

Ймовірнісне оцінювання напружено-деформованого стану основ фундаментів неглибокого закладання з урахуванням нелінійних властивостей ґрунтів

Олександр ТРЕГУБ¹, Юрій КІРІЧЕК²

Український державний університет науки і технологій
ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»
24а, вул. Архітектора Олега Петрова, м. Дніпро, Україна, 49005,
¹tregub.olexandr@pdaba.edu.ua, orcid.org/0000-0001-6436-352X
²kirichek.yurii@pdaba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-1573-0706

DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.296-307

Анотація. Оцінювання напружено-деформованого стану основ фундаментів неглибокого закладання з урахуванням неоднорідності та нелінійності деформування основ і критеріїв надійності за ймовірнісним підходом дозволяє більш повно використовувати несучу здатність та деформативність ґрунтів.

Метою роботи є удосконалення методики ймовірнісного аналізу НДС основ методом статистичних випробувань задля підвищення надійності проектних рішень фундаментів.

Методика ймовірнісного аналізу реалізована на базі методу статистичних випробувань із застосуванням апробованого нелінійного методу та комп'ютерного програмування. Запропоновано визначати допустимий тиск на основи фундаментів за результатами ймовірнісного аналізу при заданих доцільних значеннях ймовірностей відмов за граничними станами: перевищення тиском P під подошвою фундаменту граничного опору P_u ; перевищення розрахунковим осіданням S або S_{nl} граничного значення S_u ; перевищення розрахункової відносної нерівномірності осідань $\Delta S/L$ граничного значення $(\Delta S/L)_u$.

Виконані розрахунки стовпчастих фундаментів за ймовірнісним та детермінованим підходами на одношарових піщаних та глинистих ґрунтових основах.

Ймовірнісними розрахунками отримані значення коефіцієнтів варіації: $v(S)=0,06-0,17$, $v(\Delta S/L)=0,74-0,79$, $v(R)=0,08-0,14$, $v(P_u)=0,1-0,18$.

У випадках неоднорідності механічних характеристик ґрунтів із коефіцієнтами варіацій $v \geq 0,15-0,2$ і одночасного їх урахування в



Олександр ТРЕГУБ

доцент кафедри автомобільних доріг, геодезії та землеустрою
к.т.н., доц.



Юрій КІРІЧЕК

професор кафедри автомобільних доріг, геодезії та землеустрою,
д.т.н., проф.

ймовірнісних розрахунках допустимі тиски на основи не перевищили їх розрахункові опори $R < R_u$. Зі збільшення тиску на основи фундаментів ймовірність відмов за граничними станами підвищується і вже із досягненням 40-60% величини несучої здатності основ стрімко зростає до значень, що перевищують допустимі.

За результатами ймовірнісного аналізу отримано менші на 5-50% значення допустимих тисків на основи фундаментів у порівнянні із детермінованими розрахунками, що підтверджує необхідність урахування неоднорідності характеристик ґрунтів, особливо при оцінюванні можливості роботи основи у нелінійній стадії деформування за рахунок їх резервів несучої здатності.

Ключові слова. Надійність, фундаменти неглибокого закладання, неоднорідність ґрунтів, коефіцієнти варіації, нелінійні деформації.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Ґрунтові основи будівель та споруд характеризуються неоднорідністю властивостей. За різними оцінками, коефіцієнти варіації фізико-механічних характеристик ґрунтів можуть становити до 30%. При визначенні допустимих напружень в основах фундаментів це може вплинути на переоцінку їх несучої здатності.

У зв'язку із неоднорідністю характеристик ґрунтів і мінливою природою навантажень виникає ймовірність перевищення тиском під подошвою фундаментів розрахункового опору основи $P > R$, що передбачає розрахунки осідань з урахуванням фізичної нелінійності деформування ґрунту (Винников і Харченко, 2015). При цьому слід ураховувати інші геотехнічні ризики – ймовірність наднормативних осідань фундаментів та їх нерівномірності, що може спричинити пошкодження будівельних конструкцій.

У той же час, для отримання ресурсозберігаючого проєктного рішення фундаментів на надійних ґрунтах доцільно використовувати резерви несучої здатності основи при їх роботі у нелінійній стадії деформацій.

Оцінювання НДС основ фундаментів неглибокого закладання з урахуванням неоднорідності та нелінійності деформування основ і критеріїв надійності за ймовірнісним підходом дозволить обґрунтовано призначати допустимі навантаження на фундаменти.

МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є удосконалення методики ймовірнісного аналізу НДС основ методом статистичних випробувань задля підвищення надійності проєктних рішень фундаментів неглибокого закладання.

При цьому завданням досліджень є: оцінювання впливу неоднорідності характеристик ґрунтів на НДС основ фундаментів та ймовірності відмов за граничними станами; визначення статистичних параметрів випадкових величин (ВВ) осідань, розрахункового та граничного опору; встановлення

допустимих тисків під подошвою фундаментів за ймовірнісними розрахунками граничного опору, осідань та їх нерівномірності з урахуванням розвитку нелінійної стадії деформацій; порівняння результатів розрахунку допустимих тисків на основи за ймовірнісним та детермінованим підходами.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Попередніми дослідженнями обґрунтована доцільність використання резервів несучої здатності основ фундаментів при їх роботі у нелінійній стадії деформацій із застосуванням коефіцієнтів надійності до розрахунків допустимих навантажень з метою забезпечення необхідного рівня надійності (Трегуб, 2014; Kirichek and Tregub, 2015, 2024).

Для обчислення ймовірності відмови використовують аналітичні, чисельні та методи статистичних випробувань, зокрема: метод імітаційного моделювання Монте-Карло (Monte Carlo simulation method), метод діаграми торнадо (tornado diagram method), метод другого моменту першого порядку (first order second moment), метод випадкових скінченних елементів (random finite element method), метод проєктування на основі надійності (reliability-based design method), методи поверхні відгуку (response surface methods) та ін. (Chemali and Tiliouine, 2023; Phoon and Ching, 2018; (Kayser and Gajan, 2014).

У роботі (Pereira and Caldeira, 2011) для ймовірнісних розрахунків фундаментів неглибокого закладання були застосовані удосконалений метод другого моменту першого порядку (advanced first-order second-moment method) і метод другого моменту першого порядку (first-order second-moment method). Детермінований розрахунок було реалізовано методом часткових коефіцієнтів безпеки, рекомендований Єврокодом.

