



**ХАРЧЕНКО МАКСИМ ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

Кандидат технічних наук, доцент кафедри видобування нафти і газу та геотехніки Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка, член Всеукраїнської товариства механіки ґрунтів, геотехніки та фундаментобудування.

Основні напрямки наукової діяльності: дослідження і розрахунок штучних ґрунтових масивів та геотехнічний моніторинг за якістю їх влаштування; розрахунок і проектування основ, фундаментів, глибоких котлованів і підпірних стін у складних інженерно-геологічних та щільних міських умовах; реалізація чисельних та імовірнісних методів розрахунку геотехнічних задач; обстеження та проектування фундаментів при реконструкції споруд.

Автор 30 наукових праць.

e-mail: MaxKharchenko@mail.ru, KharchenkoMO@ukr.net, maka1984@i.ua

УДК 624.138.22:624.15:631.431.7

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ УЩІЛЬНЕНИХ ҐРУНТІВ ШТУЧНИХ ОСНОВ ТА ІМОВІРНІСНИЙ АНАЛІЗ ЦИХ ДАНИХ

Ключові слова: ущільнений ґрунт, штучна основа, закон розподілу випадкових величин, імовірнісний розрахунок, осідання.

Наведено результати комплексних польових і лабораторних експериментальних досліджень властивостей ущільнених ґрунтів та ґрунтових сумішей штучних основ. Встановлено необхідні параметри ущільнення для забезпечення довготривалої міцності штучних масивів. Представлено характерні приклади реалізації математичних моделей імовірнісного опису розподілів випадкових величин будівельних властивостей ущільнених ґрунтів. Викладено результати імовірнісного розрахунку фундаментів на штучних основах з урахуванням параметрів неоднорідності ґрунту. Шляхом чисельного моделювання напружено-деформованого стану ґрунтових подушок методом скінченних елементів із залученням імітаційного моделювання методом Монте-Карло встановлено статистичні параметри і закон розподілу осідань фундаментів.

Приведены результаты комплексных полевых и лабораторных экспериментальных исследований свойств уплотненных грунтов и грунтовых смесей искусственных оснований. Установлены необходимые параметры уплотнения для обеспечения длительной прочности искусственных массивов. Представлены характерные примеры реализации математических моделей вероятностного описания распределений случайных величин строительных свойств уплотненных грунтов. Приведены результаты вероятностного расчета фундаментов на искусственных основаниях с учетом параметров неоднородности грунта. Путем численного моделирования напряженно-деформированного состояния грунтовых подушек методом конечных элементов с использованием имитационного моделирования методом Монте-Карло установлено статистические параметры и закон распределения оседаний фундаментов.

It is presented the results of comprehensive field and laboratory experimental studies the properties of compacted soils and soil mixtures of artificial bases. It is determined the necessary parameters to ensure long-term strength of artificial missives. The typical examples of mathematical models of probability distributions of random variables of the properties of compacted soils are presented. The results of probabilistic design of foundations on artificial bases, taking into account the parameters of soil heterogeneity. By numerical simulation of the cushions stress-strain state by finite element method using Monte Carlo simulation it is determined the statistical parameters and distribution law of foundations settlements.

### 1. ВСТУП

Одним із напрямків сучасної геотехніки є створення штучних ґрунтових масивів [1-3]. До них можливо віднести ґрунтові подушки, штучні острови, насипи, ядра гребель тощо. У таких випадках можливо отримати основу чи земляну споруду з контрольованими (необхідними) фізико-механічними характеристиками. При цьому актуальним питанням також є влаштування штучних основ з використанням ґрунтових сумішей [1, 4-7].

У багатьох випадках для забезпечення покращених будівельних властивостей ґрунтів виконують їх ущільнення. У світі підхід до нормування властивостей ущільнених ґрунтів майже однаковий [2, 3, 8-12]. На першому етапі виконують дослідження ґрунтів, які будуть використовуватися в якості матеріалу штучного масиву. При цьому проводять лабораторні експерименти, в яких визначають фізичні характеристики ґрунту в природному стані та після його ущільнення. Фіксують оптимальні параметри ущільнення (як правило це оптимальна вологість  $w_{opt}$  і максимальна щільність скелета ґрунту  $\rho_{d,max}$  чи коефіцієнт ущільнення  $k_c$ ), які намагаються витримати при влаштуванні штучної основи.

