

<sup>1</sup> С.В. Романов, канд. техн. наук, Orcid <https://orcid.org/0009-0002-3537-3045>

<sup>1</sup> ДП "Науково-дослідний інститут будівельного виробництва ім. В.С.Балицького", м. Київ

## РОЗРАХУНОК МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ЗАЛІЗОБЕТОННУ ПАЛЮ В ПРОЦЕСІ ВДАВЛЮВАННЯ ЇЇ В ГРУНТ

**Анотація.** Через відсутність в Україні технічних норм (ДСТУ) з технології і контролю якості влаштування вдавлюваних паль часто порушуються умови якісного виконання робіт по вдавлюванню паль, наприклад, зусилля вдавлювання перевищує міцність палі по матеріалу. Це призводить до руйнування паль, що найбільш характерно для піщаних ґрунтів. У проектній документації на влаштування вдавлюваних паль, за рідкісним винятком, не наводяться обмеження на величину вдавлюючого зусилля з умови міцності палі по матеріалу в основному із-за складнощів, що виникають при розрахунку величині максимально допустимого навантаження на палю при її заглибленні вдавлюванням  $R_{ств}$ .

Згідно зі зміною №1 до ДБН В.2.1-10-2009 [ 2 ] величина  $R_{ств}$  визначається розрахунком по міцності матеріалу відповідно до вимог ДБН В.2.6-98;2009 [ 3 ], розглядаючи при цьому палю як стержень, жорстко затиснений в ґрунті в перерізі, розташованому на відстані  $l$  від точки прикладання вдавлюючого зусилля (див. рис.1 та залежності ( 2 ), ( 3 )).

Згідно з ДБН В.2.6-98;2009 [ 3 ] величина вдавлюючого навантаження, що допускається за матеріалом палі визначається розрахунком палі як внецентренно стислого залізобетонного елемента на дію подовжньої сили, при цьому повинен враховуватися випадковий ексцентриситет  $e_0$ , який у будь-якому разі повинен прийматися не менш  $1/600$  відстані між його перерізами, закріпленими від зміщення і  $1/3$  - від висоти поперечного перерізу. Крім того необхідно також враховувати вплив подовжнього прогину шляхом множення значення випадкового ексцентриситету  $e_0$  на коефіцієнт згідно залежності ( 5 ).

Вказані рекомендації ДБН з визначення величини вдавлюючого навантаження, що допускається за матеріалом палі стосуються палі, як внецентренно стислого залізобетонного елемента в статичному стані, яке не враховує вплив технологічних факторів в процесі вдавлювання палі.

Наш досвід занурення паль на десятках об'єктів показав, що вплив технології вдавлювання на величину допустимого навантаження на залізобетонну палю в процесі її заглиблення проявляється у вигляді збільшення ексцентриситету від технологічних факторів. В табл.2 розглянуті причини, що впливають на величину ексцентриситету навантаження на палю в процесі її занурення різними способами створення вдавлюючого зусилля: за рахунок ваги конструкцій будівель і споруд; за рахунок ваги устаткування або анкерних вантажів; за рахунок анкерних пристроїв.

В статті зроблені наступні висновки .

1. При розрахунку максимально допустимого навантаження на залізобетонну палю в процесі вдавлювання її в ґрунт необхідно враховувати крім рекомендованих ДБН В.2.6-98;2009 [ 3 ] випадкового ексцентриситету та ексцентриситету від подовжнього прогину також технологічний ексцентриситет шляхом множення значення випадкового ексцентриситету на коефіцієнт умов роботи палі ту при її вдавлюванні.

2. Нами запропоновані значення коефіцієнтів умов роботи палі для визначення розрахункового технологічного ексцентриситету для різних способів створення вдавлюючого зусилля і різних способів передачі вдавлюючого навантаження на палю (через голову або через бічні грані) (дивись таблицю 3) . Ці значення є емпіричними вони будуть коригуватись по мірі накоплення досвіду застосування методу вдавлювання паль.