У дослідженні (Винников і Харченко, 2015) виконаний детальний аналіз ймовірнісних методів оцінювання НДС основ фундаментів, зокрема приділена увага ймовірнісному аналізу за допомогою методу скінченних елементів. Застосування даної методики

дозволило обґрунтувати необхідність армування слабкої основи ґрунтоцементними елементами.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Статистичні дані щодо неоднорідності характеристик ґрунтів та функції розподілу встановлюють за результатами лабораторних випробовувань їх зразків. У дослідженнях використано метод моделювання Монте-Карло. Вибірка із $k=10^4$ значень ВВ характеристик ґрунтів та тиску P моделювались наближеним розподілом нормального закону у вигляді:

$$X_i = M_x + (V_x \cdot M_x) \xi, \quad (1)$$

де M_x – математичне сподівання характеристики;

V_x – коефіцієнт варіації ВВ характеристики x ;

ξ – згенероване випадкове число (0...1), що відповідає закону нормального розподілу.

Коефіцієнти варіації характеристик ґрунтів прийняті за літературними джерелами та проаналізованими даними звітів з інженерно-геологічних вишукувань. При моделюванні ВВ прийнято такі значення коефіцієнтів варіації: характеристики ґрунтів – $v(\varphi, c, E)=0,05-0,2$, $v(\gamma)=0,02-0,05$; тиск під подошвою фундаменту – $v(P)=0,1$.

Статистична перевірка ВВ характеристик x ґрунтів з метою виключення із вибірки помилкових значень m та встановлення розрахункових характеристик ґрунтів виконана згідно з вимогами стандарту (ДСТУ Б В.2.1-5-96, 1996). Розрахункові фізико-механічні характеристики ґрунтів наведені у Табл. 1.

Табл. 1. Розрахункові фізико-механічні характеристики ґрунтів
Table 1. Design physical and mechanical characteristics of soils

Ґрунти	Модуль деформації	Кут внутрішнього тертя		Питоме зчеплення		Питома вага	
	E , МПа	φ_{II} , град	φ_I , град	c_{II} , кПа	c_I , кПа	γ_{II} , кН/м ³	γ_I , кН/м ³
Пісок середньої крупності, щільний	30	35	34,3	1,0	0,95	16,70	16,50
Суглинок тугопластичний	14	21	20,6	23	22,8	17,50	17,45
Глина м'якопластична	9	10	9,7	33	32,1	17,85	17,80

Розрахунок осідань фундаментів з урахуванням нелінійності деформування ґрунтів для загального випадку неоднорідних основ виконано за формулою (Клепиков, 1996):

$$S = \frac{\bar{S}(1-\bar{P}/P_u)P}{\bar{P}(1-P/P_u)}, \quad (2)$$

де $\bar{S}$ – осідання основи при тиску $\bar{P}$ під подошвою фундаменту, що не перевищує розрахункового опору R . Осідання $\bar{S}$ визначається з урахуванням форми подошви фундаменту, наявності неоднорідних шарів ґрунту і розмірів стисненої товщі. Приймалось $\bar{S} = S_R$ (при тиску $P=R$) за формулою осідання

лінійно-деформованого півпростору.

Задовільну збіжність результатів розрахунку осідань за формулою (2) підтверджено даними випробувань ґрунтів основ штампами. Із формули (2) отриманий тиск під подошвою фундаменту, що відповідає граничному осіданню основи:

$$P(S_u) = \frac{S_u \cdot \bar{P}}{\bar{S} \left(1 - \frac{\bar{S} \cdot \bar{P}}{P_u} + \frac{S_u \cdot \bar{P}}{P_u} \right)} \quad (3)$$

Показником надійності системи «основа-фундамент» є імовірність відмов P_i за граничними станами: перевищення тиском P під подошвою фундаменту граничного

опору P_u ; перевищення розрахунковим осіданням S або S_{nl} граничного значення S_u ; перевищення розрахункової відносної нерівномірності осідань $\Delta S/L$ граничного значення $(\Delta S/L)_u$.

Імовірність відмови за граничним станом визначалась за співвідношенням:

$$P_i = \frac{n}{k-m}, \quad (4)$$

де n – кількість відмов у розрахунках з ВВ характеристик ґрунтів x та тиску p ;

k – загальна кількість виконаних розрахунків відповідно до розміру вибірки;

m – кількість вилучених із вибірки помилкових ВВ характеристик ґрунту.

Застосовуючи ВВ характеристик ґрунтів та тиску $\tilde{P}$ визначенні значення розрахункового та граничного опору $\tilde{R}$, $\tilde{P}_u$, та осідання $\tilde{S}_R$, $\tilde{S}_{nl}$ фундаментів, перевірені умови за граничними станами.

Імовірнісні розрахунки виконувались ітераціями, оцінюючи НДС встановлювали допустимий тиск: у випадку недостатнього рівня надійності – при перевищенні доцільного значення імовірності відмов, тиск на основу зменшували та виконували повторний цикл розрахунків до досягнення умови надійності. Доцільні значення імовірності відмов P_i^{ex} приймають за будівельними нормами (ДБН В.1.2-14:2018, 2018) у залежності від розрахункових ситуацій та відповідальності об'єкту, але можуть бути прийняті і інші обґрунтовані значення імовірностей. У дослідженнях допустимими прийняті значення імовірностей: у розрахунках за I граничним станом – $5 \cdot 10^{-6}$; за II граничним станом – $1 \cdot 10^{-4}$.

Характеристики безпеки визначені за формулами:

$$\beta_I = \frac{\bar{P}_u - \bar{P}}{\sqrt{\sigma_{\bar{P}_u}^2 + \sigma_{\bar{P}}^2}}, \quad \beta_{II} = \frac{S_u - \bar{S}}{\sigma_S},$$

або $\beta_{II} = \frac{\bar{P}_{Su} - \bar{P}}{\sqrt{\sigma_{\bar{P}_{Su}}^2 + \sigma_{\bar{P}}^2}}$ та $\beta_{II} = \frac{\left(\frac{\Delta S}{L}\right)_u - \left(\frac{\Delta S}{L}\right)}{\sigma_{\Delta S/L}}, \quad (5).$

де $\bar{P}$, $\bar{P}_u$, $\bar{S}$, $\left(\frac{\Delta S}{L}\right)$, $\bar{P}_{Su}$ – значення математичних сподівань тиску під подошвою фундаменту, граничного опору основи, осідань фундаменту, відносних нерівномірних осідань та тиску, яке спричинить граничне осідання відповідно;

σ_P , σ_S , $\sigma_{\Delta S/L}$, σ_{P_u} , $\sigma_{P_{Su}}$ – значення середніх квадратичних (стандартних) відхилень ВВ тиску під подошвою фундаменту, осідань, відносних нерівномірних осідань, граничного опору та тиску, яке спричинить граничне осідання фундаменту відповідно;

S_u , $\left(\frac{\Delta S}{L}\right)_u$ – граничні значення абсолютних та відносних нерівномірних осідань фундаментів відповідно.

