

*М.В. Корнієнко, к.т.н.  
професор, О.Б. Пресняков, к.т.н., О.І. Балакишин, інженер  
Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій*

## **РОЗРАХУНОК НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ВДАВЛЮВАНИХ ПАЛЬ З ОДНИМ ТА ДВОМА РОЗШИРЕННЯМИ**

*Запропоновано методу визначення несучої здатності вдавлюваних палей з одним та двома розширеннями. Представлено аналіз порівняння результатів розрахунків несучої здатності за запропонованою методикою з результатами статичних випробувань цих палей на дослідних майданчиках м. Києва.*

**Ключові слова:** *вдавлена паля, паля з розширеннями, несуча здатність вдавленої палі.*

*Н.В. Корниенко, к.т.н., профессор  
А.Б. Пресняков, к.т.н., А.И. Балакишин, инженер  
Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций*

## **РАСЧЕТ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВДАВЛИВАЕМЫХ СВАЙ С ОДНИМ И ДВУМЯ УШИРЕНИЯМИ**

*Предложена методика определения несущей способности вдавливаемых свай с одним и двумя уширениями. Представлен анализ сравнения результатов расчетов несущей способности по предложенной методике с результатами статических испытаний этих свай на площадках г. Киева.*

**Ключевые слова:** *вдавливаемые сваи, свая с уширениями, несущая способность вдавливаемой сваи.*

*M.V. Kornienko, Ph.D. professor  
O.B. Presniakov, Ph. D., O.I. Balakshyn  
State Scientific-Research Institute of Building Constructions*

## **CALCULATION OF CARRYING CAPACITY OF JACKED-IN PILE WITH ONE OR TWO EXPANSIONS**

*The method of determination of bearing capacity of jacked-in piles with one and two expansions are pressed. The analysis comparing the results of calculations of bearing capacity for the proposed method with the results of the static tests of piles in areas of Kiev.*

**Keywords:** *jacked-in pile, pile with the expansions, jacked-in pile bearing capacity.*

**Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими практичними завданнями.** Збільшення обсягів будівельних робіт та досягнення «докризових» темпів будівництва житла вимагає застосування економічних фундаментних конструкцій. Разом із цим, до фундаментів висувають підвищені вимоги щодо міцності та надійності конструкцій. Дуже часто ці вимоги здатні забезпечити лише пальові фундаменти, які влаштовуються методом вдавлювання. Застосування палей з розширеннями (одним або декількома), які заглиблюють методом вдавлювання, дозволяє підвищити несучу здатність палей у слабких ґрунтах. Однак відсутність простої та достовірної методики попереднього визначення несучої здатності таких палей гальмує їх широке застосування на будівництві.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання проблеми.** Окрім методик визначення несучої здатності палей з розширеннями, які

наводяться в будівельних нормах [1], багато дослідників пальових фундаментів запропоновували власні формули визначення несучої здатності різних конструкцій паль із розширеннями.

Більшість пропозицій щодо визначення несучої здатності паль із розширеннями як забивних, так і буронабивних уточнюють формулу будівельних норм для визначення несучої здатності паль за рахунок корегуючих коефіцієнтів. Як і формула будівельних норм, вони спираються на табличні значення  $R$  та  $f$ , а тому мають такі самі недоліки.

Дослідження, які були виконані Д.А. Романовим, Г.Ф. Шишком, М.С. Метелюком, А.М. Ягудіним, Я.Д. Гильманом, Ю.В. Дежиним, Г.І. Косаренком, В.С. Пушкаревичем, враховують наявність щільного прилягання оточуючого ґрунту до бічної поверхні палі та не враховують особливості роботи розширення, тим більше залежно від його положення по висоті стовбура. Лише О.Н. Тетіор та А.І. Алексеев у своїй формулі враховують наявність або відсутність контакту бічної поверхні палі й ґрунту та якість цього контакту. В.М. Бронін та В.Г. Федоров у своїй роботі для булавовидних паль вносять пропозицію визначення несучої здатності з врахуванням опливання ґрунту навколо палі з часом, але їх формула складна і не враховує кількість розширень та їх величину.

Окремо слід виділити рішення А.М. Тетіора [2], який на основі натурних та лабораторних вишукувань запропонував методику визначення несучої здатності буронабивних паль із декількома розширеннями. У його методиці враховується розмір розширень та відстань між ними, але діаметр цих розширень залишається однаковим.

