взаємності Бетті. Кожний інтеграл в рівнянні (1) — відображає роботу узагальненої сили одного стану на відповідних їм переміщеннях другого стану.

Числова реалізація розрахункового інтегрального рівняння МГЕ (1) для розв'язання задач про перерозподіл зусиль між палями СПФ в ґрунтовому півпросторі передбачає виконання таких основних етапів:

а) границя палі (бокова поверхня і нижній кінець) розбивались на низку постійних граничних елементів (ГЕ), на яких задавались переміщення;

б) для кожного граничного елемента визначались коефіцієнти матриці впливу МГЕ з використанням фундаментальних розв'язків Р. Міндліна для півплощини [2] та формувалась глобальна матриця впливу і вектор-стовбець вільних членів, які визначаються з граничних умов задачі;

в) визначаються невідомі контактні напруження по боковій поверхні та під вістряма паль шляхом розв'язку скомпонованої системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР);

г) шляхом інтегрування знайдених величин напружень визначається опір кожної палі і стрічкового фундаменту із заданим осіданням.

Розв'язання задачі виконували з такими *вихідними положеннями*:

1 — ґрунт вважається лінійно-деформованим тілом;

2 — навантаження передається ґрунту по боковій поверхні стрічкових пальових фундаментів і в площині нижніх кінців паль;

3 — границя активної зони знаходиться на глибині, де напруження від пального фундаменту не викликають залишкових деформацій ґрунту.

Довжина досліджуваних паль — 4,5 м, діаметр — 0,5 м, палі розташовані під несучими стінами на відстані одна від одної  $6d$ , тобто 3 м. Фізико-механічні характеристики глинистого ґрунту будівельного майданчика [4]:  $E = 21$  МПа;  $\nu = 0,42$ ;  $\rho_s = 2,74$  т/м<sup>3</sup>;  $c = 57$  КПа;  $\varphi = 18^\circ$ .

### Результати дослідження

Нормативне положення за відстані між палями в стрічці  $6d$  ( $d$  — діаметр палі) і більше, що за відстані між палями  $3-4d$  палі і затиснений між ними ґрунт можна розглядати як єдиний масив, уже не працює. Тому для визначення величини розрахункових навантажень на палі велике значення має виявлення закономірностей перерозподілу зусиль в СПФ з відстанями  $6d$  та більше, які найчастіше використовуються в будівельній практиці. З метою вивчення цих закономірностей проведені числові дослідження за МГЕ (який є дійовим числовим методом дослідження НДС основ) та характеру перерозподілу навантажень між палями в СПФ.

Результати взаємодії паль СПФ (дотичні напруження по бокові поверхні та нормальні напруження на вістрі паль) для кількості паль в стрічці 1, 3, 6 показано на рис. 1.

