

ІМОВІРНІСНІ МЕТОДИ В ГЕОТЕХНІЦІ ШТУЧНИХ ОСНОВ

Проведено системний аналіз експериментальних статистичних даних фізико-механічних властивостей ґрунтів, у тому числі й штучних основ. Виконано огляд досягнень у галузі ймовірнісних розрахунків основ фундаментів. Особливу увагу приділено методам ймовірнісної оцінки напружено-деформованого стану (НДС) основ фундаментів за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ).

Ключові слова: ймовірнісний розрахунок, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів, випадкові величини, статистичні параметри, щільність розподілу, основа, фундаменти.

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ В ГЕОТЕХНИКЕ ИСКУССТВЕННЫХ ОСНОВАНИЙ

Изложен системный анализ экспериментальных статистических данных физико-механических свойств грунтов, в том числе и искусственных оснований. Выполнен обзор достижений в отрасли вероятностных расчетов оснований фундаментов. Особое внимание уделено методам вероятностной оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) оснований фундаментов с помощью метода конечных элементов (МКЭ).

Ключевые слова: вероятностный расчет, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, случайные величины, статистические параметры, плотность распределения, основание, фундаменты.

PROBABILISTIC METHODS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING OF ARTIFICIAL BASES

A systematic analysis of experimental statistical data of physical and mechanical properties of soils including artificial bases is conducted. The review of achievements in probabilistic design of foundations base is performed. Particular attention is paid of probabilistic methods of analysis of stressed-deformed state (SDS) of foundations base using finite elements method (FEM).

Keywords: probabilistic design, stressed-deformed state, finite elements method, random variables, statistical parameters, probability density function, base, foundations.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими практичними завданнями. Розрахунок основ фундаментів будівель і споруд виконують на базі методу граничних станів відповідно до норм проектування. Згідно з ними всі вихідні параметри, які є випадковими за своєю природою, замінюються усередненими детермінованими значеннями, а вплив їх мінливості на будівлю, що проектується, враховують за допомогою відповідних коефіцієнтів “запасу” чи “надійності” тощо. Розрахунками перевіряють лише граничні стани, при досягненні яких конструктивні елементи споруди, споруда в цілому чи її основа перестає задовольняти заданим експлуатаційним вимогам [1].

При розрахунку будівель і споруд на деформованій основі необхідно розв'язувати складну задачу, яка включає в себе оцінювання жорсткості основи, просторової

жорсткості споруди та їх взаємозв'язок. Тому виникає необхідність розглядання основи і будівлі як єдиної просторової стохастичної системи і розроблення методів її розрахунку [2].

Якщо розглядати надійність системи “основа – фундамент – будівля” (ОФБ), то на неї будуть впливати, головним чином, три фактори: 1) зовнішні навантаження і впливи; 2) міцність і деформативність конструктивних елементів будівлі; 3) міцність і деформативність основи. Ці чинники не є постійними в часі і мають мінливий характер. Тобто ймовірнісний підхід зумовлений тим, що всі характеристики міцності та деформативності системи ОФБ, а також всі впливи на них є випадковими величинами (ВВ) чи випадковими процесами [3].

Про ймовірнісну природу навантажень і впливів існує низка фундаментальних праць [4 – 8]. Навантаження (вхідні параметри), які діють на конструкцію в цей момент чи будуть діяти у майбутньому, невідомі точно. Вони можуть бути оцінені замірами навантажень на подібних конструкціях, але заміри навантажень на двох конструкціях ніколи не будуть ідентичними.

Міцність і деформативність конструктивних елементів характеризують їх геометричними параметрами і фізико-механічними властивостями матеріалів, з яких вони виготовлені. Мінливість геометричних параметрів досліджувалася в роботах [1, 2, 6, 8, 9]. Змінність фізико-механічних властивостей більшості конструктивних матеріалів внесено до норм. Так, коефіцієнт варіації призмової міцності бетону на стиск складає $v_x=13,5\%$, міцності арматурної сталі на розтяг – $v_x=5\%$, модуля пружності бетону – $v_x=4,4-9,2\%$. Розкид значень геометричних параметрів і фізико-механічних властивостей матеріалів може збільшуватися лише за умови неякісних робіт. У процесі експлуатації будівель і споруд геометричні параметри і фізико-механічні властивості матеріалів їх конструкцій змінюються (за рахунок корозії, механічних пошкоджень, втомлюваності тощо).

Основа фундаментів може бути природною, поліпшеною чи штучною. Розкид значень фізико-механічних властивостей ґрунтів природної основи зумовлено різноманітністю їх складу й структури, впливом на них геологічних й інженерно-геологічних процесів, їх полідисперсністю, багатофазністю і полімінеральністю, характером внутрішніх зв'язків тощо. Крім цього, вони змінюються у часі за рахунок інженерно-геологічних процесів. Мінливість властивостей штучних і поліпшених основ характеризується випадковою природою ґрунтів, мінливістю використаних матеріалів, змінністю технологічних параметрів та інших факторів [10 – 33].

Отже, напруження та деформації основ фундаментів – це просторово-часові випадкові поля, властивості яких залежать від неоднорідності ґрунтового масиву, а також просторових і часових флуктуацій зовнішніх навантажень і впливів. Розкид значень фізико-механічних характеристик як природних, так і штучних ґрунтових масивів більший за розкид в інших матеріалах будівельних конструкцій. Зокрема згідно з ДСТУ Б В.2.1-5-96 однорідним вважається інженерно-геологічний елемент, якщо коефіцієнт варіації для фізичних властивостей не перевищує $v_x<15\%$, а для механічних – $v_x<30\%$. Зменшити неоднорідність деформативності основи можливо також за рахунок глибоких фундаментів чи її поліпшення інженерними методами (армування, ущільнення тощо).

Тому на сучасному етапі розвитку проектування будівель і споруд доцільно розвивати методики їх розрахунку МСЕ сумісно з основами і фундаментами із залученням імовірнісних підходів. При цьому виникне можливість контролювати надійність не окремих елементів, а всієї системи ОФБ в цілому. Тому дослідження у галузі чисельних розрахунків МСЕ в імовірнісній постановці системи ОФБ є безперечно актуальним питанням сьогодення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв’язання цієї проблеми. Надійність системи “основа – фундамент – будівля” вивчали І.У. Альберт [13], Б.А. Гарагаш [2], М.Н. Гольдштейн, М.Н. Єрмолаєв, О.П. Пшенічкін [3], З.Г. Тер-Мартirosян [12], О.М. Трофімчук [17], G. Beacher, C. Onisiphorou, K. Phoon [42] та інші.

Для наближення моделі штучних основ до їх дійсного НДС урахуються особливості неоднорідності ґрунту. Цьому присвячено праці Г.К. Бондарика, О.К. Бугрова, Ю.Л. Винникова, М.Н. Гольдштейна, М.Н. Єрмолаєва, О.І. Ігнатової, І.І. Кандаурова, М.В. Корнієнка, В.І. Крутова, Б.П. Макарова, М.М. Маслова, В.В. Міхеєва, О.В. Пілягіна, А.П. Полака, М.В. Раца, З.Г. Тер-Мартirosяна, Л.М. Тимофєєвої, С.Й. Цимбала, К.Ш. Шадунца, В.І. Шейніна, О.В. Школи та інших.

Низка вчених працює в галузі ймовірного розв’язання геотехнічних задач: T. Wu, G. Meyerhof, E. Vanmarke, G. Baecher, M. Harr, R. Whitman, R. Bea, K. Ronold, P. Bjerager, J. Christian, S. Lacasse, F. Nadim, N. Morgenstern, F. Kulhawy, K. Phoon, Tang, J. Duncan, T. Vick, A. Rechenmacher, J. Won, B. Look, M. Huber, D. Griffiths, G. Fenton, S. Vaars та інші [13–31], що дало можливість підвищити надійність проектних рішень і оцінити ймовірність відмови.