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття.** Аналіз існуючих методів визначення несучої здатності  $F_d$  та граничного опору  $F_u$  одиночних паль на стискуєче навантаження показав, що існуючі рішення не дають прямої відповіді про несучу здатність вдавлюваних паль із декількома розширеннями, не пояснюють можливість оптимізації розташування розширень по висоті стовбура палі та їх розмірів.

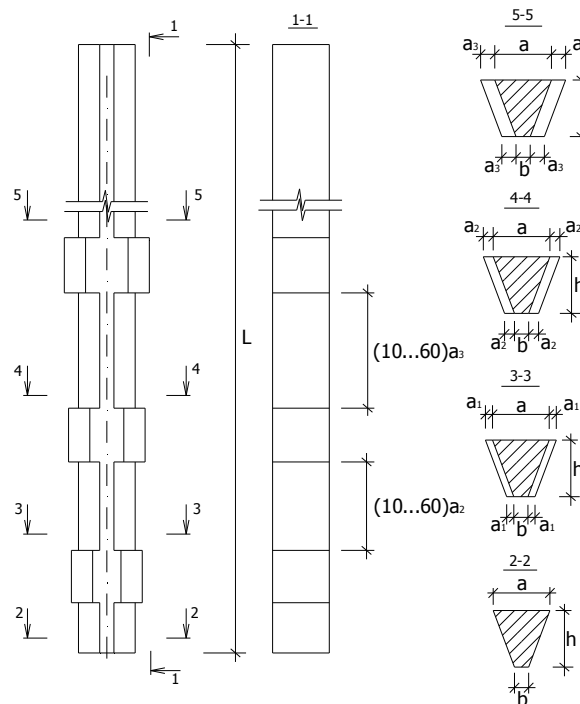
Немає універсального шляху вирішення для розрахунку значень  $F_d$  та  $F_u$ . Конструктивні особливості можуть значно впливати на розрахункову схему одиночної палі, що сприймає вертикальне навантаження. Несуча здатність палі визначається характером взаємодії стовбура і нижнього кінця палі з оточуючим ґрунтом. Зміна можливого навантаження на палю розглядається, як правило, окремо в розрахунках пальових фундаментів і часто є невизначеною. Тому навантаження, як і розрахункова величина несучої здатності здебільшого значно менші за граничний опір  $F_u$ .

Досягти більшого збігу величини  $F_d$  з результатами натурних дослідів можна за рахунок уточнення значення  $R$  і  $f$ . Цього можна досягти шляхом статичного і динамічного випробування ґрунтів, а також використання паль-зондів та еталонних (модельних) паль. Також цієї мети можна досягти за умови створення нових таблиць значень  $R$  і  $f$  для регіональних ґрунтів, що мають близькі фізико-механічні характеристики.

**Мета роботи** полягає у вивченні взаємодії вдавлюваної палі з розширеннями з оточуючим ґрунтом, пошуку оптимальних рішень паль із розширеннями та уточненні методики розрахунку несучої здатності палі з розширеннями при дії на неї вертикального стискуєчого навантаження, а також порівнянні отриманих результатів із даними випробувань паль статичним навантаженням на експериментальних майданчиках.

Як методи дослідження було обрано експериментальне випробування натурних одиночних паль трапецієподібного перерізу з розширеннями, заглиблених у ґрунт методом статичного вдавлювання, та розроблення методики визначення несучої здатності вдавлюваних паль трапецієподібного перерізу з розширеннями.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Сьогодні в Україні знайшли практичне використання палі трапецієподібного поперечного перерізу як без, так і з розширеннями на бічній поверхні (рис.1). Ці палі виготовляють згідно з відповідними технічними умовами [3] в заводських умовах із залізобетону та застосовуються при будівництві та реконструкції промислових і цивільних будівель і споруд. Технічне рішення цих палей захищено патентом України на винахід [4].



*Рисунок 1 – Палі трапецієподібного поперечного перерізу з розширеннями*

Згідно з технічними умовами ці палі можуть виготовлятися довжиною  $L = 3 \dots 30$  м (збірні з декількох секцій). Висота перерізу палі  $h$  знаходиться в межах  $200 \dots 500$  мм, більша основа трапецієподібного перерізу дорівнює  $a = 200 \dots 500$  мм, менша основа  $b$  може бути рівною 50, 100 або 150 мм.

