

А. С. Моргун  
Е. О. Новіцький  
І. І. Шевченко

## АСПЕКТИ ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ СПРОМОЖНОСТІ ПАЛЬОВОГО ПОЛЯ ЗА МГЕ

Вінницький національний технічний університет

*За числовим методом граничних елементів спрогнозовано несучу спроможність пальового поля споруди із 153 призматичних паль довжиною 22 м, з поперечним перетином паль 35\*35 см. при дії вертикального навантаження. При компоновці матриці впливу методу граничних елементів для кожної палі враховувався вплив активних зон сусідніх паль, оптимальну величину якого визначено в числовому дослідженні. В якості фундаментальних рішень розрахункового рівняння МГЕ взято аналітичні рішення Р. Міндліна для пружної півплощини, які значно понижують об'єм обчислювальних робіт, перетворюючи в нуль інтеграл по границі з півплощиною. Виявлений перерозподіл зусиль між палями пальового поля відповідає даним експериментальних досліджень та числових досліджень за МСЕ.*

**Ключові слова:** метод граничних елементів, палеве поле, несуча спроможність.

### Вступ

Гостра спеціальна необхідність в об'єктах соціально-побутового призначення потребує збільшення об'ємів житлового та цивільного будівництва, ріст якого можливий при раціональному використанні грошових, трудових, матеріальних ресурсів. Обсяги сучасного будівництва потребують більш пильної уваги до розрахунків фундаментних конструкцій, що складають біля 40 % кошторисної вартості будівель, особливо до пальових, які в цілому світі найбільш перспективні для висотного будівництва. Проблема оцінки несучої спроможності основ фундаментів є визначальною при практичному проектуванні.

В рамках плями забудови тиски в основах сучасних будівель сягають 500-800 МПа та більше. Діючи будівельні норми в таких випадках рекомендують використовувати пальові поля, що армують ґрунт палями. Адже основним призначенням паль є збільшення несучої спроможності ґрунту (його армувань) під спорудою.

Палі збільшують несучу спроможність основи за рахунок ущільнення ґрунту, тертя між поверхнею палі та ґрунтом і комбінуючої дії упору на більш міцні ґрунти. Площа контакту поверхні палі з ґрунтом має бути достатня для передачі навантаження на оточуючий ґрунт.

Як відомо, для пальового поля будівлі є характерним більш повільне зростання осадок по мірі збільшення навантаження, ніж для одиночної палі. Експериментальні дослідження показують, що під пальовим полем в межах реалізації бокового опору паль при вертикальному навантаженні проходять лише деформації ущільнення, а для розвитку пластичних зон потрібні значно більші навантаження ніж ті, що виникають при досягненні будівлею граничного осідання.

В геологічних умовах України доцільне застосування пальових фундаментів, особливо при висотному будівництві. Та особливості взаємодії пальових фундаментів з основами і теоретичні методи розрахунку паль вивчені недостатньо з точки зору прийняття економічних та надійних проектних рішень. Це можна пояснити складністю процесів, що проходять в ґрунті при зануренні паль. Розвідка ситуації показує, що процес деформування ґрунту обумовлений взаємодією багатьох факторів. В результаті при наявності цих явищ в проектній практиці використовуються відносно прості моделі, які наближено відображають реальну картину, що веде до прийняття недосконалих рішень. Тому поставлена в роботі тема є актуальна і потребує вирішення.

### Постановка задачі, визначальні співвідношення

Поява нового методу досліджень – числового експерименту суттєво наблизила фундаментальні математичні проблем до прикладних, пов'язала фізичний зміст задачі, математичне формулювання і числовий спосіб рішення.

Розробку нової технології розрахунку несучої спроможності палевого поля споруди проведено з залученням числового методу граничних елементів.