**Ключові слова:** розрахунок, залізобетонна палля, міцність матеріалу, що допускається, вдавлювання, ексцентриситет.

### Предмет і методи досліджень

Предметом досліджень статті є технологія заглиблення паль вдавлюванням і методика розрахунку допустимого навантаження на палю по міцності матеріалу залізобетона і палі в процесі її вдавлювання в ґрунт. При дослідженнях використовувались експериментальні методи і хронометрах процесу вдавлювання в натурних умовах, а також аналітичні і статистичні методи.

### Мета досліджень

Метою досліджень статті є розробка методики розрахунку максимального допустимого наванта-

ження на залізобетонну палю по міцності матеріалу в процесі її вдавлювання, яка враховує вимоги діючих в Україні нормативних документів і вплив технологічних факторів при заглибленні палі в ґрунт.

Основною умовою надійного і якісного виконання робіт по зануренню паль вдавлюванням є дотримання умови ( 1 ) [ 1 ]

$$R_{гр.} \leq N_{вд.} \leq R_{ств.} \quad (1)$$

де  $N_{вд.}$  - зусилля, вдавлюванням що прикладається до палі в процесі її занурення в ґрунт, кН;  
 $R_{гр.}$  - опір ґрунту вдавлюванню палі, кН;

$R_{ств}$  - поздовжнє стискаюче зусилля на ствол палі з умови міцності матеріалу палі, кН, що допускається в процесі її заглиблення.

На жаль через відсутність в Україні технічних норм (ДСТУ) з технології і контролю якості влаштування вдавлюваних палі умова (1) часто порушується. Це призводить до руйнування вдавлюваних палі, що найбільш характерне для піщаних ґрунтів.

У проєктній документації на влаштування вдавлюваних палі, за рідкісним винятком, не наводяться обмеження на величину вдавлюючого зусилля з умови (1), в основному із-за складнощів, що виникають при розрахунках величини  $R_{ств}$ .

**Виклад основного матеріалу**

Відповідно з Зміною №1 до ДБН В.2.1-10-2009 [2] значення  $R_{ств}$  визначається розрахунком по міцності матеріалу відповідно до вимог ДБН В.2.6-98: 2009 [3], розглядаючи при цьому палю як стержень, жорстко затиснений в ґрунті в перерізі, розташованому на відстані  $l_1$ , від точки прикладення вдавлюючого зусилля (см рис.1)

$$l_1 = l_0 + \frac{2}{\alpha_c} \tag{2}$$

де  $l_0$  - довжина ділянки палі від точки прикладення вдавлюючого зусилля до поверхні ґрунту у палі, м;

$\alpha_c$  - коефіцієнт деформації, що визначається по формулі (3)

$$\alpha_c = \sqrt{\frac{5 \cdot K \cdot V_p}{\gamma_c \cdot E_0 \cdot I}} \tag{3}$$

де  $K$  - коефіцієнт пропорційності, кН/м<sup>4</sup>, що визначається по таблиці Н.8.1 Зміни №1 до ДБН В.2.1-10-2009 [2] і приведений в таблиці 1;

$E_0$  - модуль деформації матеріалу палі, кПа;

$I$  - момент інерції поперечного перерізу палі, м<sup>4</sup>;

$V_p$  - умовна ширина палі, м, що приймається рівною : для палі з діаметром ствола 0,8м і більше;

$V_p = d + 1$ , м, а для інших розмірів перерізів палі  $V_p = 1,5d + 0,5$ , м;

$\gamma_c$  - коефіцієнт умов роботи, що приймається рівним  $\gamma_c = 3$ ;

$d$  - зовнішній діаметр круглого або сторона квадратного або прямокутного перерізу в площині перпендикулярної дії навантаження, м.

Значення вдавлюючого навантаження, що допускається, за матеріалом палі визначається розрахунком палі як внецентренно стислого залізобетонного елемента на дію поздовжньої сили. При цьому відповідно до [3] повинен враховуватися випадковий ексцентриситет  $e_0$ , який у будь-якому разі повинен прийматися не менше 1/600 довжини елемента або відстані між його перерізами, закріпленнями від зміщення і 1/30 від висоти поперечного перерізу.

При визначенні максимально допустимого вдавлюючого зусилля на палю що заглиблюється необхідно додатково враховувати ексцентриситет, який утворюється в процесі занурення палі за рахунок таких технологічних факторів як можливі відхилення при установці палі на точку занурення, відхилення палі від вертикалі при вдавлюванні за рахунок неоднорідності ґрунту і інших.