З метою автоматизації розрахунків за граничними станами, ймовірнісного моделювання методом статистичних випробувань та аналізу НДС основ фундаментів розроблена програма за алгоритмом, що наведений на Рис. 1.

Вхідні дані до розрахунків: ширина та довжина подошви фундаментів b , l , глибина закладання d ; тиск під подошвою фундаменту p та його коефіцієнт варіації v_p ; фізико-механічні характеристики ґрунтів φ , c , γ , γ' , E та їх коефіцієнти варіації v_φ , v_c , v_E , v_γ ; коефіцієнти надійності γ_n та умов роботи γ_c ; нормативні граничні значення осідань S_u , відносної нерівномірності осідань $(\Delta S/L)_u$; доцільні значення імовірності відмов P_i .

У розрахунках приймалися стовпчасті фундаменти з розмірами подошви $b=l=1,0$ м та глибиною закладання $d=1,0$ м і $b=l=3$ м, $d=3$ м для будівель каркасної конструктивної схеми, на одношарових ґрунтових основах: пісок середньої крупності, щільний, маловологий; суглинок тугопластичний; глина м'якопластична.

Виконані розрахунки основ фундаментів неглибокого закладання за імовірнісним та детермінованим підходами. Результати розрахунків наведені у Табл. 2 та 3.

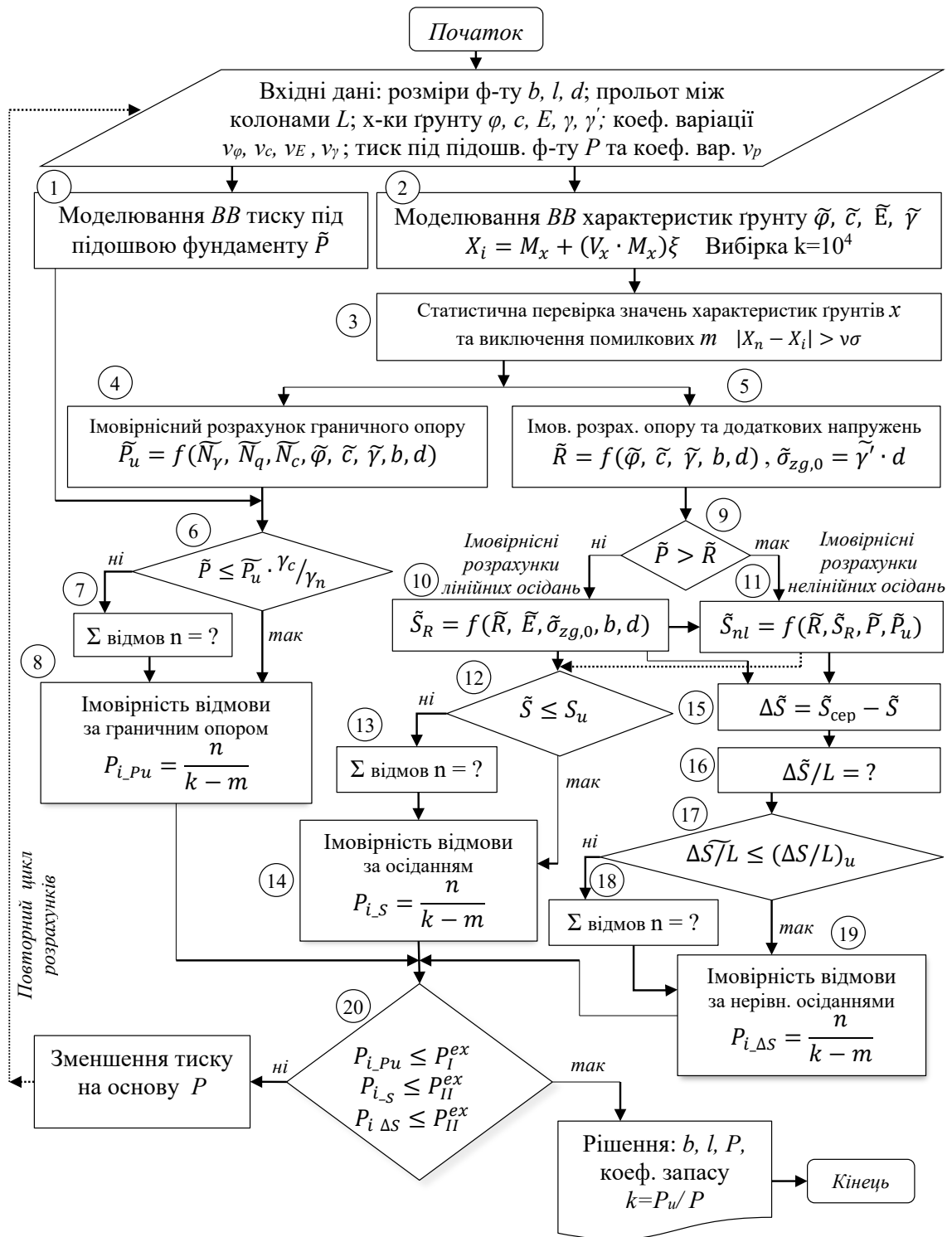


Рис.1. Алгоритм ймовірнісного розрахунку основ фундаментів неглибокого закладання методом статистичних випробувань

Fig.1. Algorithm for probabilistic calculation of shallow foundations using the statistical testing method

У зв'язку із неоднорідністю ґрунтів та мінливістю навантажень існує ймовірність перевищення тиском під підшвою фундаменту розрахункового опору основи $\tilde{P} > \tilde{R}$, і відповідного розвитку осідань фундаменту

у нелінійній стадії. Встановлено, що ймовірність перевищення $\tilde{P} > \tilde{R}$ при тиску $\tilde{P} = 0,8R$ (варіації $v_p=0,1$; $v(\varphi, c, E)=0,1$; $v_\gamma=0,05$) на піщаних основах становить 11%, на суглинках 9%, на глинах 7%. За умови $\tilde{P} > \tilde{R}$

необхідно враховувати нелінійний характер деформування. На Рис. 2 наведені графіки імовірних осідань фундаментів та умовні межі лінійних та нелінійних стадій деформацій, що залежать від варіацій значень

розрахункового опору ґрунту та тиску під подошвою фундаментів. На графіках показані ймовірні діапазони значень розрахункового опору ΔR та відповідних осідань ΔS фундаментів.