Конструкція палей дозволяє влаштовувати одне, два або три розширення. Особливістю конструкції є те, що розширення розташовані на похилих гранях стовбура палей та мають різну площу. Тобто верхнє розширення більше за площею за нижнє мінімум у 1,2 рази ( $a_1 < a_2 < a_3$ ;  $a_2 \geq 1,2 a_1$ ;  $a_3 \geq 1,2 a_2$ ). Величина найнижчого розширення не перевищує  $1/2$  висоти перерізу палей ( $a_1 \leq 1/2 h$ ). По висоті палей розширення розташовано на відстані  $(10 \dots 60) a_i$  одне від одного, де  $a_i$  – величина розширення, що знаходиться зверху. Заглиблення цих палей виконується переважно методом вдавлювання.

Автор винаходу рекомендує застосовувати ці палі в піщаних та глинистих ґрунтах, окрім просідаючих. При цьому можливо прорізати палею всі види ґрунтів, окрім щільних піщаних із щільністю в сухому стані  $\rho_d \geq 1,60$  г/см<sup>3</sup>, що мають потужність шару більше ніж 3 м, якщо неможливе влаштування лідируючої свердловини. Нижні кінці палей слід заглиблювати, як правило, в ґрунти з показником текучості  $I_L \leq 0,6$ .

Ці палі знайшли широке застосування на будівельних майданчиках України, зокрема в м. Києві та м. Луцьку. Заглиблення цих палей виконують методом вдавлювання. Великі обсяги застосування цих палей за умови одночасної відсутності

чіткої методики визначення величини поперечної несучої здатності таких паль дали поштовх для подальшого дослідження цього питання, зокрема в цій роботі.

На підставі даних, які були отримані за результатами проведених стендових випробувань і чисельного моделювання, було зроблено припущення, що оскільки під розширеннями утворюються ядра запресованого ґрунту, а при вийманні палі з ґрунту частина бічної поверхні між розширеннями залишається вільною від запресованого ґрунту, то вочевидь через розширення та ділянки бічної поверхні палі між розширеннями на ґрунт передається частина навантаження.

Оскільки частина навантаження передається через розширення, методика визначення несучої здатності отримала назву «методика врахування розширень» (рис. 2), що передбачає визначення несучої здатності палі з розширеннями як суми сил опору ґрунту: під нижнім кінцем палі; під розширеннями; за бічною поверхнею палі та розширень.

У загальному вигляді розрахункова формула несучої здатності вдавлюваних паль із розширеннями має такий вигляд

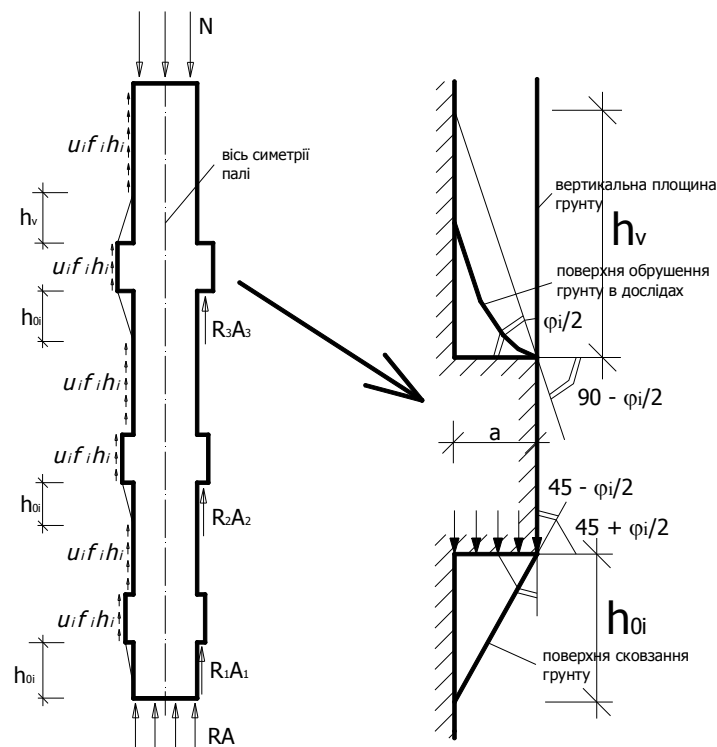


Рисунок 2 – Розрахункова схема «методики врахування розширень»

$$F_d = \gamma_{cR} RA + \sum_{j=1}^3 \gamma_{cR}^j R_j A_j + \sum_{i=1}^n \gamma_{cf}^i u_i f_i h_i, \quad (1)$$