На основі нашого досвіду занурення палі на десятках об'єктів в таблиці 2 приведені найбільш характерні причини утворення додаткового ексцентриситету в процесі вдавлювання палі.

Кожна з цих причин по різному проявляється для різних типів сваєвдавлюючого устаткування за способом створення вдавлюючого зусилля і по точці передачі його на палю (через голову або через бічні грані). Так при способі втискування палі з передачею реактивних зусиль на конструкції існуючих будівель не проявлятиметься вплив на ексцентриситет таких технологічних факторів як зміщення і зависання сваєвдавлюючого устаткування, оскільки конструкції існуючих будівель нерухомі, а при застосуванні способу створення вдавлюючого зусилля за рахунок анкерних пристроїв не проявлятиметься зависання на палі вдавлюючого устаткування, тому що, зависання на палі можливо тільки при вичерпан-

Таблиця 1.

Коефіцієнти пропорційності  $K$

Ґрунти, що оточують палі і їх характеристики	Коефіцієнт пропорційності $K$ , кН/м <sup>4</sup>
Піски крупнозерністі ( $0,55 \leq e \leq 0,70$ ); Глини і суглинки тверді ( $I_L < 0$ )	18 000 ÷ 30 000
Піски дрібні ( $0,6 \leq e \leq 0,75$ ); піски середньої крупності ( $0,55 \leq e \leq 0,7$ ); Супіски тверді ( $I_L < 0$ ); глини і суглинки тугопластичні і напівтверді ( $0 \leq I_L \leq 0,5$ )	12 000 ÷ 18 000
Піски пилеваті ( $0,6 \leq e \leq 0,8$ ); супіски пластичні ( $0 \leq I_L \leq 1$ ); глини і суглинки мягкопластичні ( $0,5 \leq I_L \leq 0,75$ )	7 000 ÷ 12 000
Глини і суглинки текучепластичні ( $0,75 \leq I_L \leq 1$ )	4 000 ÷ 7 000
Піски гравелісті ( $0,55 \leq e \leq 0,70$ ) крупнообломочні ґрунти с піщаним заповнювачем	50 000 ÷ 100 000

ні несучої здатності анкерного пристрою, що приведе до різкого зменшення зусилля, що передається на палю.

У таблиці 2 знак " + " означає, що причина проявляється для цього способу втискування палі, а знак " - " означає, що вплив відсутній.

Враховати вплив приведених в таблиці 2 причин утворення додаткового ексцентриситету при розрахунку вдавлюючого навантаження, що допускається, на палю можна введенням коефіцієнту умов роботи палі при її вдавлюванні ту до значення випадкового ексцентриситету ео, визначуваному в відповідності з вимогами ДБН В.2.6-98: 2009 [ 3 ].

У зв'язку з тим, що даних за величиною ексцентриситету, що викликається вказаними в таблиці 2 причинами немає, так само як і немає даних по вірогідності їх прояву, пропонується визначити значення

ту з умови, що в кожному випадку розрахунку проявлятимуться одночасно усі перераховані в таблиці 2 причини в мінімальному розмірі: кожна причина збільшуватиме випадковий ексцентриситет ео на 10%(це біля 1,0мм), окрім випадку 3 "через бічні грані" в таблиці 2, для якого збільшення випадкового ексцентриситету складає 20%, оскільки для випадку передача вдавлюючого зусилля через бічні грані палі може бути затисненої і при піднятті вдавлюючого устаткування працювати на злам. Значення коефіцієнта умов роботи палі ту, визначені по викладеному підходу приведені в таблиці 3.

Для складених і багатосекційних паль, що утворюються зі збірних елементів додатково необхідно враховувати можливе зміщення елементів при їх стискуванні.

Відповідно до [ 3 ] при розрахунку внецентрен-

Таблиця 2.