Розвиваються й рішення геотехнічних задач МСЕ. Але ймовірнісний підхід при моделюванні МСЕ геотехнічних процесів розвинений ще слабо [31]. Декілька наукових центрів у Європі: Graz University of Technology (G. Peschl, H. Schweiger, R. Pottler і R. Thurner); University of Manchester (M. Hicks); Dutch Ministry of Public Affairs (H. Bakker); Delft University of Technology (P. Waarts), ПолтНТУ (Ю.Л. Винников, М.О. Харченко) та в США і Канаді займаються розв’язанням цих питань [32 – 45].

Виділення не розв’язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття. Перш за все слід визначитися із законами розподілу ВВ та статистичними параметрами, що притаманні для характеристик як природних ґрунтів, так і штучних масивів. Вивчити закономірності, що відбуваються в ґрунтових масивах протягом їх експлуатації. Визначити закон розподілу ВВ і статистичні параметри навантажень на основу фундаментів. Треба з’ясувати доцільність застосування різних ймовірнісних методів розрахунку при оцінюванні НДС ґрунтових основ, у тому числі й за допомогою чисельних методів.

Тому за **мету роботи** прийнято виконати системний аналіз експериментальних статистичних даних фізико-механічних властивостей ґрунтів, у тому числі й штучних основ; світових досягнень у галузі ймовірнісних розрахунків основ фундаментів; проаналізувати НДС основ фундаментів оцінюванням МСЕ з використанням пружно-пластичної моделі та імітаційного моделювання.

Виклад основного матеріалу дослідження.

1. *Природні ґрунти.* Як статистичні параметри ВВ властивостей ґрунтів прийнято математичне очікування μ_x , середнє квадратичне відхилення (стандарт) σ_x , коефіцієнт варіації v_x і закон розподілу. Значення коефіцієнтів варіації (COV) і законів розподілу (probability density function) ВВ властивостей природних ґрунтів за даними різних авторів зведено до табл. 1.

2. *Штучні основи.* Одним із видів влаштування штучних основ є ущільнення природних ґрунтів. Ущільненим ґрунтовим масивам притаманна неоднорідність, за параметри якої прийняті: випадковий розкид значень характеристик ґрунтів, анізотропія їх механічних властивостей тощо. Ці параметри залежать від виду і природних властивостей матеріалу штучної основи, технологічних параметрів її зведення.

За даними З.Г. Тер-Мартirosяна при використанні неоднорідних моделей є можливість досить точно прогнозувати властивості штучних основ. Наприклад, з високою достовірністю визначити характеристики піщаної подушки з високим

коефіцієнтом неоднорідності, а також підібрати оптимальне процентне співвідношення включень у ґрунті штучного походження для досягнення максимального ефекту [12].

За натурними і лабораторними дослідженнями штучних основ, що виконані Ю.Л. Винниковим, В.І. Коваленком й автором, встановлено такі статистичні закономірності для ущільнених ґрунтів і технологічних параметрів їх влаштування (табл. 2).

Ще одним видом поліпшення властивостей природних основ є їх армування вертикальними елементами з більшою жорсткістю. Прикладом такого підходу є влаштування ґрунтоцементних елементів. Властивості таких елементів є також змінними, що пов'язано з технологічним процесом їх влаштування й мінливістю властивостей ґрунту. Провівши аналіз літературних джерел й результатів досліджень (під керівництвом М.Л. Зоценка) ґрунтоцементних елементів (ГЦЕ), встановлено, що більшість ВВ його властивостей описуються нормальним законом розподілу. Так, наприклад, для ВВ модуля деформації ґрунтоцементу коефіцієнт варіації становить 10 – 15 %.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта варіації v_x (COV) та законів розподілу для різних характеристик природного ґрунту

| Характеристика | Коефіцієнт варіації v_x (COV), % Закон розподілу (probability density function) | | | |
|-----------------------------------|--|---|---|--|
| | пісок | супісок | суглинок | глина |
| Вологість, w | $\frac{30-50}{4,4-49}$ / нормальний | $\frac{10-30}{6,2-27,7}$ / 8-30 / нормальний | $\frac{8-28}{3,8-15}$ / 8-30 / нормальний | $\frac{4-25}{12,65-8}$ / 30 / нормальний |
| Коефіцієнт пористості, e | $\frac{3-13}{1,1-6,7}$ / нормальний | $\frac{6-12}{2,3-16,5}$ / нормальний | $\frac{6-25}{3,5-14,2}$ / нормальний | $\frac{3-22}{19,3}$ / нормальний |
| Щільність, ρ | $\frac{2-7,5}{0,5-3,2}$ / <10 / нормальний | $\frac{2-4,5}{0,5-2,5}$ / <10 / нормальний | $\frac{2,5-7,5}{0,8-3,7}$ / <10 / нормальний | $\frac{2-6}{4,3}$ / <10 / нормальний |
| Щільність частинок, ρ_s | - / 0-0,3 / нормальний | - / 0,2-0,65 / нормальний | - / 0,2-0,6 / нормальний | - / 0,8 / нормальний |
| Число пластичності, I_p | | $\frac{25-50}{-10-40}$ / нормальний | $\frac{5-35}{-10-40}$ / нормальний | $\frac{7-30}{-10-40}$ / нормальний |
| Межа розкочування, w_p | | $\frac{6-17}{-6-30}$ / нормальний | $\frac{5-25}{-6-30}$ / нормальний | $\frac{7-27}{-6-30}$ / нормальний |
| Межа текучості, w_L | | $\frac{5-16}{-6-30}$ / нормальний | $\frac{5-20}{-6-30}$ / нормальний | $\frac{5-20}{-6-30}$ / нормальний |
| Опір зрушенню, τ | - / - | $\frac{9-27}{-10-30}$ / логарифмічно нормальний | $\frac{6-29}{-10-30}$ / логарифмічно нормальний | $\frac{-}{-20-50}$ / логарифмічно нормальний |
| Кут внутрішнього тертя, φ | $\frac{-}{-5-15}$ / нормальний | - / -5-15 | - / -12-56 | - / -12-56 |
| Модуль деформації, E | $\frac{-}{-15-65}$ / логарифмічно нормальний | - / - | $\frac{15-35}{18,6-65,4}$ / логарифмічно нормальний | - / - |

Примітка: у чисельнику дані за Єрмолаєвим М.М. і Михєєвим В.В. [1] / дані за Бугровим О.К. і Шиліним В.Г. [1] / дані за Phoon K.K and Kulhawy [42]; у знаменнику закон розподілу за Fenton G.A. [18]

Таблиця 2 – Статистичні параметри розподілів ВВ властивостей ущільнених ґрунтів і технологічних параметрів

| Найменування характеристики | Закон розподілу | Статистичні параметри | | |
|--|-------------------------|-----------------------|---------------------|------------|
| | | Стандарт | Коефіцієнт варіації | Дисперсія |
| Товщина першого/інших шарів штучної основи | нормальний | 0,14/0,06 | 26,5/15 | 0,02/0,004 |
| Питома вага ґрунту | нормальний | 0,9 | 4,6 | 0,76 |
| Кут внутрішнього тертя | нормальний | 3,3 | 11 | 10,92 |
| Питоме зчеплення | логнормальний | 0,3 | 10 | 0,08 |
| Модуль деформації | логарифмічно нормальний | | | |
| - в інтервалах тиску 0 – 0,05 МПа | | 0,48 | 24 | 0,23 |
| - в інтервалах тиску 0,05 – 0,1 МПа | | 0,33 | 17 | 0,11 |
| - в інтервалах тиску 0,1 – 0,2 МПа | | 0,34 | 13 | 0,11 |
| - в інтервалах тиску 0,2 – 0,3 МПа | | 0,33 | 11 | 0,11 |

3. *Навантаження на фундаменти.* З аналізу літературних джерел щодо мінливості навантажень на фундаменти можливо зробити такі узагальнення. Згідно із С. Pereira, L. Caldeira і Joint Committee on Structural Safety recommendations (JCSS) [25] закони розподілу вертикальних постійних і тимчасових навантажень є нормальними з COV 10 % і 50 % відповідно, горизонтальне змінне навантаження описується законом Гумбеля з COV 25 %. Результати досліджень J. Xue і D. Nag [7] випадкової природи навантаження на фундаменти вчених зведено до табл. 3.