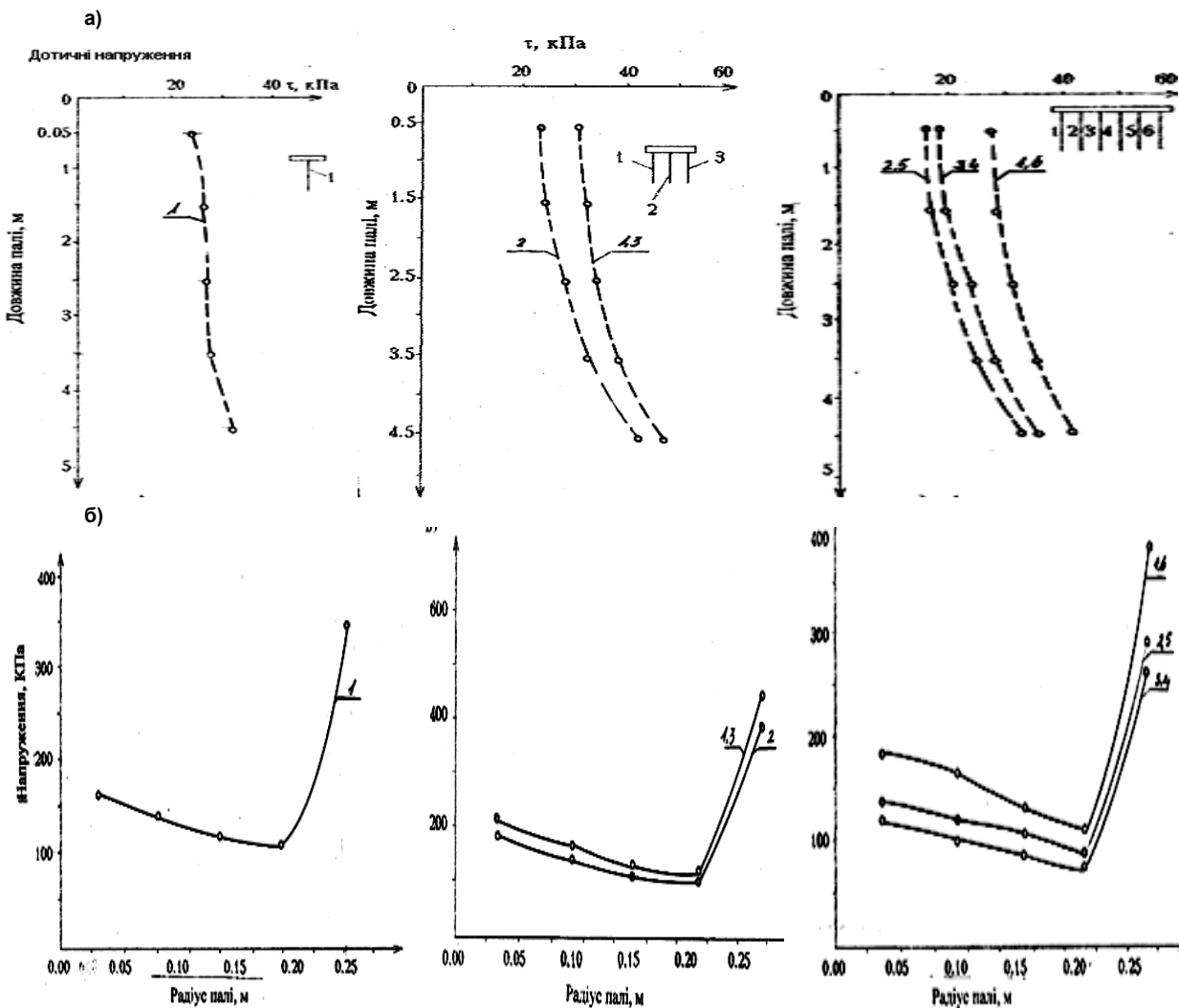


Рис. 1. Розподіл напружень між елементами СПФ за кількості паль відповідно 1, 3, 6:  
а — сили тертя по бокових поверхнях; б — нормальні напруження під нижнім кінцем

Для компоновки матриці впливу за МГЕ виконувався обхід всіх вузлів по ГЕ кожної палі СПФ і враховувався вплив всіх паль, що входять в склад СПФ. При цьому використовувались функції Р. Міндліна.

Аналіз графіків залежності розподілу дотичних напружень по довжині паль показує, що ці напруження розподіляються практично рівномірно по глибині і спостерігається деяке збільшення сил тертя поблизу нижнього кінця палі. Крім того, зі збільшенням кількості паль в складі фундаменту відбувається зниження сил тертя по боковій поверхні паль в складі стрічкового фундаменту в порівнянні з аналогічними величинами одиничної палі ( $NS = 1$ ).

Це не протирічить уявленням про характер роботи паль в складі стрічкового фундаменту і підтверджує експериментально виявлене Л. А. Бартоломієм [3] явище зниження опору паль в складі фундаменту за рахунок взаємодії напружених зон сусідніх паль.

Епюри нормальних напружень в рівні площини нижнього кінця паль мають криволінійний характер з максимальною ординатою на кромці нижнього кінця.

Такий характер залежності розподілу напружень має деяку аналогію з графіком розподілу контактних напружень по підошві фундаментів мілкого закладання, які відносяться до абсолютно жорстких. Для них характерна сідлоподібна форма графіка контактних напружень з максимальним значенням напружень біля кромки фундаменту.

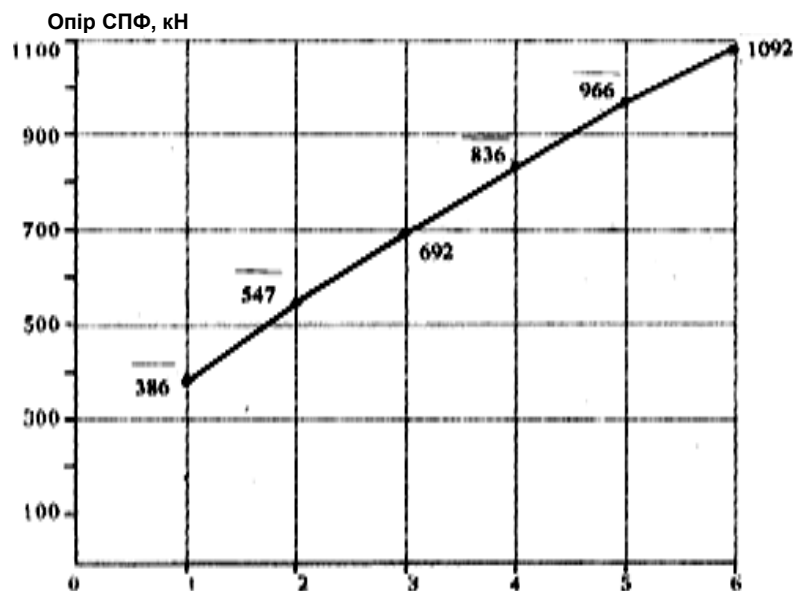
Ця аналогія слугує непрямою ознакою реальності епюри розподілу нормальних напружень під нижнім кінцем паль в складі фундаменту.