Табл. 2. Результати детермінованих розрахунків основ фундаментів
Table 2. Results of deterministic calculations of foundations

Ширина фундаменту	Глибина закладання	Розрахунковий опір основи	Осідання фундаменту при $P=R$	Граничний опір основи	Тиск під подошвою фундаменту	Нелінійні осідання фундаменту при тиску P	Тиск, що відповідає граничному осіданню ($S_u=10\text{см}$)
$b, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$R, \text{ МПа}$	$S_R, \text{ см}$	$P_u, \text{ МПа}$	$P, \text{ МПа}$	$S_{nl}, \text{ см}$	$P(S_u), \text{ МПа}$
Пісок середньої крупності, щільний маловологий							
1	1	0,212	0,62	1,66	0,25	0,77	1,16
3	3	0,611	5,38	4,86	0,73	6,67	1,02
Суглинок тугопластичний							
1	1	0,219	1,38	0,81	0,26	1,81	0,59
3	3	0,364	6,42	1,49	0,42	7,79	0,50
Глина м'якопластична							
1	1	0,172	1,64	0,459	0,21	2,32	0,36
3	3	0,240	5,98	0,69	0,27	7,2	0,33

Табл. 3. Результати імовірнісних розрахунків основ фундаментів
Table 3. Results of probabilistic foundation base calculations

Ширина фундаменту	Глибина закладання	Тиск під подошвою	Коеф. варіації	Математичні сподівання (середні значення)				Середні квадратичні (стандартні) відхилення				Коефіцієнти варіації				Коефіцієнт запасу	Характ. безпеки за I гр. ст. / за II гр. ст.
$b, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$P, \text{ МПа}$	$\nu(\varphi, c, E)$	$P_u, \text{ МПа}$	$S, \text{ см}$	$\Delta S/L * 10^{-3}$	$P(S_u), \text{ МПа}$	σ_{Pu}	σ_S	$\sigma_{\Delta S/L} * 10^{-3}$	$\sigma_{P(S_u)}$	ν_{Pu}	ν_S	$\nu_{\Delta S/L}$	$\nu_{P(S_u)}$	$k_{зан}$	β
Пісок середньої крупності, щільний маловологий																	
1	1	0,25	0,05	1,92	0,80	0,13	1,27	0,35	0,10	0,096	0,19	0,18	0,13	0,74	0,15	7,7	$\frac{4,76}{5,32}$
3	3	0,59	0,05	4,92	5,20	0,43	1,03	0,91	0,66	0,32	0,05	0,18	0,13	0,74	0,05	8,3	$\frac{4,75}{4,91}$
Суглинок тугопластичний																	
1	1	0,20	0,1	0,88	1,61	0,11	0,61	0,14	0,10	0,084	0,08	0,16	0,06	0,76	0,13	4,4	$\frac{4,81}{4,97}$
3	3	0,21	0,1	1,60	3,51	0,12	0,50	0,29	0,56	0,09	0,04	0,18	0,16	0,75	0,08	7,6	$\frac{4,78}{6,42}$
Глина м'якопластична																	
1	1	0,20	0,1	0,48	3,09	0,48	0,37	0,05	0,29	0,38	0,03	0,10	0,09	0,79	0,08	2,4	$\frac{5,2}{4,0}$
3	3	0,19	0,1	0,72	4,36	0,50	0,33	0,07	0,75	0,38	0,02	0,10	0,17	0,76	0,06	3,8	$\frac{7,31}{3,95}$