Таблиця 3 – Значення коефіцієнта варіації (COV) для навантажень на фундаменти

| Вид навантаження | COV |
|--|------|
| Постійне навантаження | 0,1 |
| Змінне навантаження (50 років максимум) | 0,25 |
| Снігове навантаження (50 років максимум) | 0,26 |
| Вітрове навантаження (50 років максимум) | 0,37 |
| Навантаження від землетрусу (50 років максимум, зх. і сх. США) | 1,38 |

4. *Ймовірнісні методи в геотехніці.* Основна відмінність між детермінованим та ймовірнісним розрахунком наведено на рис. 1. Для оцінювання надійності будівельних конструкцій розроблено низку методик: лінеаризації, перебору О.С. Личова, методика заміни випадкових аргументів (чисельне інтегрування) В.П. Чиркова, статистичних випробовувань Монте-Карло (Monte Carlo Simulation), заміни функції на обмеженій ділянці рівнянням регресії (метод апроксимуючих поліномів, Response Surface Method), Point Estimate Method (FO-PEM & A-PEM) і First Order Reliability Method (A-FORM) тощо [18, 22 – 31, 36 – 45].

Кожний із цих методів є зручним інструментом для розв'язання конкретної задачі. Найбільш універсальними із них є Monte Carlo Simulation (MCS), Response Surface Method (RSM) та Point Estimate Method (PEM). Саме вони використовуються для розв'язання геотехнічних задач МСЕ, що реалізовано в програмних комплексах Ansys (США), Phase² (Канада) та спеціальній утиліті до Plaxis (під керівництвом S. Baars). Адаптацію МСЕ для ймовірнісних розрахунків виконували такі вчені, як Rosenblueth, Evans, Zhou, Nowak, Harr, Li, G. Peschl, H. Schweiger та інші.

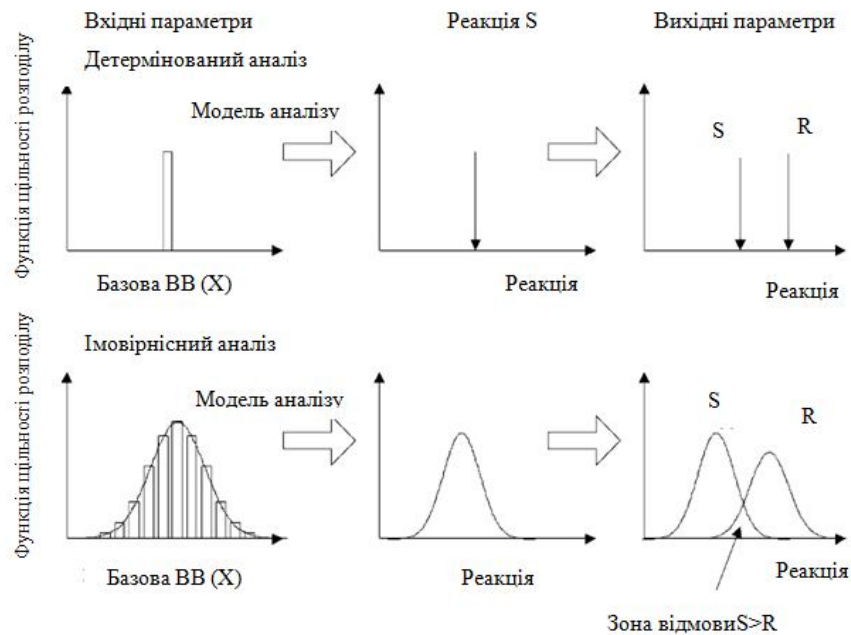


Рисунок 1 – Ілюстрація детермінованого та ймовірнісного методів

Алгоритм деяких методів розглянемо нижче. Метод лінеаризації заміняє нелінійну функцію на невеликому інтервалі лінійною. Така заміна у багатьох випадках не дає суттєвих похибок. До лінійних функцій можливо застосувати способи визначення числових статистичних характеристик (зокрема математичного очікування (1) й дисперсії (2)), а при взаємодії – окремих розподілів (3))

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n); \quad (1)$$

$$D = \sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2; \quad (2)$$

$$D = \sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 + 2 \sum_{i < j} \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial y}{\partial x_j} \right) r_{ij} \sigma_{x_i} \sigma_{x_j}. \quad (3)$$

Щільність розподілу системи незалежних ВВ дорівнює добутку щільності розподілів окремих величин, що входять до системи

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_1(x_1) \cdot f_2(x_2) \cdot \dots \cdot f_n(x_n). \quad (4)$$

Імовірність потрапляння результату, визначеного величинами x_1, x_2, \dots, x_n , у n -вимірну область D , виражається n -кратним інтегралом

$$P((x_1, x_2, \dots, x_n) \in D) = \int_{(D)} \int f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n. \quad (5)$$

Як видно з формул (1) – (3), визначення дисперсій функції може викликати значні труднощі, пов'язані з її диференціюванням. При довільних законах розподілу вхідних параметрів залежність (5) аналітично не розв'язується. Для подолання цих ускладнень можливо застосувати *Response Surface Method* (рис. 2) – функція на обмеженій ділянці може бути замінена рівнянням регресії у вигляді полінома першого ступеня (6) чи для підвищення точності розрахунку n -го ступеня (7)

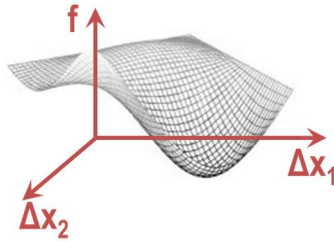


Рисунок 2 – Ілюстрація Response Surface Method

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \Rightarrow b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n; \quad (6)$$

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{nn}x_n^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_3x_2 + \dots + b_{1n}x_1x_n. \quad (7)$$

За допомогою часткових похідних рівняння регресії за змінними аргументами записується нове рівняння для визначення дисперсії функції (8), а в разі нелінійного полінома (9)

$$D = \sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n (b_i \sigma_{x_i})^2; \quad (8),$$

$$D = \sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_{xi}} \sigma_{x_i} \right)^2. \quad (9)$$

Суть *Monte Carlo Simulation* полягає в тому, що за допомогою генератора випадкових чисел за визначеними законами розподілу організовується набір змінних, за якими розраховуються значення вихідної функції. Ці значення запам'ятовують і сортують за інтервалами, формуючи гістограму випадкової функції. Після реалізації достатньо великої кількості значень ВВ дослідної функції за згрупованими інтервалами будують ступінчасту апроксимацію дослідної кривої розподілу цієї функції.

Суть методу *PEM* зображено на рис. 3.