В практиці будівництва стрічкові пальові фундаменти в стрічці включають кількість паль більше шести. І за такої кількості паль проявляється плоско-деформований стан основи (коли фундамент стає стрічковим).

Це має важливе практичне значення для розрахунку і проектування стрічкових пальових фундаментів, оскільки дає можливість використовувати простіші розрахункові схеми.

Отримані дані дозволяють запропонувати гіпотезу про те, що «стрічковим» фундамент стає, коли кількість паль в стрічці  $NS \geq 6$ , а за критерій настання відповідного напружено-деформованого стану можна вважати, що приріст опору фундаменту ( $\Delta P$ ) стає постійною величиною, а приріст середнього опору палі в складі СПФ ( $\Delta \bar{p} \Rightarrow 0$ ) прямує до нуля.

Дослідження розподілу загального зусилля, яке сприймає СПФ між палями, розташованими в один ряд показує (див. рис. 1), що крайні палі несуть більші навантаження, ніж центральні. Це



пояснюється лінійною стадією роботи паль і ґрунтової основи, а також жорсткістю ростверку. Крім того, з графіків зміни зусиль в палях по відношенню до середнього значення опору однієї палі фундаменту видно, що нерівномірність розподілу залежить від кількості паль.

При цьому зусилля на крайні палі перевищують на 20...14 % середні значення, а зусилля на центральні палі на 10...15 % менше середнього значення ( $P_{i,c}$ ).

З графіка на рис. 2 випливає, що загальний опір СПФ зі збільшенням паль з 2 до 6 зростає майже вдвічі (з 547 кН до 1092 кН). Аналіз

даних таблиці показує, що приріст опору СПФ зі збільшенням кількості паль зменшується.

Теоретичні дані таблиці відповідають експериментальним дослідженням Л. А. Бартоломія [3] та З. В. Бабічева [4], коефіцієнт кореляції складає 8...12 %.

## Дані про опір СПФ вертикальним навантаженням

Кількість паль в фундаменті	Загальний опір фундаменту, коли $S = 1$ см (в кН)	Приріст опору $\Delta P_b$ , кН	Середнє значення опору палі $P_{ic}$ , кН	Приріст $\Delta P_{ic}$ , кН
1	386	—	386	—
2	547	161	273,5	112,5
3	692	145	230	43,5
4	836	144	209	21
5	966	130	193	16
6	1092	126	181,9	11

## Висновки

1. Загальний опір стрічкових пальових фундаментів вертикальним навантаженням зростає зі збільшенням кількості паль по довжині стрічки, але приріст загального опору такого фундаменту зі збільшенням кількості паль прямує до деякої постійної величини.

2. Середнє значення опору однієї палі в складі СПФ менше опору одиночної палі, що зумовлено взаємовпливом напружених зон основи сусідніх паль.

3. Приріст середнього опору однієї палі стрічкового однорядного фундаменту зменшується зі збільшенням кількості паль і за кількості паль  $n \geq 6$  стає практично рівним нулю, тобто за такої кількості паль фундамент стає «стрічковим». Це дає можливість використовувати простіші розрахункові схеми.

4. Розподіл загального навантаження фундаменту на окремі палі нерівномірний: крайні палі сприймають більші, а центральні — менші зусилля порівняно із середнім значенням опору палі в складі стрічкового пальового фундаменту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] К. Бреббия, Ж. Теллес, и Л. Вроубел, *Методы граничных элементов*. Москва: Мир, 1987, 485 с.
- [2] А. С. Моргун, А. В. Ніцевич, та І. М. Меть, *Комп'ютерні технології розрахунку фундаментних конструкцій на основі методу граничних елементів*. Вінниця: ВНТУ, 2009, 169 с.
- [3] А. А. Бартоломей, И. М. Омельчак, и Б. С. Юшков, *Прогноз осадок свайных фундаментов*. Москва: Стройиздат, 1994, 384 с.
- [4] З. В. Бабичев, «Исследование усилий и деформаций в свайном фундаменте крупнопанельного дома,» *Основания, фундаменты и механика грунтов*, № 5, 1966.