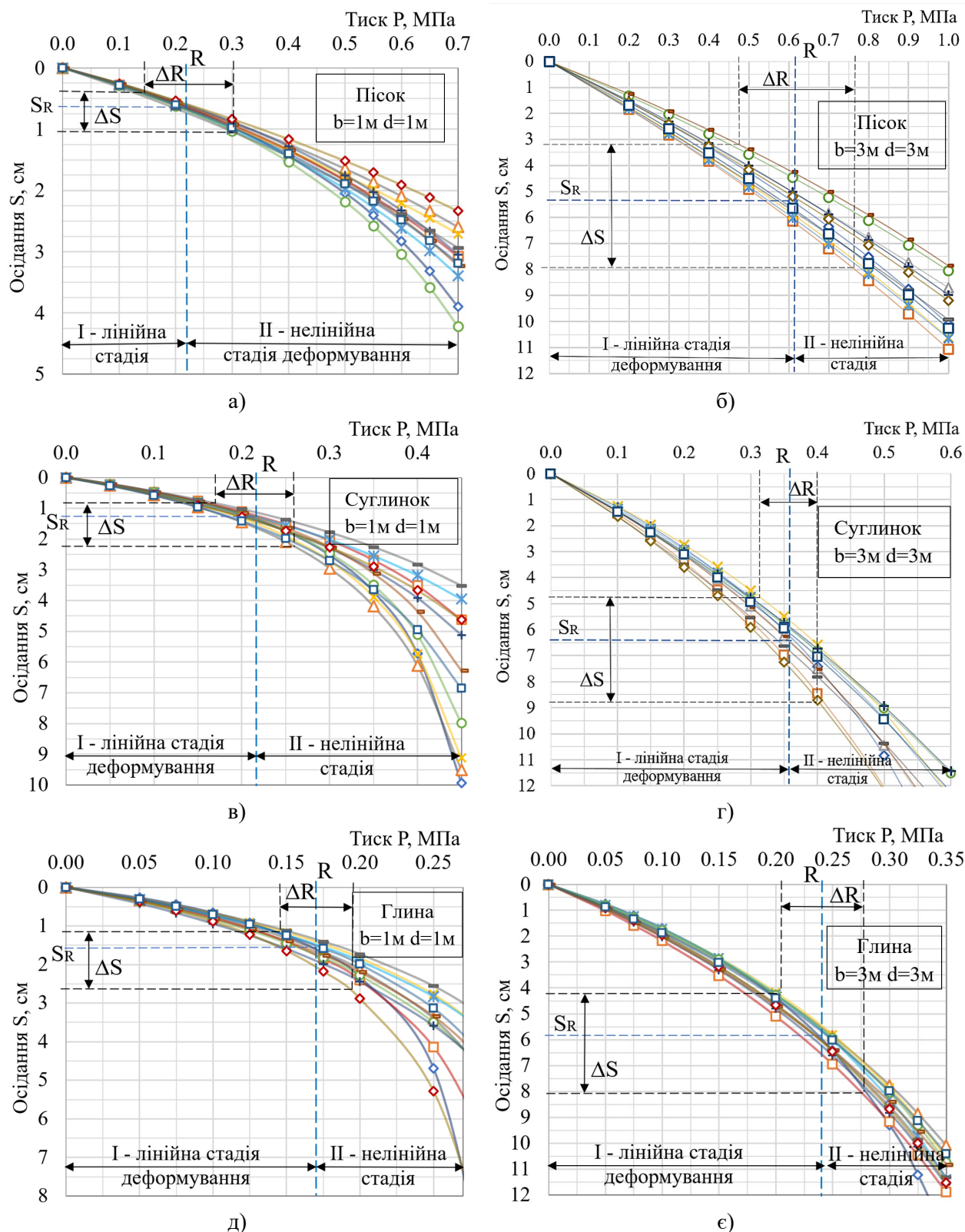


Рис.2. Імовірні осідання фундаментів на основах: а, б – із піску; в, г – із суглинка тугопластичного; д, е – із глини м'якопластичної.

Fig.2. Probable settlements of foundations on the bases: а, б – sand; в, г – stiff loam; д, е – soft clay.

Імовірнісним розрахунком основ фундаментів неглибокого закладання визначено, що значення коефіцієнтів варіації осідань

знаходяться у діапазоні $\nu(S)=0,06...0,17$, розрахункового опору $\nu(R)=0,08...0,14$, граничного опору $\nu(P_u)=0,1...0,18$, що залежить від

коефіцієнтів варіації фізико-механічних характеристик ґрунтів. Зі збільшенням розмірів підшви фундаментів значення розрахункових осідань та їх коефіцієнти варіації зростають. Ці фактори суттєво впливають на величину допустимого тиску на основу з урахуванням імовірності відмов та характеристик безпеки β .

У процесі досліджень визначені залежності коефіцієнтів варіації граничного та розрахункового опорів від варіацій характеристик ґрунтів (Рис. 3) та осідання фундаментів від модулю деформації і величини відносного навантаження основи P/P_u (Рис. 4). Найбільший вплив на $v(P_u)$ та $v(R)$ має кут внутрішнього тертя ґрунту.

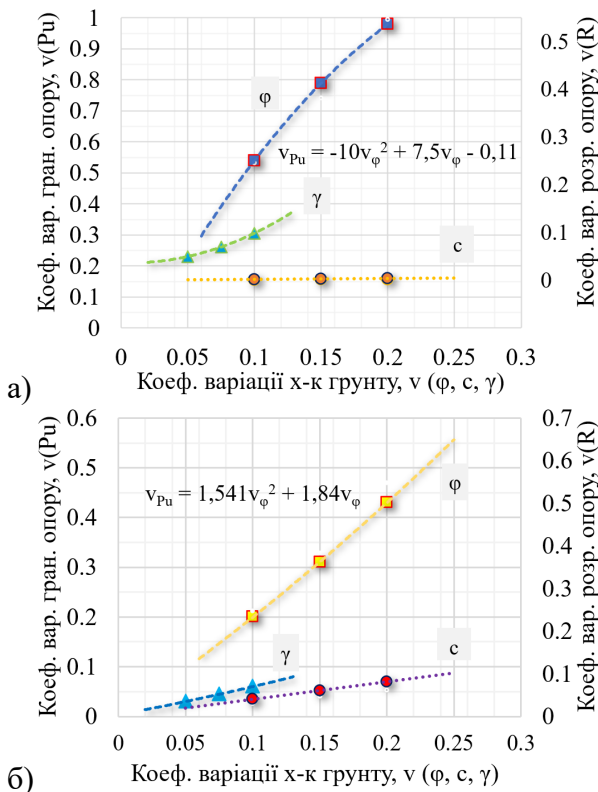


Рис.3. Залежність коефіцієнтів варіації граничного та розрахункового опорів від характеристик ґрунтів: а – для піску середньої крупності; б – для суглинку тугопластичного.

Fig.3. Coefficients of variation of the limiting and design resistances versus soil characteristics: а – medium sand; б – stiff loam.

Коефіцієнти варіації тиску $\tilde{P}_{Su}$ (при $S_u=10\text{см}$) склали $v(P_{Su})\approx 0,06\dots 0,15$.

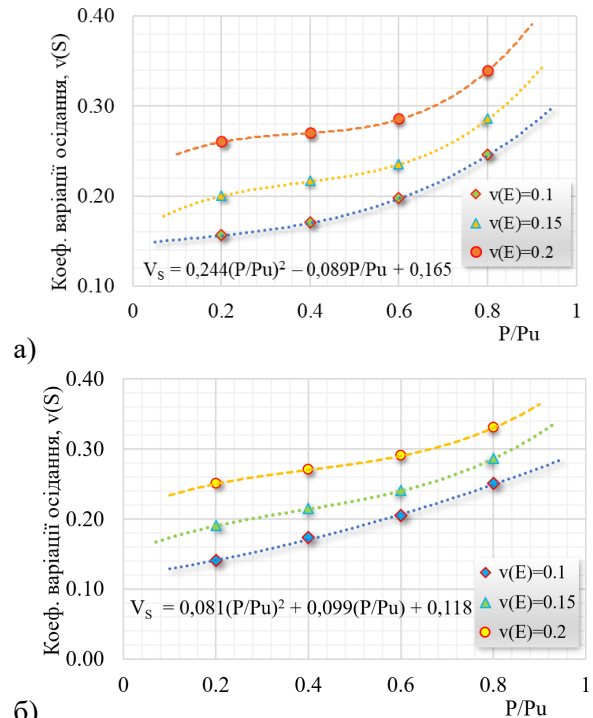


Рис.4. Залежність коефіцієнта варіації осідання від коефіцієнта варіації модуля деформації та відносного тиску: а – для піску середньої крупності; б – для суглинку тугопластичного.