Основне співвідношення МГЕ, отримане К. Бреббія [1]:

$$Cu + \int_{\Gamma} uq \cdot d\Gamma = \int_{\Gamma} qu \cdot d\Gamma, \quad (1)$$

пов'язує значення потенціала  $u$  (переміщення) і його нормальних похідних  $q = \frac{du}{dv}$  (напруження) в кожному граничному вузлі, рівняння забезпечує функціональний зв'язок між  $u$  та  $q$  на границі  $\Gamma$ , що доказують сумісність їх значень на границі.  $u^*, q^*$  – одиничні (фундаментальні) рішення, що відповідають одиничним збуренням, які прикладені у внутрішніх точках однорідної і необмеженої області.

Вибором фундаментального рішення можна запобігти дискретного подання границі, що значно понижує об'єм обчислювальних робіт, необхідних для рішення задачі. В роботі прийнято фундаментальні рішення Р. Міндліна для пружної півплощини, які обертають в нуль інтеграл по границі півплощини.

Згідно досліджень А. О. Бартоломія, саме розрахунки з використанням рішень Р. Міндліна в межах лінійної залежності «навантаження-осідання» дають кращу збіжність з експериментом ніж метод розрахунку куштів, прийнятий в ДБН як для умовного фундаменту на натуральні основи.

Матричне формулювання на етапі числової реалізації основного інтегрального співвідношення МГЕ (1):

$$|F| = |K| \cdot |Y|; \quad \begin{vmatrix} w_s \\ w_b \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \tau_s \\ \sigma_l \end{vmatrix}, \quad (2)$$

де  $F$  – вектор перміщень;  $K$  – матриця піддатливості;  $Y$  – вектор напружень по бокові поверхні та по вістрі.

Для врахування ефекту взаємодії 153 палей пального поля, зображеного на рис. 1, проведено розвиток теорії математичного моделювання взаємодії палей з основою, матриця впливу МГЕ компонувалась з урахуванням всіх палей, що входять в активну зону. Відстань між осями палей в плані прийнято  $11d$  як найбільш оптимальну, що дає реалізовувати опір палі по бокові поверхні (через  $d$  позначено відстань між осями палей). Довжина призматичних палей – 22 м, вони опираються на глину напівтверду буру, розміри поперечного перетину  $35 \times 35$  см.

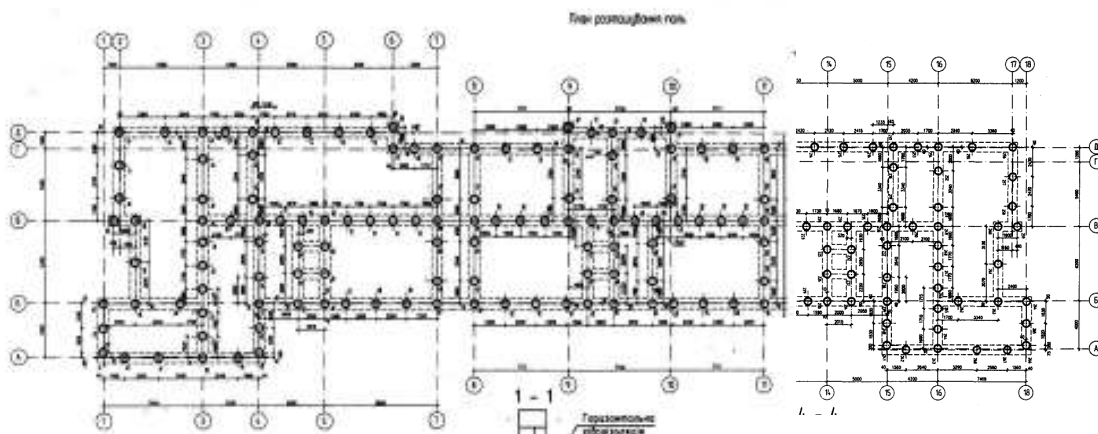


Рис. 1. Палеве поле будівлі (153 палі)

Для лінійної задачі механіки ґрунтів найбільш вагомими вхідними параметрами, які характеризують геологічну ситуацію основи, є модуль деформацій ґрунту ( $E$ ), коефіцієнт Пуассона  $\nu$ , які в роботі прийнято як середньозважені фізико-механічні характеристики різновидів просадкових суглинків  $E = 8350$  кПа,  $\nu = 0.433$ .