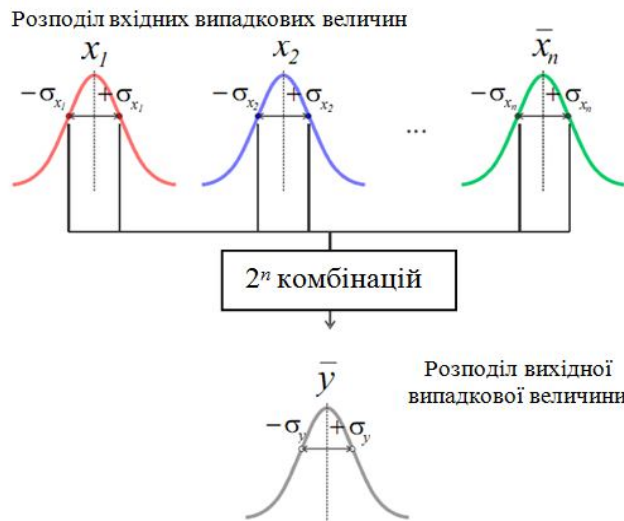


Рисунок 3 – Ілюстрація принципу ймовірного розрахунку за методикою PEM

Імовірність відмови p_f знаходять інтегруванням щільності розподілу вихідної ВВ за допомогою функції Лапласа. За характеристикою безпеки β це виконується таким чином: $p_f = \Phi(-\beta)$. Характеристика безпеки (reliability index) визначається як $\beta = (S_{cp})/\sigma_S$ (де S_{cp} , σ_S – математичне очікування і стандартне відхилення резерву міцності для I граничного стану, осідання – для II граничного стану).

5. *Результати ймовірного оцінювання НДС основ фундаментів.* Відмова фундаменту складається зі складових: 1) втрата несучої здатності основи (I граничний стан) тиск під подошвою фундаменту більший за граничний опір ґрунту $p > p_u$; 2) абсолютні $S > S_u$ чи нерівномірні $\Delta S/L > (\Delta S/L)_u$ осідання основи перевищують гранично допустимі значення (II граничний стан). Ймовірність відмови фундаменту на природній основі за критерієм втрати несучої здатності залежно від коефіцієнта варіації (COV) вертикальної F_y і горизонтальної F_x сил при детермінованих властивостях ґрунтової основи за [7] наведено на рис. 4.

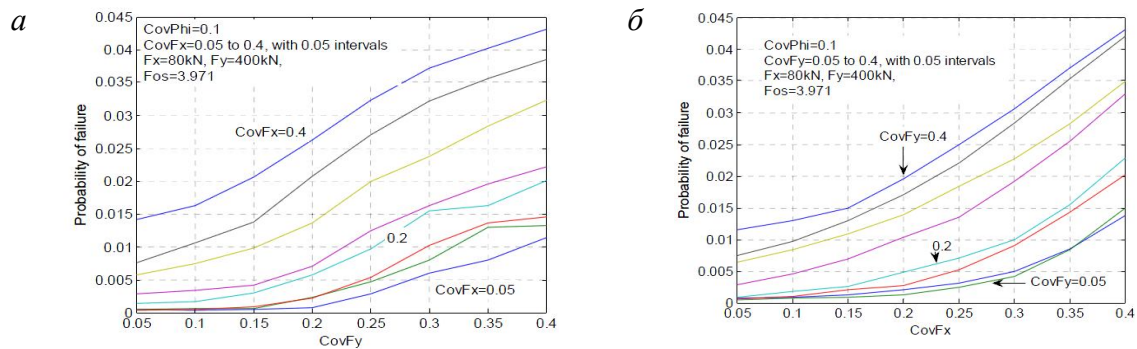


Рисунок 4 – Ймовірність відмови фундаменту на природній основі за критерієм втрати несучої здатності залежно від коефіцієнта варіації (COV) вертикальної F_y (а) і горизонтальної F_x (б) сил за [7]

Визначення відмови основи фундаментів за II граничним станом ускладнено тим, що осідання можуть бути лінійними S_n та нелінійними S_p . Межу застосування розрахункової схеми у вигляді лінійно-деформованого півпростору основи для визначення її осідання на базі функції випадкових аргументів $\tilde{Q} = \tilde{R} - \tilde{p}_0$ (де p – тиск під подошвою фундаменту; R – розрахунковий опір ґрунту) подано на рис. 5.

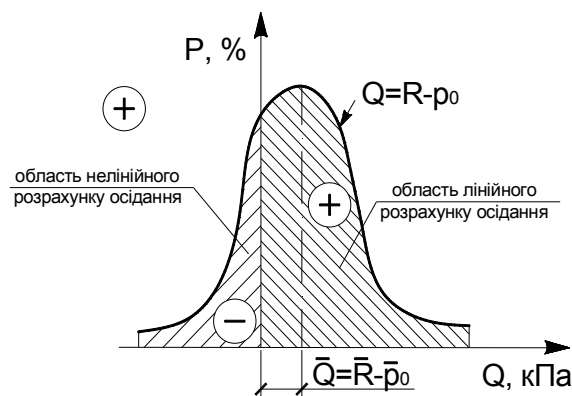


Рисунок 5 – Графічна інтерпретація визначення ймовірності меж застосування моделі основи у вигляді лінійно-деформованого півпростору для розрахунку осідання фундаменту на ній

Тому на першому етапі доцільно визначити статистичні параметри розподілів ВВ розрахункового R і граничного p_0 опорів ґрунту. Для розв’язання задачі (на прикладі ущільнених ґрунтів, табл. 2) використано MCS. Результати цих аналітичних досліджень зведено до табл. 4. Знаючи приблизну область лінійних і нелінійних ВВ осідання основи фундаменту, можливо виконувати такий етап ймовірного розрахунку.

Таблиця 4 – Статистичні параметри розподілів функцій випадкових аргументів розрахункового R і граничного p_u опорів ущільнених ґрунтів

| Найменування характеристики | Закон розподілу | Статистичні параметри | | |
|-----------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------|-----------|
| | | стандарт | коефіцієнт варіації | дисперсія |
| Розрахунковий R опір | нормальний | 59,6 | 21,8 | 3552,2 |
| Граничний p_u опір | нормальний | 550,3 | 34,4 | 302830,1 |

Значення осідання фундаменту $S_{\text{л}}$ при лінійній стадії деформування основи є функцією випадкових аргументів $S_{\text{л}} = f(E, \sigma_{zp})$, а при нелінійній – $S_{\text{п}} = f(p, R, p_u, \sigma_{zg0})$. Блок-схему ймовірнісного розрахунку осідань фундаменту на багат шаровій подушці з урахуванням випадковості меж лінійного деформування основи наведено на рис. 6.