Fig.4. Coefficient of variation of settlement versus coefficient of variation of elastic modulus and relative pressure: а – sized sand; б – stiff loam.

Суттєві обмеження допустимого тиску на основу виникають з метою зменшення імовірності наднормативних нерівномірних осідань фундаментів. Коефіцієнти варіації у розрахунках нерівномірних осідань склали $v(\Delta S/L)=0,74-0,79$, що свідчить про значний вплив неоднорідності характеристик на деформації фундаментів. Умова за імовірністю відмови при нерівномірності осідань $(\Delta S/L)_u=0,002$ розглянутих фундаментів забезпечена при відносних тисках $0,12-0,13P_u$ на піщаній основі, на суглинку $0,13-0,23P_u$, на глині $0,26-0,42P_u$. Характеристики безпеки при цьому склали $\beta>3,95$.

Після узагальнення даних побудовані графіки залежності імовірності відмови від варіації характеристик ґрунтів та відносного тиску P/P_u (Рис. 5). Зі збільшенням тиску на основу фундаментів імовірність їх відмови підвищується, а із досягненням напружень у

межах $P/P_u > 0,4 \dots 0,6$ стрімко зростає до значень, що перевищують допустимі.

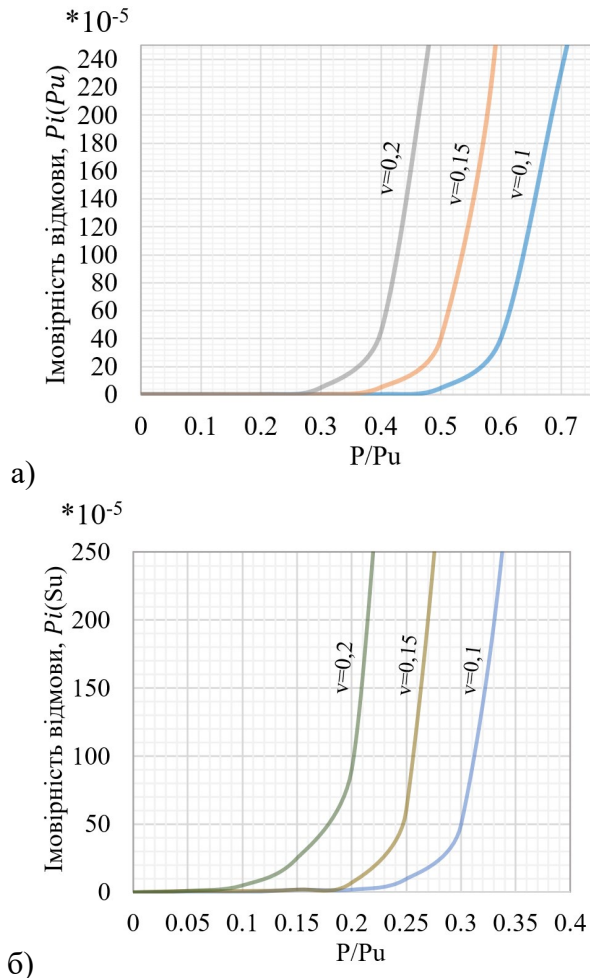


Рис.5. Залежність імовірності відмови фундаменту від варіації характеристик ґрунтів та відносного тиску P/P_u на основі із суглинку тугопластичного при коефіцієнтах варіації $v(\varphi, c, E) = 0,1 \dots 0,2$: а – за граничним опором основи $P_i(P_u)$; б – за осіданням $P_i(S_u)$.

Fig.5. Probability of the ground failure versus the variation of soil characteristics and the relative pressure P/P_u on stiff loam with the coefficients of variation $v(\varphi, c, E) = 0,1 \dots 0,2$ according: а – ultimate limit state $P_i(P_u)$; б – serviceability limit state $P_i(S_u)$.

За результатами імовірнісного аналізу НДС отримано менші на 5-50% значення допустимих тисків у порівнянні із детермінованими розрахунками, що залежить від варіації значень характеристик ґрунтів. Із імовірнісного аналізу НДС встановлено, що у багатьох випадках допустимі навантаження не

перевищують межу лінійності деформування ґрунтів.

Результати статистичного аналізу продемонстрували можливість апроксимації щільності розподілу випадкових величин R , $P(S_u)$ та P_u функцією нормального розподілу. У розподілі ВВ нелінійних осідань S_{nl} відзначається асиметрія до 0.59, що пов'язане, зокрема, із непропорційним приростом осідань у нелінійній стадії при зростаючих напруженнях у ґрунті під час навантаження фундаментом (Рис. 6).

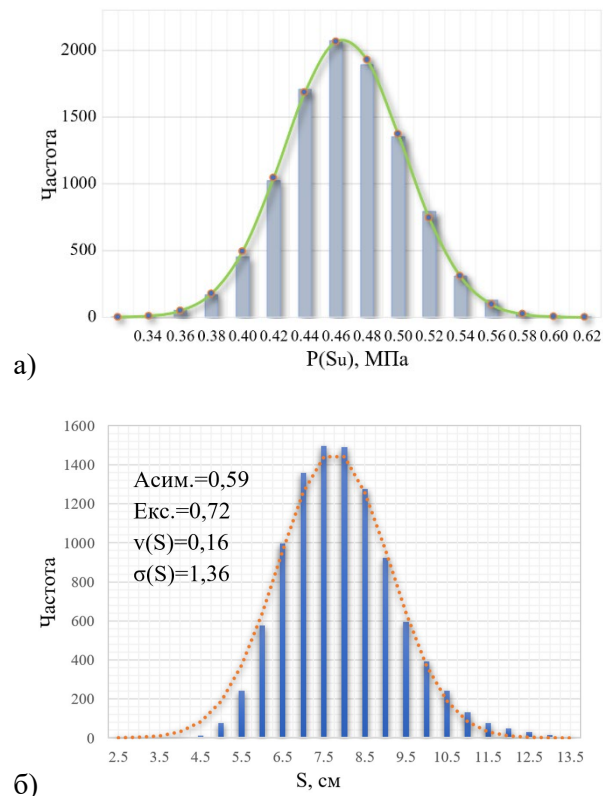


Рис.6. Діаграми розподілу ВВ, ґрунт – суглинок при $v(\varphi, c, E) = 0,1$: а – тиску $\tilde{P}_{Su}$, $v(P_{Su}) = 0,08$; б – нелінійних осідань S_{nl} .