Визначення несучої спроможності палей при їх сумісній роботі проведено на момент переміщення  $S=1$  см. Прогноз несучої здатності за МГЕ палей пального поля, зображеного на рис.1:

Опір вертикальному навантаженню  $i$ -ї палі пальового поля в кН

1	597.5	2	447.3	3	344.7	4	334.7	5	288.9	6	287.3	7	242.2	8	192.4
9	153.6	10	133.4	11	124.2	12	121.7	13	154.6	14	136.1	15	107.9	16	109.6
17	133.8	18	146.7	19	151.8	20	154.2	21	127.9	22	173.6	23	187.9	24	264.8
25	466.9	26	283.2	27	291.3	28	287.7	29	366.6	30	313.0	31	250.9	32	286.4
33	279.4	34	301.3	35	305.2	36	240.2	37	190.5	38	149.9	39	126.7	40	139.9
41	140.3	42	178.3	43	247.4	44	279.7	45	246.6	46	340.5	47	422.2	48	356.3
49	197.9	50	186.2	51	165.5	52	222.1	53	284.3	54	342.7	55	348.8	56	279.1
57	200.5	58	147.4	59	137.1	60	151.8	61	152.0	62	130.1	63	191.7	64	208.1
65	247.4	66	263.8	67	251.1	68	132.3	69	102.5	70	109.7	71	103.9	72	106.8
73	141.3	74	167.7	75	235.0	76	202.4	77	198.9	78	134.3	79	120.9	80	112.7
81	119.9	82	157.5	83	198.7	84	187.3	85	216.2	86	198.9	87	232.3	88	255.7
89	239.6	90	233.8	91	234.3	92	277.6	93	267.0	94	286.4	95	218.3	96	211.9
97	256.6	98	201.5	99	374.7	100	430.2	101	353.3	102	326.1	103	314.3	104	274.1
105	263.4	106	261.3	107	260.1	108	339.7	109	354.4	110	295.0	111	272.8	112	262.8
113	250.9	114	290.7	115	223.4	116	187.6	117	186.1	118	220.7	119	284.8	120	349.1
121	343.6	122	255.3	123	185.4	124	166.7	125	172.6	126	168.6	127	212.0	128	220.6
129	248.3	130	198.3	131	176.8	132	149.4	133	156.2	134	167.8	135	160.7	136	186.6
137	217.9	138	191.6	139	181.2	140	189.1	141	205.8	142	197.9	143	218.0	144	174.1
145	161.2	146	179.5	147	218.4	148	268.2	149	216.4	150	136.8	151	140.6	152	162.6
153	159.5														

Сума = 34340 кН.

Співвідношення несучих спроможностей паль – центральна паля (№ 80): середня крайня (№ 58): кутова паля (№ 66) склало відповідно: 0.8 : 1 : 1.8. Це відповідає висновкам експериментальних досліджень А.О. Бартоломія та даним числових досліджень [2].

Аналіз коефіцієнтів матриці впливу в числовому розрахунку за МГЕ показав, що для паль в середині пальового поля їх значення найбільші. А збільшення деформативності (піддатливості) завжди знижує її несучу здатність. Із закону Гука  $\varepsilon = \frac{1}{E}\sigma$ ;  $\frac{1}{E}$  – це піддатливість – переміщення від дії одиничних зусиль, величина, обернена до жорсткості (зусилля, необхідні для одиничного переміщення). За умови однакових деформацій більший піддатливості відповідають менші напруження, а несуча здатність палі – це інтегрований вираз напружень:

$$P = \int_0^L F_{\text{бокова}} \cdot \tau \cdot dh_1 + \int_0^L F_{\text{вістря}} \cdot \sigma \cdot dh_2, \quad (3)$$

де  $F$  - площа бокової поверхні та вістря палі;  $h_1$  - висота граничного елемента по бокові поверхні палі;  $h_2$  – висота граничного елемента по вістрі палі.