Можливі причини виникнення додаткового ексцентриситету в процесі вдавлювання залізобетонних паль

№ п/п	Причини додаткового ексцентриситету в палі	Способи створення вдавлюючого зусилля					
		За рахунок ваги конструкції існуючої будівлі		За рахунок анкерних пристроїв		За рахунок ваги устаткування або анкерних вантажів	
		Через голову	Через бічні грані	Через голову	Через бічні грані	Через голову	Через бічні грані
1	Можливі відхилення при установці палі на точку занурення (проміжки в напрямних, допустимі відхилення від вертикалі палі або направляючої стойки та ін.)	+	+	+	+	+	+
2	Можливі зміщення сваевдавлюючого устаткування в процесі вдавлювання із-за податливості ґрунту, на якому встановлені опорні конструкції устаткування (зрушення, нахил, поворот)	-	-	+	+	+	+
3	"Зависання сваевдавлюючого устаткування на вдавлюваній палі із-за підняття (відриву від поверхні ґрунту) частини або усієї установки	-	-	-	-	+	+
4	Можливе відхилення палі від вертикалі в процесі вдавлювання із-за неоднорідності ґрунту або наявності твердих включень	+	+	+	+	+	+
5	Різна якість (по шороховатості) протилежних граней палі	-	+	-	+	-	+
6.	Можливі відхилення розмірів і геометрії паль	+	+	+	+	+	+

Таблиця 3.

Значення коефіцієнта  $m_y$

№№ п/п	Способи створення вдавлюючого зусилля	Спосіб передавання вдавлюючого зусилля на палю	$m_y$
1	За рахунок ваги конструкцій існуючих будівель	Через голову палі	1,3
		Через бічні грані	1,4
2	За рахунок анкерних пристроїв(вакуумний анкер, гвинтові палі, бурові анкери і тому подібне)	Через голову палі	1,4
		Через бічні грані	1,5
3	За рахунок ваги устаткування або анкерних пригрузів	Через голову палі	1,5
		Через бічні грані	1,7

но стислих елементів при гнучкості  $L_0/i > 14$  необхідно також враховувати вплив подовжного прогину шляхом множення значення випадкового ексцентриситету на коефіцієнт  $\eta$ , визначуваний по формулі ( 5 )

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{сч}}} \quad (5)$$

де  $L_0 = 1,25 l_1$  - розрахункова довжина палі;  
 $i$  - радіус інерції перерізу палі;

$N$  - зусилля вдавлювання, що передається на палю, приймається рівним  $R_{гр}$ ;

$R_{гр}$  - опір ґрунту втискуванню палі визначуваний за результатами статичного зондування ґрунтів або іншими методами [ 1 ];

$N_{сч}$  - умовна критична сила, визначувана по формулі ( 6 )

$$N_{сч} = \frac{6,4 E_0 I}{\varphi_2 \cdot L_0^2} \left( \frac{0,11}{0,1 + \delta_e} + 0,1 \right) \quad (6)$$

де  $E_0, I, l_1, d$ , - ті ж позначення, що у формулах (2), (3)

$\varphi_2$  - коефіцієнт, що враховує характер навантаження на палі при вдавлюванні, приймається рівним 1;

$\delta_e$  - коефіцієнт, що приймається рівним  $e/d$ , але не менше

$$\delta_{e \min} = 0,5 - 0,01 \frac{L_0}{d} - 0,01 R_B \quad (7)$$

де  $R_B$  - розрахунковий опір бетону на стискування в МПа.

Таким чином, остаточне значення ексцентриситету при розрахунку навантаження, що допускається, на палю при її вдавлюванні складе

$$e = e_0 m_y \eta \quad (8)$$

При відомому значенні ексцентриситету максимально допустиме значення вдавлюючого зусилля  $[N_{вд}]$  на залізобетонну палю квадратного перерізу з

умови розрахунку її по міцності матеріалу визначається з рішення системи рівнянь (9) -(10) або (11) - (12), невідомими в яких є вдавлююче зусилля, що допускається  $[N_{вд}]$  і висота стислої зони  $X$ .