Fig.6. Distribution diagrams of random variables, soil – loam at $v(\varphi, c, E) = 0,1$: а – pressure $\tilde{P}_{Su}$, $v(P_{Su}) = 0,08$; б – nonlinear settlements S_{nl} .

Дані щодо імовірності відмов можуть бути уточнені методом інтегрування щільності розподілу ВВ тисків та граничного опору. Графічна інтерпретація даних представлена на Рис. 7. Зі збільшенням навантаження на основу крива розподілу ВВ тиску під підшвою фундаменту $\tilde{P}$ наближається

до кривої $\tilde{P}_u$ – граничного опору основи або $\tilde{P}_{Su}$ – тиску при S_u . Імовірність відмов з'являється у випадках перетинання кривих на графіках.

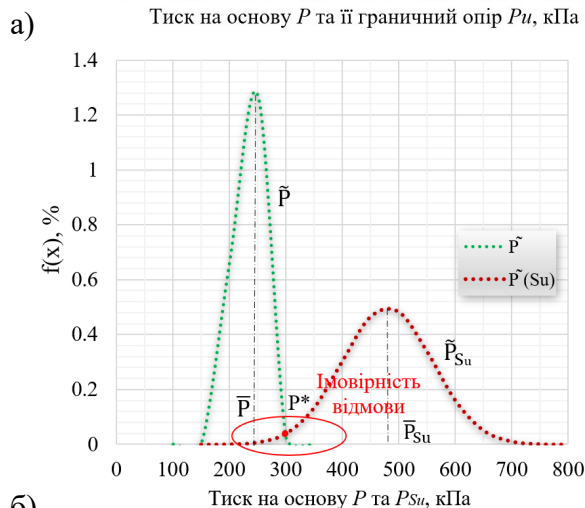
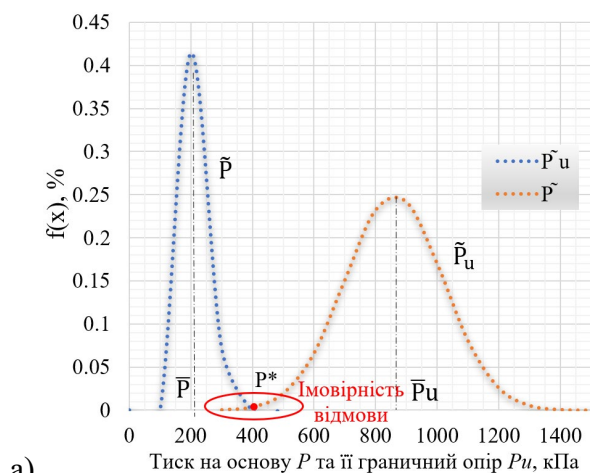


Рис.7. Щільність розподілу ВВ: а – тиск під подошвою фундаменту $\tilde{P}$ та граничний опір основи $\tilde{P}_u$; б – тиск $\tilde{P}$ та тиск $\tilde{P}_{Su}$, що спричинить граничне осідання.

Fig.7. The density of the distribution of random variables: а – design effect of action $\tilde{P}$ and the ultimate bearing capacity $\tilde{P}_u$; б – design effect of action $\tilde{P}$ and the pressure $\tilde{P}_{Su}$, corresponding to the serviceability limit.

Відношення $\bar{P}_u$ до $\bar{P}$ характеризує запас за І граничним станом, а $\bar{P}_{Su}/\bar{P}$ – за ІІ граничним станом.

Запаси за І граничним станом склали: на піщаній основі – 7,7-8,3; на суглинку – 4,4-7,6; на глині – 2,4-3,8.

У випадках неоднорідності механічних характеристик ґрунтів з коефіцієнтами варіацій $v \geq 0,15-0,2$ і одночасного їх урахування

в ймовірнісних розрахунках допустимі тиски на основи не перевищили їх розрахункові опори $P < R$.

Методика ймовірнісного аналізу НДС основ методом статистичних випробувань є ефективною при реалізації її методами комп'ютерного програмування та має переваги, зокрема, можливість моделювання ВВ неоднорідності ґрунтів різними видами функцій з урахуванням нелінійності деформування основ із великою кількістю варіаційних параметрів, на базі апробованих інженерних розрахункових моделей, що часто є складним завданням при застосуванні інших методів ймовірнісного аналізу.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Методика ймовірнісного аналізу НДС основ фундаментів неглибокого закладання з урахуванням неоднорідності і нелінійності деформування ґрунтів реалізована на базі методу статистичних випробувань із застосуванням апробованого нелінійного методу та комп'ютерного програмування.

Однією із переваг розглянутої методики є можливість статистичного моделювання ВВ різними видами функцій розподілу з урахуванням нелінійності деформування ґрунтових основ, що має перспективи для подальших досліджень.

Дослідженням впливу неоднорідності ґрунтів (при $v(\varphi, c, E)=0,1$, $v(\gamma)=0,05$) та мінливості навантажень ($v_p=0,1$) на НДС основи підтверджена ймовірність перевищення тиском під фундаментом умовної межі лінійної стадії деформування (при $\bar{P} = 0,8R$, $\tilde{P} > \tilde{R}$), що вимагає застосування методів нелінійної механіки ґрунтів. Пропонується визначати допустимий тиск на основи фундаментів за результатами ймовірнісного аналізу НДС з урахуванням неоднорідності та нелінійності деформування ґрунтів при заданих доцільних значеннях ймовірностей відмов за граничними станами.