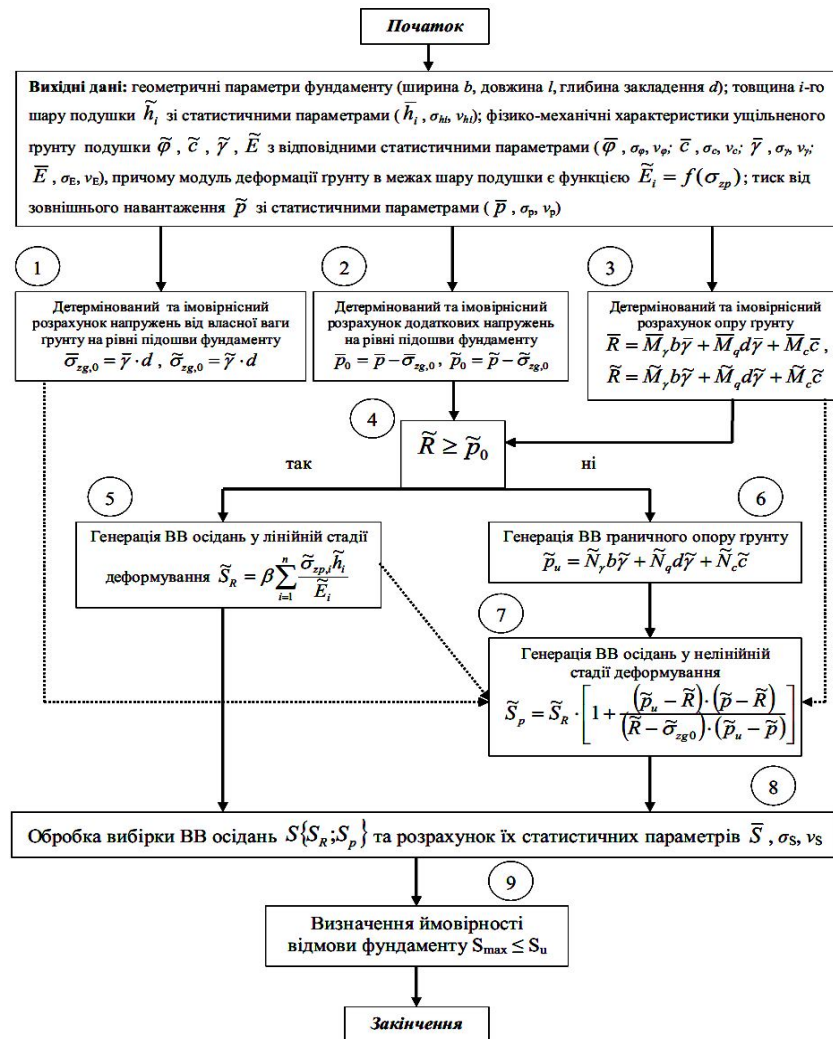


Рисунок 6 – Блок-схема ймовірнісного розрахунку осідань фундаменту на подушці з урахуванням випадковості меж лінійного деформування основи

Отже, при ймовірнісному підході до визначення осідання фундаменту на подушці встановлено, що існує ймовірність лінійної та нелінійної стадій деформування основи при неперевищенні тиску під фундаментом розрахункового опору ґрунту при детермінованому підході, що зумовлено неоднорідністю ґрунтів і випадковою

природою навантажень на них. Закон розподілу осідань близький до нормального, параметри цього розподілу (на прикладі ущільнених ґрунтів) наведено в табл. 5.

6. *Ймовірнісний аналіз НДС основ за допомогою чисельного моделювання.* Ймовірнісний розрахунок можливо виконати моделюванням з використанням МСЕ. На прикладі ущільнених ґрунтів виконано моделювання НДС штучних основ із вхідними параметрами аналогічними аналітичному розрахунку (табл. 2). При моделюванні МСЕ НДС подушок використано модель ґрунту у вигляді ізотропного суцільного середовища відповідно до теорії пластичної течії.

Таблиця 5 – Результати ймовірнісного розрахунку осідання основи фундаменту

| Найменування характеристики | Осідання основи фундаменту в лінійній стадії | | | | Осідання при випадковості лінійної і нелінійної стадій деформування ґрунту | | |
|---|--|----------------------|--------------------|----------------------|--|------|--------------|
| | Метод лінеаризації | | Метод Монте-Карло | | Одношарова подушка | | Багатошарова |
| | Одношарова подушка | Багатошарова подушка | Одношарова подушка | Багатошарова подушка | Аналітично | МСЕ | Аналітично |
| | | | | | Аналітично | МСЕ | Аналітично |
| Математичне сподівання, см | 0,67 | 2,07 | 0,72 | 1,7 | 0,83 | 1,35 | 1,98 |
| Стандарт, см | 0,22 | 0,46 | 0,26 | 0,33 | 0,39 | 0,54 | 0,69 |
| Коефіцієнт варіації, % | 33 | 22 | 37 | 19 | 47 | 40 | 35 |
| Ймовірність відмови (перевищення $S > S_u = 10$ см) | | | | | $(S_u - S_{ср} \gg 5\sigma)$ | | |

Міцність ґрунту описується відповідно до умови Друкера – Прагера. Згідно із цими передумовами ґрунт вважають пружно-ідеальнопластичним матеріалом, деформування якого відбувається згідно з діаграмою Прандтля. Це означає, що поверхня текучості не міняється при зростанні деформації текучості, а отже, відсутнє зміцнення. Підсумки розрахунку фундаменту на подушці у вигляді просторової моделі, що розбита на СЕ, подано на рис. 7.

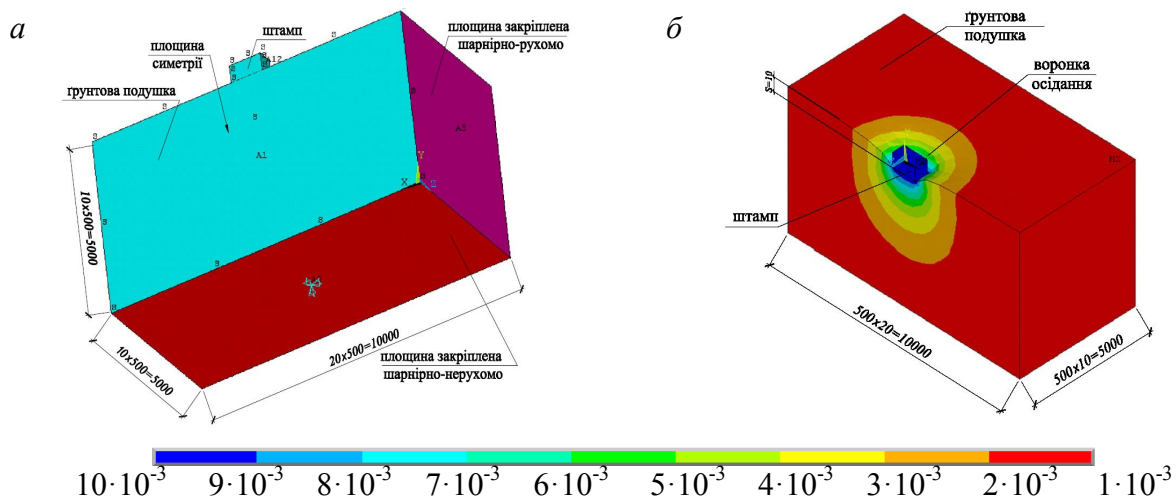


Рисунок 7 – Розрахункова схема МСЕ фундаменту на подушці у просторовій постановці (а), деформована схема і розподіл ізополів осідання подушки при детермінованому розрахунку (б)

Результати моделювання НДС штучних основ МСЕ за MCS (кількість ітерацій 10^4) наведено на рис. 8. Порівняльний аналіз статистичних характеристик осідання фундаментів на ґрунтовій подушці за різними методами аналітичного та чисельного ймовірнісного розрахунку наведено в табл. 5.

Існує низка ймовірнісних геотехнічних задач, які аналітично розв'язати майже неможливо. Наприклад, розрахунок армованих основ фундаментів зерносховищ ускладнено циклічним режимом навантаження, відсутністю аналітичної функції осідання від характеристик армованої основи при пружно-пластичному деформуванні тощо.