Рекомендована кафедрою будівництва, міського господарства та архітектури ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 30.05.2019

**Моргун Алла Серафимівна** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, e-mail: bmqa.pcb@gmail.com ;

**Мойсеєнко Євген Олегович** — студент факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання. Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**A. S. Morgun<sup>1</sup>**  
**Ye. O. Moiseienko<sup>1</sup>**

## The Study of Redistribution of Forces in the Bands of Fragmental Functions by the Method of Border Elements

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

According to the numerical method of boundary elements, a study of the bearing capacity of tape single-row pile foundations with a number of piles in a tape from one pile to six was analyzed, the character of the friction forces splitting on the lateral surface of the tape pile foundations, the normal stresses under the lower end was analyzed for the purpose of making the optimal number of piles in the tape.

*Pile foundations have been known for a long time and are widely used in construction. In modern high-rise buildings, they are widely used instead of the pre-existing band foundation.*

*This contributed to raising interest in their design and methods to predict their behavior under load. The advantage of pile foundations is small sedimentation, this is very important for high-rise buildings, which have a high rigidity and, accordingly, a great sensitivity to non-uniform settling. Despite the widespread use of pile foundations, numerous factors influencing bearing capacity and precipitation of piles under their operation in the composition of various pile foundations under various soil conditions have not yet been sufficiently studied. This is due to the dimensional complexity and laboriousness of conducting field investigations of pile foundations. The work proposes more precise prerequisites for describing the deformability of the pile foundations most used in high-rise building. The obtained data on the regularities of the growth of the total effort on the foundation with the increase in the number of piles and the change in the average load on the pile in the composition of the tape single row piling basement. In addition, tape pile foundations reduce the amount of material used and the cost of construction, which is very important for the investor. A comparison of numerical studies with experimental data on the magnitude of the bearing capacity of tape pile foundations has been carried out.*

**Keywords:** tape pile foundation, stress-strain state, bearing capacity, boundary element method, flat-deformed state.

**Morgun Alla S.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Construction, and Urban Architecture, e-mail: bmqa.pcb@gmail.com ;

**Moiseienko Yevhen O.** — Student of the Department of Construction, Heat and Power Engineering and Gas Supply

**A. С. Моргун<sup>1</sup>**  
**Е. О. Мойсенко<sup>1</sup>**

## **Изучение перераспределения усилий в ленточных свайных фундаментах методом граничных элементов**

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

*Численным методом граничных элементов проведено исследование несущей способности ленточных однорядных свайных фундаментов при количестве свай в ленте от одной до шести, проанализирован характер распределения сил трения по боковой поверхности ленточных свайных фундаментов, нормальных напряжений под нижним концом с целью принятия оптимального количества свай в ленте.*

*Свайные фундаменты известны давно и широко используются в строительстве. В современном высотном строительстве их широко используют вместо распространенных ранее ленточных фундаментов. Этому способствовали следующие факторы:*

- создание рациональной конструкции свайных фундаментов, в результате чего они стали рентабельными и конкурирующими с ленточными фундаментами;
- использование свайных фундаментов соответствует требованиям индустриальности, снижению сметной стоимости и трудоемкости строительства;
- массовое строительство сооружений, с требованиями к фундаментам минимальных общих и неравномерных осадок.

*Это способствовало поднятию заинтересованности к их проектированию и к методам прогнозирования их поведения под нагрузкой. Преимущество свайных фундаментов — малые оседания, что очень важно для высотных сооружений, которым свойственна большая жесткость и соответственно, большая чувствительность к неравномерным оседаниям. Несмотря на широкое использование свайных фундаментов, ещё недостаточно изучены многочисленные факторы, влияющие на несущую способность и осадки свай в их работе в составе различных свайных фундаментов при различных грунтовых условиях. Это объясняется чрезмерной сложностью и трудоемкостью проведения натурных исследований свайных фундаментов. Предложены уточненные предпосылки для описания деформативности наиболее употребляемых в высотном строительстве свайных фундаментов. Получены данные о закономерностях роста общего усилия на фундамент при увеличении числа свай и изменении средней нагрузки на сваю в составе ленточного однорядного свайного фундамента. Кроме того, ленточные свайные фундаменты позволяют уменьшить количество используемого материала и стоимость строительства, что является весьма важным для инвестора. Проведено сравнение численных исследований с экспериментальными данными по величине несущей способности ленточных свайных фундаментов.*

**Ключевые слова:** ленточный свайный фундамент, напряженно-деформированное состояние, несущая способность, метод граничных элементов, плоско-деформированное состояние.

**Моргун Алла Серафимовна** — д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой строительства, городского хозяйства и архитектуры, e-mail: bmqa.pcb@gmail.com ;

**Моисеев Евгений Олегович** — студент факультета строительства, теплоэнергетики и газоснабжения