Це пояснює причини самої низької несучої спроможності паль, що знаходяться в середині пальового поля.

### Висновки

- Складна взаємодія групи паль не дає можливості повністю використовувати в пальовому полі опір, що розвивається всіма палями. Відомими є факт що загальний опір пальового поля менше арифметичної суми опорів кожної палі.
- Взаємне перекриття активних зон сусідніх паль в пальовому полі будівлі впливає на несучу спроможність паль поля. Для середніх паль цей взаємовплив особливо значний, затиснений між палями ґрунт працює як єдине ціле з палями, не даючи можливості середнім палям, реалізувати свій боковий опір і їх несуча спроможність за даними числового дослідження майже в 2 рази менша, ніж у кутових.
- Урахування перерозподілу навантажень в пальовому полі виявляє дефіцит несучої спроможності кутових паль замість запасу, який прийнято очікувати при проведенні розрахунку палі як одиночної за ДБН.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бреббия К. Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел. – М.: Мир. 1987. – 525 с.
2. Комп'ютерні технології розрахунку фундаментних конструкцій на основі МҒЕ / А. С. Моргун, І. М. Меть, А. В. Ніцевич // Вінниця; ВНТУ, 2009. – 162 с.

*Моргун Алла Серафимівна* – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри Будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету.

*Новицький Євген Олександрович* – магістрант кафедри Будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету.

*Шевченко Ігор Ігорович* – студент Вінницького національного технічного університету.

**A. Morgun**

**Y. Novitsky**

**I. Shevchenko**

## ASPECTS OF DETERMINING THE BEARING CAPACITY OF THE PILE FIELD FOR THE MGA

Vinnitsia national technical University

*For numerical boundary element method predicted bearing capacity spaen field structures of the 153 prismatic piles with length of 22 m, W cross-section piles 35\*35 cm under the action of vertical loading. When composing the matrix effect of the method of boundary elements for each pile takes into account the effect of the active zones of adjacent piles, the optimal value a is determined in the numerical study. In Acosta fundamental solutions of the design equations mga taken an analytical solution for Mindlin R. elastic plane which significantly reduces the amount of computational work, turning to zero the integral over the boundary of poluploskosti. Vyjavlennia redistribution of efforts between the piles spaen field corresponds to the data of experimental studies and numerical studies for MCE.*

**Key words:** boundary element method, field, pile, bearing capacity.

*Morgun Alla* - dr. sciences, professor, head of the Department of construction, urban and architecture of Vinnitsia national technical university.

*Novitsky Yevgen* - master of the Department of construction, urban management and architecture of Vinnitsia national technical university.

*Shevchenko Igor* - student of Vinnitsia national technical university.

**A. S. Morgun**

**E. A. Новицкий**

**И. И. Шевченко**

## АСПЕКТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАЙНОГО ПОЛЯ ЗА МҒЕ

Винницкий национальный технический университет

*За численным методом граничных элементов спрогнозировано несущую способность свайного поля сооружения из 153 призматических свай длиной 22 м, з поперечным сечением свай 35\*35 см. при действии вертикального нагружения. При компоновке матрицы влияния метода граничных элементов для каждой сваи учитывается влияние активных зон соседних свай, оптимальную величину какого определено в численном исследовании. В якості фундаментальних рішень расчетного уравнения МҒЕ взято аналитическое решение Р. Миндлина для упругой плоскости, которое значительно понижает объём вычислительных работ, превращая в ноль интеграл по границе с полуплоскостью. Выявленное перераспределение усилий между сваями свайного поля отвечает данным экспериментальных исследований и численных исследований за МСЕ.*

**Ключевые слова:** метод граничных элементов, свайное поле, несущая способность.

*Моргун Алла Серафимівна* - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Строительства, городского хозяйства и архитектуры Винницкого национального технического университета.

*Новицкий Евгений Александрович* - магистрант кафедры Строительства, городского хозяйства и архитектуры Винницкого национального технического университета.

*Шевченко Игорь Игоревич* - студент Винницкого национального технического университета.