Рисунок 8 – Гістограма розподілу ВВ осідань за чисельним розрахунком МСЕ в імовірнісній постановці за допомогою MCS

Як приклад, визначено допустиму нерівномірність завантаження двох зерносховищ, що мають спільну фундаментну плиту на слабкій основі (рис. 9), при неперевищенні якого крен споруди буде в межах норм. Із цією метою проведено чисельне моделювання НДС слабкої основи, яка армована ГЦЕ, фундаментної плити силосів МСЕ. При цьому застосована як модель ґрунту Hardening Soil Model (HSM) з параметрами, які підібрано на базі натурних геодезичних спостережень за осіданням армованої основи плити (рис. 10). Ця модель адекватно описує НДС основи як на етапах завантаження, так і розвантаження.

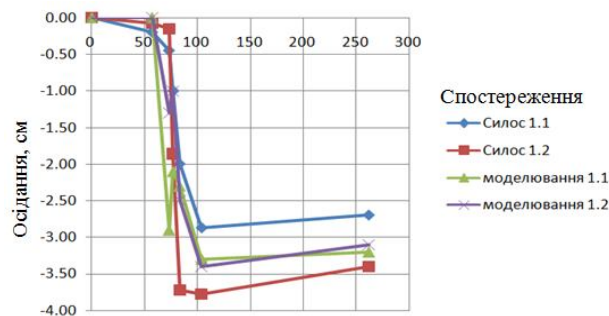


Рисунок 9 – Графіки осідань основи в часі за даними геодезичних спостережень і моделювання

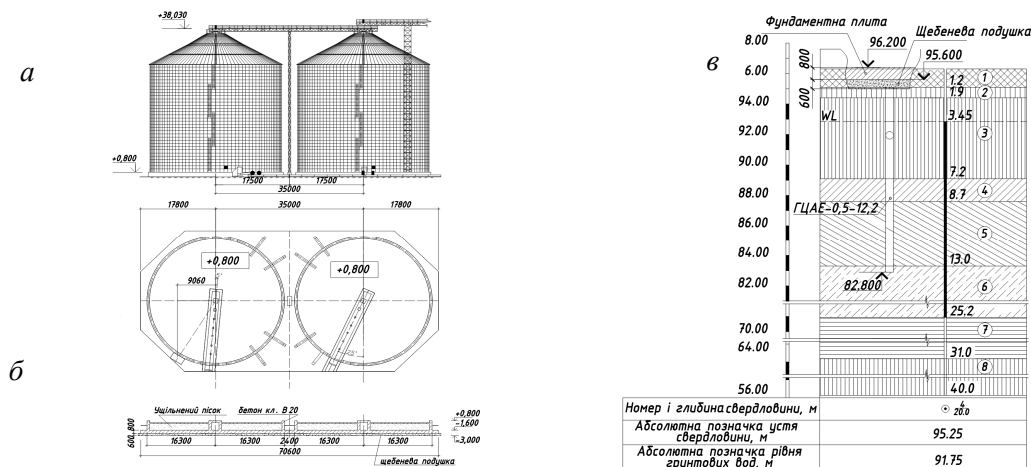


Рисунок 10 – Загальний вигляд зерносховища силосного типу об'ємом 24121 м³ кожен (20000 т зерна): а – фасад; б – план на позн. +0.800 і розріз по плиті; в – інженерно-геологічний розріз

Таблиця 6 – Вихідні дані для ймовірнісного розрахунку армованої основи фундаменту силосів

| Найменування характеристики | Закон розподілу | Статистичні параметри |
|--------------------------------------|-------------------------|------------------------|
| | | Коефіцієнт варіації, % |
| Модуль деформації ґрунту, МПа | логарифмічно нормальний | 15 |
| Модуль деформації ґрунтоцементу, МПа | нормальний | 15 |
| Завантаження силосу, кПа | нормальний | 30 |

У цих інженерно-геологічних умовах прийнято рішення влаштувати фундаментну плиту на армованій ГЦЕ основі на 12 м нижче її підшви. Для забезпечення необхідних характеристик міцності та деформативності основи процент її армування становив приблизно 25 %. При цьому діаметр ГЦЕ прийнято 0,5 м, а їх крок – 0,9 і 0,95 м. Статистичні параметри вхідних ВВ зведено до табл. 6. Для уникнення великої кількості ітерацій при імітаційному чисельному моделюванні МСЕ використано РЕМ (рис. 11).

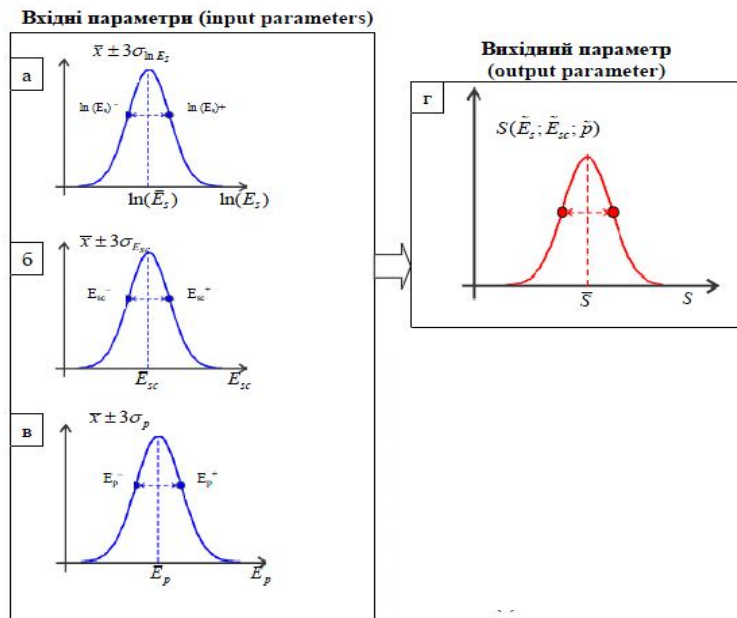


Рисунок 11 – Схема ймовірнісного розрахунку за РЕМ: а – щільність розподілу модуля деформації ґрунту E_s ; б – щільність розподілу модуля деформації ґрунтоцементу E_{sc} ; в – щільність розподілу тиску на армовану основу p ; г – щільність розподілу осідання армованої основи S

Одночасно варіювали на двох рівнях ($\mu \pm 3\sigma$, де μ – математичне очікування, σ – стандартне відхилення): 1) модуль деформації шарів стиснутої товщі армованої основи E ; 2) завантаження силосу №1; 3) завантаження силосу №2.

При різних комбінаціях ВВ виконувалось чисельне моделювання та визначались осідання основи і крен плити на різних етапах експлуатації силосів (первинне завантаження-розвантаження, наступні серії завантаження-розвантаження). На рис. 12 наведено деформовану скінченно-елементну просторову сітку розрахункової моделі на одному з етапів імітаційного моделювання за РЕМ. Розподіл і статистичні параметри ВВ осідання армованої основи фундаментної плити після первинного завантаження і розвантаження за результатами імітаційного чисельного розрахунку наведено на рис. 13.