де  $\gamma_{cR}$ ,  $\gamma_{cR}^j$ ,  $\gamma_{cf}^i$  – коефіцієнт умов роботи ґрунту відповідно під нижнім кінцем палі, під розширеннями та за бічною поверхнею палі, які приймаються за таблицями 1, 2 та отримані за результатами зіставлення дослідних та теоретичних даних;  $R$ ,  $R_j$  – розрахунковий опір ґрунту відповідно під нижнім кінцем палі та під розширеннями;  $A$ ,  $A_j$  – розрахункова площа відповідно нижнього кінця палі та розширень;  $u_i$  – периметр  $i$ -го перерізу палі;  $f_i$  – розрахунковий опір  $i$ -го шару ґрунту основи на бічній поверхні палі;  $h_i$  – товщина  $i$ -го шару ґрунту, дотичного з бічною поверхнею палі.

При визначенні опору ґрунту по бічній поверхні палі товщу ґрунту слід розділяти на однорідні шари потужністю не більше ніж 2 м.

За результатами стендових випробувань було відмічено, що взаємодія розширень і стовбуру палі залежить від їх геометричних розмірів та положення по висоті стовбуру вдавлюваної палі. Вочевидь коефіцієнти  $\gamma_{cR}$ ,  $\gamma^j_{cR}$ ,  $\gamma^i_{cf}$  повинні мати диференційовані значення та враховувати вид ґрунту і його якість під розширенням.

Значення величин  $R$ ,  $R_j$ ,  $f_i$  слід визначати за результатами статичного зондування ґрунту в місці влаштування пальового фундаменту. В разі відсутності цих даних можливе використання значень, наведених у таблицях Н.2.1 та Н.2.2 діючих будівельних норм [1].

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів  $\gamma_{cR}$ ,  $\gamma^j_{cR}$

Вид ґрунту	$\gamma_{cR}$ (під нижнім кінцем палі)	$\gamma^1_{cR}$ (під першим розширенням)	$\gamma^2_{cR}$ (під другим розширенням)	$\gamma^3_{cR}$ (під третім розширенням)
<b>Пісок</b>				
– середньої щільності	1,2	1,2	1,15	1,1
– щільний	1,25	1,25	1,2	1,15
<b>Супісок</b>				
– твердий	1,25	1,25	1,2	1,15
– пластичний, текучий	1,2	1,2	1,15	1,1
<b>Суглинок</b>				
– тугопластичний, текучий	1,3	1,3	1,25	1,2
– твердий, напівтвердий	1,4	1,4	1,35	1,3

Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів  $\gamma^i_{cf}$

Вид ґрунту	На поверхні першого розширення	Між першим та другим розширеннями	На поверхні другого розширення*	Між другим та третім розширеннями	На поверхні третього розширення	На стовбурі палі вище розширень
<b>Пісок</b>						
– середньої щільності	1,0	1,0	<u>0,95</u> 1,0	1,0	0,95	0,8
– щільний	1,05	1,05	<u>1,0</u> 1,05	1,05	1,0	0,9
<b>Супісок</b>						
– твердий	1,0	1,0	<u>0,95</u> 1,0	1,0	0,8	0,7
– пластичний, текучий	1,0	1,0	<u>0,95</u> 1,0	1,0	0,95	0,8
<b>Суглинок</b>						
– тугопластичний, текучий	1,05	1,05	<u>1,0</u> 1,05	1,05	1,0	0,9
– твердий, напівтвердий	1,1	1,1	<u>1,05</u> 1,1	1,1	1,05	0,9

\* В чисельнику подано значення коефіцієнтів для палі із двома розширеннями, у знаменнику – значення для палі із трьома розширеннями.

Завдяки заглибленню розширень на бічній поверхні палі з'являються ділянки, у яких через природні та технологічні причини, повністю або частково відсутній опір ґрунту по бічній поверхні палі. Ці ділянки мають назву «нульові зони».