За результатами ймовірнісного аналізу НДС отримано менші значення допустимих тисків у порівнянні із детермінованими розрахунками, що підтверджує необхідність урахування неоднорідності характеристик

ґрунтів, особливо при оцінюванні можливості підвищення навантаження і роботи основи у нелінійній стадії деформування за рахунок їх резервів несучої здатності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Трегуб, О.В. (2014). *Удосконалення методу проектування фундаментів мілкового закладання з урахуванням нелінійності деформування ґрунтів* (Автореф. Дис ... канд. техн. наук). ДВНЗ «ПДАБА». Дніпро.
2. Kirichek Y., & Tregub O. (2024). Nonlinear numerical analysis of foundations on basis of plate load test results. *Proceedings of the XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering «Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society»*, 576-581. DOI: 10.1201/9781003431749
3. Kirichek Y., & Tregub, A. (2015). Limit State Design of Shallow Foundation. *Proc. Fifth International Symposium on Geotechnical and Risk*. Rotterdam, IOS Press, 374-379.
4. Kayser M., & Gajan S. (2014). Application of probabilistic methods to characterize soil variability and their effects on bearing capacity and settlement of shallow foundations: state of the art. *International Journal of Geotechnical Engineering*, (8)4, 352-364. DOI: 10.1179/1938636213Z.000000000073
5. Chemali, B., & Tiliouine, B. (2023). Probabilistic Analysis of Shallow Foundations on c-φ Soils Using 2nd Order Response Surface Methods. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 67(2), 485-494. DOI: 10.3311/PPci.17917
6. Phoon, K.-K., & Ching, J. (2018). Risk and reliability in geotechnical engineering, *CRC Press*. DOI: 10.1201/b17970
7. Pereira C., & Caldeira L. (2011). Shallow Foundation Design through Probabilistic and Deterministic Methods. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk*, 199-207.
8. Винников, Ю.Л., & Харченко, М.О. (2015). Імовірнісні методи в геотехніці. *Галузеве машинобудування, будівництво: збірник наукових праць*, 1(43), 93-111.
9. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд: ДБН В.1.2-14:2018. (2018) [Чинний від 2019.01.01]. К.: Мінрегіон України.

10. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи статистичної обробки результатів випробувань: ДСТУ Б В.2.1-5-96 (ГОСТ 20522-96) (1996) [Чинний від 1997.04.01]. НДІОСП.
11. Клепиков С.Н. (1996). *Расчет сооружений на деформируемом основании*. НИИСК Киев.

REFERENCES

1. Tregub, O.V. (2014) *Udoskonalennya metodu proektuvannya fundamentiv milkooho zakladannya z urakhuvannyam neliniynosti deformuvannya gruntiv* [Improvement of design method of shallow foundations taking into consideration the nonlinearity of soil deformation]: (Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk) DVNZ «PDABA». Dnipro (in Ukrainian).
2. Kirichek, Y., & Tregub, O. (2024). Nonlinear numerical analysis of foundations on basis of plate load test results. *Proceedings of the XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering «Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society»*, 576-581. (in English). DOI: 10.1201/9781003431749
3. Kirichek, Y., & Tregub, A. (2015). Limit State Design of Shallow Foundation. *Proc. Fifth International Symposium on Geotechnical and Risk*. Rotterdam, IOS Press, 374-379.
4. Kayser, M., & Gajan, S. (2014). Application of probabilistic methods to characterize soil variability and their effects on bearing capacity and settlement of shallow foundations: state of the art. *International Journal of Geotechnical Engineering*, (8)4, 352-364. DOI: 10.1179/1938636213Z.000000000073
5. Chemali, B., & Tiliouine, B. (2023). Probabilistic Analysis of Shallow Foundations on c-φ Soils Using 2nd Order Response Surface Methods. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 67(2), 485-494. DOI: 10.3311/PPci.17917
6. Phoon, K.-K., & Ching, J. (2018). Risk and reliability in geotechnical engineering. *CRC Press*. DOI: 10.1201/b17970.
7. Pereira, C., & Caldeira, L. (2011). Shallow Foundation Design through Probabilistic and Deterministic Methods. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk*, 199-207.
8. Vynnykov, Y.L., & Kharchenko M.O. (2015). Imovirmisni metody v heotekhnitsi. [Probabilistic methods in geotechnics]. *Haluzeve*

- mashynobuduvannya, budivnytstvo: zbirnyk naukovykh prats'*, 1(43), 93–111. (in Ukrainian).
9. Zahal'ni pryntsyipy zabezpechennya nadiynosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel' i sporud [General principles for ensuring the reliability and structural safety of buildings and structures]: DBN V.1.2-14:2018. (2018) [Chynnyy vid 2019.01.01]. K. Minrehion Ukrayiny. (in Ukrainian).
 10. Osnovy ta pidvalyny budynkiv i sporud. Grunty. Metody statystychnoyi obrobky rezul'tativ vyprobuvan' [Foundations and foundations of buildings and structures. Soils. Methods of statistical processing of test results]: DSTU B V.2.1-5-96 (HOST 20522-96) (1996) [Chynnyy vid 1997.04.01]. NDIOSP. (in Ukrainian).
 11. Klepikov, S.N. (1996). Raschet sooruzheniy na deformiruyemom osnovanii [Calculation of structures on a deformable foundation]. NIISK. Kiev. (in Russian).

0.18.

In the case of heterogeneous soil mechanical properties with variation coefficients $v \geq 0.15 - 0.2$, and with these variations taken into account in the probabilistic calculations, the allowable pressures on the footings did not exceed the calculated resistance as the limit of linearity. At higher pressures, the probability of soil failure also increases, and from the point at which 40-60 % of the bearing capacity is reached, it rises rapidly to values exceeding the allowable limits.

According to the results of probabilistic analysis, the values of allowable pressures are 5-50 % lower than those obtained from deterministic calculations, which confirms the need to take into account the heterogeneity of soil characteristics, especially when assessing the possibility of the foundation's operation in the nonlinear stage of deformation due to their bearing capacity reserves.

Keywords. Safety, serviceability, shallow foundations, soil heterogeneity, coefficients of variation, nonlinear deformations.

Probabilistic Analysis of the Stress-Strain State of Shallow Foundation Considering Non-linear Soil Properties

*Oleksandr TREGUB,
Yuriy KIRICHEK*

Summary. The evaluation of the stress-strain state of shallow foundations, taking into account the heterogeneity and non-linearity of soil deformation and the requirements for ensuring the reliability and safety of the foundations using a probabilistic approach, allows the full use of the bearing capacity. The objective of this study is to improve the methodology for probabilistic analysis of the stress-strain state of foundations with a computational technique using random sampling, a validated non-linear method and computer programming. It is proposed to use probabilistic analysis to determine the allowable pressure in terms of both ultimate and serviceability limit states, namely ultimate bearing capacity, settlement exceedance and deformation.

Calculations of square spread footings to support column loads on sandy and clay soils were carried out using both probabilistic and deterministic approaches.

Probabilistic calculations yielded the following values of variation coefficients: $v(S)=0.06-0.17$, $v(\Delta S/L)=0.74-0.79$, $v(R)=0.08-0.14$, $v(P_u)=0.10-$