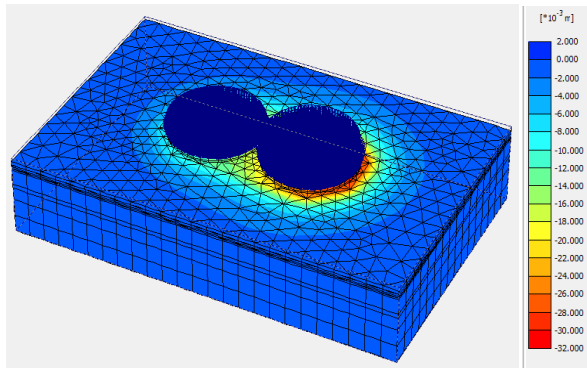


Рисунок 12 – Деформована скінченно-елементна просторова сітка розрахункової моделі на одному з етапів імітаційного моделювання за PEM

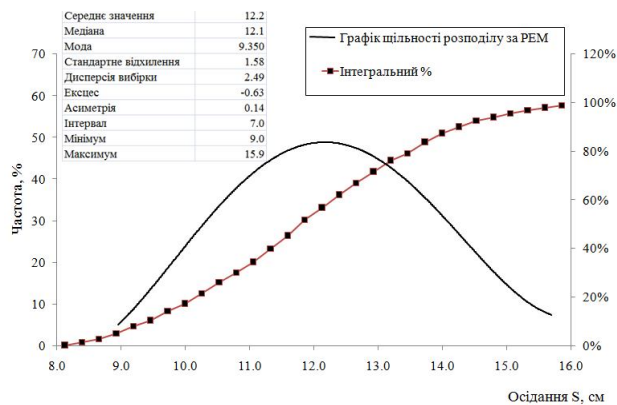


Рисунок 13 – Розподіл ВВ осідання армованої основи фундаментної плити силосів за результатами імітаційного розрахунку МСЕ

Розподіл і статистичні параметри ВВ крену фундаментної плити наведено на рис. 14 (значення крену помножено на 10^4). При наступних завантаженнях силосів абсолютні осідання основи збільшуються та мають явний затухаючий характер. При цьому ймовірність відмови за критерієм осідання не перевищує 0,001, а за критерієм крену – 0,07.

На базі отриманих за імітаційним моделюванням статистичних даних осідання армованої основи та крену фундаментної плити визначено ймовірність відмови і безвідмовної роботи конструкції за критеріями абсолютного осідання (рис. 15) та крену залежно від процента армування слабкої основи ГЦЕ. За імітаційним моделюванням отримано, що ймовірність відмови за критерієм крену залежно від процента армування (15...25 %) слабкої основи ГЦЕ коливалася від 0,03 до 0,05.

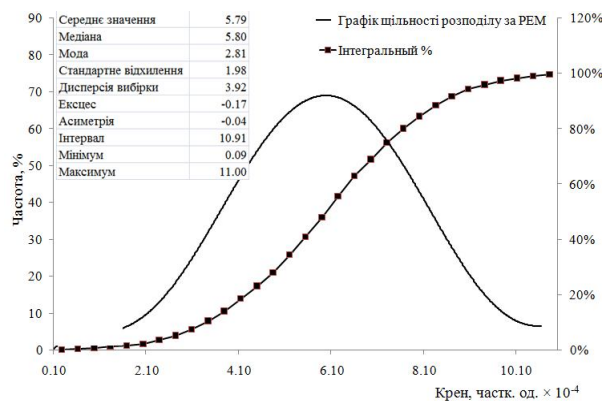


Рисунок 14 – Розподіл ВВ крену фундаментної плити силосів за результатами імітаційного розрахунку МСЕ (значення крену помножено на 10^4)

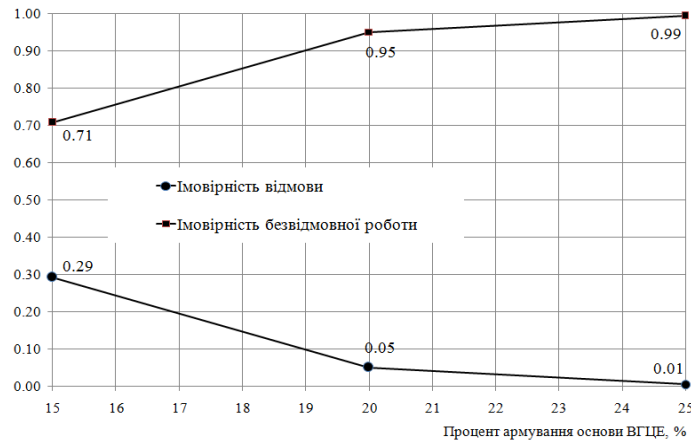


Рис. 15 – Імовірність відмови і безвідмовної роботи споруди за критерієм абсолютного осідання залежно від процента армування основи

За результатами імітаційного моделювання допустима нерівномірність завантаження силосів зі спільною фундаментною плитою на армованій основі складає 20 %. При цьому ймовірність відмови споруди за критерієм гранично допустимого крену фундаментної плити $i=0,002$ буде менше 0,01. На базі результатів імітаційного моделювання МСЕ за РЕМ для рівня надійності $p=0,9$ підбрано мінімально необхідний процент армування основи ВГЦЕ ($i=19\%$).

Висновки. Для ймовірнісних розрахунків основ фундаментів можливо використати статистичні дані ВВ фізико-механічних властивостей природних ґрунтів за табл. 1, ущільнених ґрунтів – за табл. 2, навантажень на основу – за табл. 3, армованих основ ГЦЕ – за табл. 6.

При визначенні рівня надійності основ фундаментів за критеріями їх несучої здатності й деформацій необхідно враховувати випадковість лінійної та нелінійної стадій деформування ґрунту (рис. 5 і 6).

Для визначення рівня надійності як природної, так і штучної основи фундаментів чисельними методами доцільно використати MCS, RSM та РЕМ, що сьогодні достатньо апробовано вченими, в тому числі автором статті.

Для раціонального проектування основ фундаментів необхідно приймати технічні рішення, які дозволять досягнути необхідний рівень надійності (рис. 15).

Література

1. Бугров, А.К. Определение вероятностных характеристик активного давления грунта методом Монте-Карло / А.К. Бугров, В.Г. Шилин // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2003. – № 5. – С. 92 – 94.
2. Гарагаи, Б.А. Надежность пространственных регулируемых систем “сооружение – основание” при неравномерных деформациях основания / Б.А. Гарагаи. – Сочи: Изд-во “Кубанькино”, 2004. – 908 с.
3. Пиеничкин, А.П. Основы вероятностно-статистической теории взаимодействия сооружений с неоднородными грунтовыми основаниями: автореф. дис. на соискание науч. степени докт. техн. наук: 05.23.02 / А.П. Пиеничкин. – М.: МИСИ, 1980. – 42 с.
4. Перельмутер, А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций / А.В. Перельмутер. – М.: АСВ, 2007. – 256 с.
5. Пичугин, С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий: монография / С.Ф. Пичугин. – Полтава: ООО “Асми”, 2009. – 452 с.
6. Райзер, В.Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций / В.Д. Райзер. – М.: Стройиздат, 1995. – 352 с.
7. Xue, J. Reliability analysis of shallow foundations subjected to varied inclined loads / J. Xue & D. Nag // Proc. of the 3rd Intern. Symposium on Geotechnical Safety and Risk. – Germany: Munich, 2011. – P. 377 – 384.