при

$$\frac{X}{h_0} \leq \xi_R$$

$$[N_{вд}] e_p = R_B \cdot d \cdot X ( h_0 - 0,5 X ) + R_{сч} A_s^1 ( h_0 - a^1 ), \quad (9)$$

$$[N_{вд}] + R_s \cdot A_s - R_{сч} A_s^1 = R_B \cdot d X \quad (10)$$

чи при

$$\frac{X}{h_0} \geq \xi_R$$

$$[N_{вд}] e_p = R_B \cdot d \cdot X ( h_0 - 0,5 X ) + R_{сч} A_s^1 ( h_0 - a^1 ), \quad (11)$$

$$[N_{вд}] + \sigma_s \cdot A_s - R_{сч} A_s^1 = R_B \cdot d X \quad (12)$$

$$\xi_R = \frac{\omega}{1 + \frac{\sigma_{sR}}{\sigma_{сч} u} \left( 1 - \frac{\omega}{1,1} \right)}$$

$\omega = 0,85 - 0,008 R_B$  - характеристика стислої зони бетону;

$\delta_{sR} = R_S$  - напруга в розтягнутій арматурі, МПа;

$\delta_{сч} = 400$  - гранична напруга в арматурі стислої зони, МПа.

$[N_{вд}]$  - допустиме вдавлююче зусилля на палю по міцності матеріалу;

$e_p$  - розрахунковий ексцентриситет від осі розтягнутої арматури визначуваний по формулі

$$e_p = e + \frac{h_0 - a}{2}$$

$R_B$  - розрахунковий опір бетону на стискування;  
 $d$  - сторона квадратного перерізу палі;  
 $h_0 = d - a$  - розрахункова висота перерізу палі;  
 $a$  - товщина захисного шару бетону в розтягнутій зоні;  
 $a^1$  - товщина захисного шару бетону в стислій зоні;  
 $X$  - висота стислої зони бетону;  
 $R_S$  і  $R_{SC}$  - розрахункові опори подовжньої арматури розтягуванню і стискуванню;  
 $A_S$  і  $A_S^1$  - площа розтягнутої і стислої арматури.

$$\sigma_s = \left( 2 \frac{1 - X/h_0}{1 - \xi_R} - 1 \right) \cdot R_s$$

Для перевірки умови  $X/h_0 \leq \xi_R$  значення  $X$  заздалегідь визначається з умови (10) при  $[N_{вд}] = P_{гр}$ , а потім уточнюється рішенням системи рівнянь (9) - (10) або (11) - (12).

Для випадку вдавлювання палі з передачею вдавлюючого навантаження через бічні грані величина вдавлюючого зусилля, що допускається, на ствол палі з умови міцності за матеріалом палі приймається рівним меншому з двох значень: значення  $[N_{вд}]$ , отриманого розрахунком палі як внецентренно стислого елемента з рішення системи рівнянь (9) - (10) або (11) - (12) і значення  $[N_{вд}]$  з умови розрахунку залізобетонного ствола палі на сумаття по приве-

дений нижче залежності (13). При цьому при розрахунку палі як внецентренно стислого елемента значення  $e$  приймається рівним відстані від поверхні ґрунту до середини затискного облаштування ( см рис.1)

$$[N_{вд}] \leq \varphi R_B \cdot A_c \cdot K_{тр} \quad (13)$$

де  $\varphi$  - коефіцієнт, залежний від характеру розподілу місцевого навантаження по площі того, що зім'яло, приймається рівним 0,75;

$R_B$  - розрахунковий опір бетону на стискування;  
 $A_c$  - площа, що зім'яло рівна: при обтисканні по двох гранях палі  $A_c = 2ad$ ; при обтисканні по чотирьох гранях палі  $A_c = 4ad$ ;

$a$  - висота притискної плити захоплення (Рис.1);  
 $d$  - сторона квадратного перерізу палі;

$K_{тр}$  - коефіцієнт тертя матеріалу притискної плити захоплення по бетону.

### Висновки

1. При розрахунку максимально допустимого навантаження на залізобетонну палю в процесі вдавлювання її в ґрунт необхідно враховувати крім рекомендованих ДБН В.2.6-98:2009 [ 3 ] випадкового ексцентриситету та ексцентриситету від подовжного прогину також технологічний ексцентриситет шляхом множення значення випадкового ексцентриситету на коефіцієнт умов роботи палі ту при її вдавлюванні.

2. Нами запропоновані значення коефіцієнтів умов роботи палі для визначення розрахункового технологічного ексцентриситету для різних способів створення вдавлюючого зусилля і різних способів передачі вдавлюючого навантаження на палю (через голову або через бічні грані), що наведені в таблиці 3. Ці значення є емпіричними і вони будуть коригуватись по мірі накоплення досвіду застосування методу вдавлювання палі.