Перша «нульова зона» розташована під розширенням. Її величина дорівнює величині ядра запресованого ґрунту під розширенням. Вона утворюється, коли через активний тиск розширення на ґрунт під розширенням з'являється поверхня ковзання ґрунту. Оскільки ця поверхня є дотичною до розширення під кутом  $45 - \varphi^l/2$ , тоді розмір першої «нульової зони»  $h_{0i}$  дорівнює

$$h_{0i} = a_i \operatorname{tg} (45 + \varphi^l/2). \quad (2)$$

Друга «нульова зона» має іншу природу утворення. Внаслідок заглиблення розширення в ґрунтову товщу між бічною поверхнею палі та вертикальною площиною ґрунту утворюється порожнина, яка виключає контакт бічної поверхні з оточуючим ґрунтом. З часом, залежно від фізико-механічних властивостей ґрунту, більшою чи меншою мірою, проходить руйнування та обсіпання вертикальної площини ґрунту. Не очікуючи цього процесу, цю порожнину можна ліквідувати шляхом заповнення її ґрунтом із додаванням води безпосередньо в порожнину, якщо це передбачено технологією влаштування палих фундаментів у конкретних ґрунтових умовах, або шляхом закачування в порожнину цементного розчину чи пластичної бетонної суміші. Проте все одно над розширенням може лишитися ділянка бічної поверхні, на якій не утворився контакт із ґрунтом, тобто друга «нульова зона»  $h_v$ , яка дорівнює

$$h_v = a_i \operatorname{tg} (90 - \varphi^l/2). \quad (3)$$

Під час лабораторних досліджень було зафіксовано формування ядер запресованого ґрунту під розширеннями, тобто «нульової зони», та встановлена залежність між розміром цих ядер та розміром розширень. Було зроблено припущення, що при близькому розташуванні розширення та нижнього кінця палі, за рахунок об'єднання їх запресованим ґрунтом, вони працюють разом.

Сумісну роботу розширення та нижнього кінця пропонується реалізувати шляхом заміни в розрахунках площі нижнього кінця палі  $A$  на «розрахункову площу нижнього кінця палі»  $A^*$ . При цьому  $A^* \geq A$ .

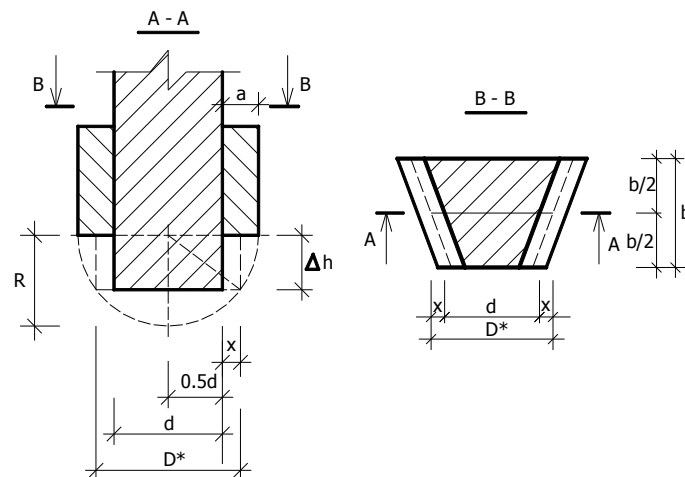


Рисунок 3 – Переріз нижнього кінця палі

Оскільки палі в поперечному перерізі має вигляд трапеції (рис. 3), площа нижнього кінця палі дорівнює  $A = db$ , де  $b$  – висота трапеції;  $d$  – середня лінія. Якщо  $D^*$  – це середня лінія «розрахункової площі нижнього кінця палі», яка дорівнює  $D^* = (d + 2x)$ , тоді «розрахункова площа нижнього кінця палі  $A^*$  буде дорівнювати

$$A^* = D^*b = (d + 2x)b. \quad (4)$$

Зроблено припущення, що спільне напружене ядро ґрунту під нижнім кінцем палі з розширенням у перерізі має форму півкола з радіусом  $R$ , який дорівнює

$$R = (d+2a)/2. \quad (5)$$

Значення величини  $D^*$  було визначено залежно від відстані ( $\Delta h$ ) від нижнього кінця палі до розширення:

– при  $\Delta h = 0$ ,  $x = a \Rightarrow D^* = d + 2a$  (розширення знаходяться на рівні нижнього кінця палі);

– при  $\Delta h \geq h_{01}$ ,  $x = 0 \Rightarrow D^* = d$  (розширення не впливає на нижній кінець палі);

– при  $0 < \Delta h < h_{01}$ ,  $x = \sqrt{R^2 - \Delta h^2} - 0,5d$ .

На підставі результатів лабораторних досліджень та розрахунків для трапецеїдальної палі із середньою лінією трапеції  $d$  залежно від розміру розширення  $a$  було отримано величини «розрахункової площі нижнього кінця палі»  $A^*$  (табл. 3).