8. Лычев, А.С. *Надежность строительных конструкций: учебное пособие* / А.С. Лычев. – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 184 с.
9. Чирков, В.П. *Прикладные методы теории надежности в расчетах строительных конструкций* / В.П. Чирков. – М.: Маршрут, 2006. – 620 с.
10. Шейнин, В.И. *Алгоритм и программа инженерного расчета осадок фундаментных плит с учетом неравномерности нагрузки на основание и неоднородности массива* / В.И. Шейнин, Е.П. Сарана, С.А. Артемов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*, 2006. – № 5. – С. 2 – 7.
11. Криворотов, А.П. *Влияние природной неоднородности грунта основания на результаты расчета осадок фундаментов* / А.П. Криворотов // *Известия вузов: Строительство и архитектура*, 1999. – № 7. – С. 150 – 153.
12. Тер-Мартirosян, З.Г. *Распределение напряжений и деформаций в неоднородном грунте с учетом формы, размеров и жесткости включений* / З.Г. Тер-мартirosян, А.Ю. Мирный // *Геотехника*. – 2010. – №3. – С. 20 – 27.
13. Альберт, И.У. *Методы количественной оценки надежности системы "основание – фундамент – сооружение" с устройствами сейсмоизоляции и сейсмозащиты* : автореф. дис. на соискание науч. степени док. техн. наук: 05.23.02 / И.У. Альберт. – С-Пб: ВНИИГ, 2011. – 32 с.
14. Кузнецов, В.С. *Критерии оценки надежности и безопасности грунтовых плотин* / В.С. Кузнецов // С-Пб.: *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*, 2000. – 238 с.
15. Кузнецов, Д.Г. *Вероятностно-статистический расчет системы "сооружение-основание" на набухающих грунтах*: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: 05.23.17 / Д.Г. Кузнецов. – Волгоград: ВолГАСА, 2004. – 25 с.
16. Мулюков, Э.И. *Статистический анализ причин и вероятностный прогноз отказов оснований и фундаментов* / Э.И. Мулюков // *Отказы в геотехнике: сб. ст.* – Уфа: БашНИИстрой, 1995. – С. 5 – 17.
17. Трофимчук, А.Н. *Надежность систем сооружение – грунтовое основание в сложных инженерно-геологических условиях* / А.Н. Трофимчук, В.Г. Черный, Г.И. Черный. – К.: ПолиграфКонсалтинг, 2006. – 248 с.
18. Fenton, G.A. *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering* / G.A. Fenton. – Utah, 1997. – 96 p.
19. Rechenmacher A.L. *Calibration of heterogeneous, probabilistic soil models* / A.L. Rechenmacher, Z. Medina-Cetina, R.G. Ghanem // *Proc. 16th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. – Osaka, 2005. – P. 851 – 854.
20. Wang, Y. *Study on autocorrelation model and reduction function of variance of soil random field* / Y. Wang, B. Wang // *Proc. of the 1st Intern. Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2007)*. – China: Shanghai, 2007. – P. 265 – 272.
21. Макаров, Б.П. *Расчет фундаментов сооружений на случайно-неоднородном основании при ползучести* / Б.П. Макаров, Б.Е. Кочетков. – М.: Стройиздат, 1987. – 256 с.
22. Abdel Massih, D. Y. *Reliability-based analysis and design of strip footings against bearing capacity failure* / D.Y. Abdel Massih, A. Soubra and B.K. Low // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – #134(7), 2008. – P. 917 – 928.
23. Beacher, G.B. *Reliability and statistics in geotechnical Engineering* / G.B. Beacher, J.T. Cristian. – New York: John Wiley, 2003. – 619 p.
24. Bond, A.J. *A procedure for determining the characteristic value of a geotechnical parameter* / A.J. Bond // *Proc. of the 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2011)*. – Germany: Munich, 2011. – P. 419 – 426.
25. Cherubini, C. *Shallow Foundation Reliability Design* / C. Cherubini // *Proc. of the 1st International Symposium on Geotechnical Safety and Risk* – China: Shanghai, 2007. – P. 71 – 90.
26. Honjo, Y. *Challenges in Geotechnical Reliability Based Design* / Y. Honjo // *Proc. of the 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk*. – Germany: Munich, 2011. – P. 11 – 27.
27. Pereira, C. *Shallow Foundation Design through Probabilistic and Deterministic* / C. Pereira & L. Caldeira // *Proc. of the 3rd Intern. Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2011)*. – Germany: Munich, 2011. – P. 199 – 207.

28. Roberts, L.A. *Reliability-Based Design of Shallow Foundations Based on Elastic Settlement* / L.A. Roberts, A. Misra // *Proc. of the 1st Intern. Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2007)*. – China: Shanghai, 2007. – P. 471 – 483.
29. Shahin, M.A. *Probabilistic Analysis of Bearing Capacity of Strip Footings* / M.A. Shahin & E.M. Cheung // *Proc. of the 3rd Intern. Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2011)*. – Germany: Munich, 2011. – P. 225 – 230.
30. Won, J.Y. *A probabilistic approach to estimate one dimensional consolidation settlements* / J.Y. Won // *Proc. of the 17th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. – Olexandria, Egypt, 2009. – P. 2012 – 2015.
31. Baars, S. *Adaption of finite element models for probabilistic design* / M.A. Deptula, E. Dembicki, Ph. Gotteland // *Proc. of the 11rd Baltic Sea Geotechnical Conf. „Geotechnics in Maritime Engineering“*. – Gdansk, Poland, 2007. – P. 683 – 689.
32. Винников, Ю.Л. Численный расчет армированного основания в вероятностной постановке / Ю.Л. Винников, М.А. Харченко, В.И. Марченко // *Сб. статей науч.-техн. конф. “Численные методы расчетов в практической геотехнике”*. – С-Пб: СПбГАСУ, 2012. – С. 86 – 93.
33. Zotsenko, M. *Evaluation of failure probability of soil cushions* / M. Zotsenko, Y. Vynnykov, M. Kharchenko // *Proc. of the 3rd Intern. Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2011)*. – Germany: Munich, 2011. – P. 249 – 257.
34. Гагин, В.И. Расчет балок на многослойном стохастическом основании / В.И. Гагин, П.М. Иванюков // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2006. – № 3. – С. 61 – 64.
35. Соболев, Д.Н. Вероятностный расчет конструкций методом конечных элементов / Д.Н. Соболев, В.Е. Ким // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 1986. – № 1. – С. 34 – 37.
36. Falson, G. *A new approach for the stochastic analysis of finite element modeled structures with uncertain parameters* / G. Falson, N. Impollania // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2002. – Vol. 191, #44. – P. 5067 – 5085.
37. Fredlund, M. *Finite elements stochastic analysis* / M. Fredlund // *Proc. of 57th Canadian Geotechnical Conf. and 5th Joint IAH-CGS Conf.* – Quebec, Canada, 2004. – P. 201 – 206.
38. Haldar, A. *Reliability Assessment Using Stochastic Finite Elements Analysis* / A. Haldar, S. Mahadevan. – New York: John Wiley, 2000. – 220 p.
39. Kisse, A. *A Consistent Failure Model for Probabilistic Analysis of Shallow Foundations* / A. Kisse // *Proc. of the 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2011)*. – Germany: Munich, 2011. – P. 385 – 392.
40. Manjuprasad, M. *Adaptive Random Field Mesh Refinements in Stochastic Finite Element Reliability Analysis of Structures* / M. Manjuprasad, C.S. Manohar // *CMES: Tech. Science Press*, 2007. – V. 19. – P. 23 – 54.
41. Pechl, G.M. *Reliability analysis in geotechnics with deterministic finite elements – a comparison of two methods* / G.M. Pechl, H.F. Schweiger // *Proc. of 5th European Conf. on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. – Paris, 2002. – P. 229 – 304.
42. Phoon, K.K. *Reliability-based design in geotechnical engineering. Computations and applications* / K.K. Phoon. – New York: Taylor & Francis, 2008. – 530 p.
43. Rackwitz, R. *Reviewing, probabilistic soils modeling* / R. Rackwitz // *Computers and Geotechnics*. – 2000. – #26. – P. 199 – 223.
44. Stefanou, G. *The stochastic finite element methods: past, present and future* / G. Stefanou // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2009. – Vol. 198, #9-12. – P. 1031 – 1051.
45. Sudret, B. *Stochastic Finite Elements Methods and Reliability. A state-of-the-Art Report* / B. Sudret, A. Kiureghian. – Berkeley: Civil and Environment Engineering University of California, 2000. – 173 p.

Надійшла до редакції 13.10.2012

© М.О. Харченко