### Література

1. Романов С.В. Эффективность технологии вдавливания пал в разных грунтовых условиях. Ж-л . Нові технології у будівництві, №.... 2003р.
2. Зміна №1 до ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти. Основні положення проектування. К., Мінрегіонбуд України.
3. ДБН В.2.6-98: 2009 Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. К., Мінрегіонбуд України.

### Reference

1. Romanov S.V. Efektivnist tekhnologii vdaolivannia pal v riznykh gruntovykh umovakh. Zh-l . Novi tekhnologii u budivnytstvi, №.... 2003r.
2. Zmina №1 do DBN V.2.1-10-2009. Osnovy ta fundamenti. Osnovni polozhennia proektuvannia. K., Minrehionbud Ukrainy.
3. DBN V.2.6-98: 2009 Konstruksii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruksii. Osnovni polozhennia. K., Minherionbud Ukrainy.

<sup>1</sup> S.V. Romanov, Ph.D. Orcid <https://orcid.org/0009-0002-3537-3045>

<sup>1</sup> State Enterprise "Research institute of building production named V.S. Balitsky", Kyiv

## CALCULATION OF THE MAXIMUM ALLOWABLE LOAD ON A REINFORCED CONCRETE PILE IN THE PROCESS OF DRIVING IT INTO THE SOIL

**Abstract.** Due to the lack of technical standards (DSTU) in Ukraine for the technology and quality control of the installation of driven piles, the conditions for high-quality performance of pile driving are often violated, for example, the driving force exceeds the strength of the pile material. This leads to the destruction of piles, which is most characteristic of sandy soils. In the project documentation for the installation of driven piles, with rare exceptions, there are no restrictions on the value of the driving

force based on the strength of the pile based on the material, mainly due to the difficulties that arise when calculating the maximum permissible load on the pile when it is deepened by driving the pile.

According to amendment No. 1 to DBN V.2.1-10-2009 [2] the amount of  $R_{st}$  is determined by calculating the strength of the material in accordance with the requirements of DBN B.2.6-98; 2009 [3], while considering the pile as a rod rigidly clamped in the soil in a section located at a distance  $l$  from the point of application of the compressive force (see Fig. 1 and dependencies (2), (3)).

According to DBN B.2.6-98; 2009 [3], the amount of compressive load allowed for the pile material is determined by calculating the pile as an eccentrically compressed reinforced concrete element under the action of a longitudinal force, while taking into account the random eccentricity  $e_0$ , which in any case must take at least  $1/600$  of the distance between its cross-sections, fixed from displacement and  $1/3$  - from the height of the cross-section. In addition, it is also necessary to take into account the influence of longitudinal deflection by multiplying the value of the random eccentricity  $e_0$  by the coefficient according to dependence (5).

The specified recommendations of the DBN on determining the value of the compressive load allowed for the pile material refer to the pile as an eccentrically compressed reinforced concrete element in a static state, which does not take into account the influence of technological factors in the process of pile compression.

Our experience of sinking piles at dozens of sites has shown that the impact of the pressing technology on the permissible load on a reinforced concrete pile during its sinking is manifested in the form of an increase in eccentricity due to technological factors. In table 2, the reasons affecting the eccentricity of the load on the pile in the process of its immersion are considered in various ways of creating a compressive force: due to the weight of the structures of buildings and structures; due to the weight of equipment or anchor loads; due to anchor devices.

The article draws the following conclusions.

1. When calculating the maximum permissible load on a reinforced concrete pile in the process of pressing it into the ground, it is necessary to take into account, in addition to the recommended DBN B.2.6-98:2009 [3] random eccentricity and eccentricity from longitudinal deflection, as well as technological eccentricity by multiplying the value of random eccentricity by the coefficient of working conditions piles when pressed.

2. We proposed the values of the coefficients of pile operating conditions for determining the calculated technological eccentricity for different ways of creating a compressive force and different ways of transferring the compressive load to the pile (through the head or through the side faces) (see Table 3). These values are empirical, they will be adjusted as experience is gained in the application of the pile driving method.

**Key words:** calculation, reinforced concrete pile, material strength, permissible, indentation, eccentricity.