Таблиця 3 – Величина «розрахункової площі нижнього кінця палі»  $A^*$

a = 0,2d			a = 0,3d			a = 0,4d		
$\Delta h$	x	$A^*$	$\Delta h$	x	$A^*$	$\Delta h$	x	$A^*$
0	0,2d	1,4db	0	0,3d	1,6db	0	0,4d	1,8db
0,1d	0,193d	1,386db	0,1d	0,294d	1,587db	0,1d	0,394d	1,789db
0,2d	0,171d	1,342db	0,2d	0,274d	1,549db	0,2d	0,377d	1,754db
0,3d	0,132d	1,265db	0,3d	0,242d	1,483db	0,3d	0,348d	1,697db
0,4d	0,074d	1,149db	0,4d	0,193d	1,386db	0,4d	0,306d	1,613db
$\geq 0,45d$	0	db	0,5d	0,124d	1,249db	0,5d	0,249d	1,497db
			$\geq 0,55d$	0	db	0,6d	0,171d	1,342db
						$\geq 0,63d$	0	db

*Примітка:* для проміжних значень розширення  $a$ , відстаней до нижнього кінця палі  $\Delta h$ , відповідні значення «розрахункової площі нижнього кінця палі»  $A^*$  визначаються методом інтерполяції.

На основі запропонованої методики визначення несучої здатності паль на дію вертикального вдавлюючого навантаження було виконано розрахунки натурних паль на дев'яти дослідних майданчиках у м. Києві. Отримані дані було порівняно з результатами випробування цих паль вдавлюючим статичним навантаженням. Результати несучої здатності палі, отримані за «методикою врахування розширень», майже збігаються з результатами статичних випробувань, різниця коливається в межах  $-12... +10\%$ . При цьому на частині майданчиків несучу здатність палі було «недооцінено» на  $3 - 12\%$ , що є припустимим відхиленням. На інших майданчиках розрахункове значення несучої здатності було більше даних статичних випробувань на  $7 - 10\%$ , що також є допустимим відхиленням.

У період з 2001 по 2002 роки під час будівництва ЦКТ № 12 на пивзаводі «Оболонь» у м. Києві при проектуванні й улаштуванні пальових фундаментів було застосовано «методику врахування розширень» для визначення несучої здатності вдавлюваних паль із розширеннями на бічній поверхні. Фактичний економічний ефект на цьому об'єкті від впровадження запропонованої методики визначення несучої здатності вдавлюваних паль із розширеннями на бічній поверхні склав 35558 грн.

**Висновки.** У процесі досліджень вперше було виявлено характер взаємодії декількох розширень для вдавлюваних паль в однорідному ґрунтовому середовищі. Для неоднорідного ґрунтового середовища встановлено, що ефективність двох і більше розширень прямо залежить від ґрунтових умов майданчика та взаємного положення розширень на стовбурі палі.

Запропоновано нову розрахункову схему визначення несучої здатності одиночної палі з розширеннями, що базується на врахуванні відстані між розширеннями та положенні нижнього розширення відносно кінця палі. Уточнено коефіцієнти умов роботи ґрунту під нижнім кінцем, під розширеннями та на бічній поверхні палі для розрахунку

несучої здатності одиночної палі на стиск і складено формулу попереднього визначення несучої здатності вдавлюваних паль із декількома розширеннями.

Аналіз результатів визначення несучої здатності вдавлюваних паль із розширеннями за «методикою врахування розширень» показав, що вони з допустимими відхиленнями збігаються з результатами статичних випробувань. Це дає підстави рекомендувати «методику врахування розширень» для визначення попередньої величини несучої здатності вдавлюваних паль із розширеннями.

#### *Література*

1. ДБН В.2.1-10-2009 Зміна №1. *Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування.* – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 55 с.

2. Тетиор, А.М. *Проектирование и сооружение экономических конструкций фундаментов / А.М. Тетиор // – К.: «Будівельник», 1975. – 204 с.*

3. ТУ 10.20 Україна 181-92. *Сваи железобетонные с уширениями на их боковой поверхности / введены впервые, без ограничения срока действия, с изменениями 31 согласно извещения 10.20 Украина 181-1-99 /.* – К.: НЧМП «ВІФ», 1999. – 36 с.

4. Пат. України № 302, МПК E02D 5/22. *Забивная свая / Кашка Б.З.; заявитель и патентообладатель Кашка Б.З. – №4893897/SU заявл. 26.12.90; опубл. 30.04.93 г; Бюл. №1.*

*Надійшла до редакції 04.10.2012*

*© М.В. Корнієнко, О.Б. Пресняков, О.І. Балакишин*