Еталонну величину максимальної щільності скелета  $\rho_d$  визначають для кожного виду ґрунту в лабораторії тестом Проктора (ASTM D 698-91) чи його модифікацією (ASTM D 1557-91), принцип яких не відрізняється від методу ГОСТ 22733-77. Проблема, однак, полягає в тому, що оптимальні параметри призначаються, виходячи з отриманих у лабораторних умовах значень для конкретного виду ґрунту та параметрів ударного навантаження, яке використовують при дослідіах, без урахування параметрів реальних механізмів.

На другому етапі виконується геотехнічний контроль якості влаштування штучної основи [1-4]. При цьому різними методами намагаються щоб щільність скелета ґрунту в насипі була не меншою за отриману при лабораторному ущільненні. Перевірка щільності скелета ґрунту чи коефіцієнта ущільнення в польових умовах



виконується методом “ріжучих кілець”, пенетрацією й зондуванням. Як показує досвід такий підхід не завжди забезпечує надійність влаштованої штучної основи [1, 4, 9-16]. Є доцільним крім щільності також визначати характеристики міцності й деформативності ґрунту.

**2. НЕВИРІШЕНІ ПРОБЛЕМИ, ЯКИМ ПРИСВЯЧЕНА РОБОТА**

По-перше, оптимальна вологість  $w_{opt}$  не є постійною величиною і для одного й того ж ґрунту змінюється залежно від того, який максимальний контактний тиск розвиває ущільнювач протягом одного циклу [4, 17]. Отже, змінюючи вологість ґрунту, завжди можна знайти такий механізм, що забезпечить потрібний оптимальний контактний тиск для даної вологості. Таким чином, при проектуванні процесу ущільнення можливо розв’язати не лише задачу з визначення оптимальної вологості для даного механізму, але й установити оптимальний механізм для ущільнення існуючого ґрунту.

По-друге, вологість штучного ґрунтового масиву змінюється протягом року [8]. Це призводить і до зміни його механічних характеристик. Тому необхідно розробити рішення, які забезпечать якомога мінімальну змінність вологості в тілі насипу.

По-третє, певною проблемою при нормуванні властивостей ущільненого масиву є невідповідність оптимальних параметрів ущільнення ґрунтів, отриманих за нормативними лабораторними методиками, їх фізико-механічними характеристиками, що мають місце у польових умовах при використанні сучасної ущільнювальної техніки, особливо при застосуванні вібраційних режимів роботи [1, 4, 17, 18].

Невирішеним також є питання ущільнення піщаних, тобто малозв’язних ґрунтів.

В процесі пошуку матеріалу для штучних основ з покращеними властивостями проведено ряд лабораторних досліджень ущільнення ґрунтових сумішей. В цьому напрямку відомі результати досліджень В.І. Крутова [5], М.П. Павчича, М.Л. Зоценка [6], К. Fagooq [7] та інші [19]. Вони вивчали вплив на ущільнення ґрунтових сумішей вміст глинистих і піщаних частинок, вологості тощо. При цьому встановлено, що найбільше значення  $\rho_d$  і найменше  $w_0$  досягалося при 50 % глинистих і 50 % піщаних частинок. Тому є сенс провести польові дослідження ущільнення ґрунтових сумішей з отриманими при лабораторних дослідженнях їх оптимальних компонентів.

Ущільненим масивам також притаманна неоднорідність, за параметри якої можуть бути прийняті: випадковий розкид значень характеристик ґрунтів, анізотропія їх механічних властивостей, закономірності ущільнення середовища за глибиною тощо. Ці параметри залежать від виду і природних властивостей матеріалу штучної основи, технологічних параметрів її зведення. Цьому присвячені праці Г.К. Бондарика, О.К. Бугрова, Ю.Л. Винникова, М.Н. Гольдштейна, М.Н. Єрмолаєва, М.Л. Зоценка, О.І. Ігнатової, І.І. Кандаурова, М.В. Корнієнка, Б.П. Макарова, М.М. Маслова, С.І. Мація, В.В. Міхеєва, О.В. Пілягіна, А.П. Полака, А.П. Пшенічкіна, М.В. Раца, С.Й. Цимбала, К.Ш. Шадунца, В.І. Шейніна, О.В. Школи, В. Look [20], Y. Fang [14] та інших. При цьому методи розрахунку штучних основ є детермінованими і не враховують фактичний розкид

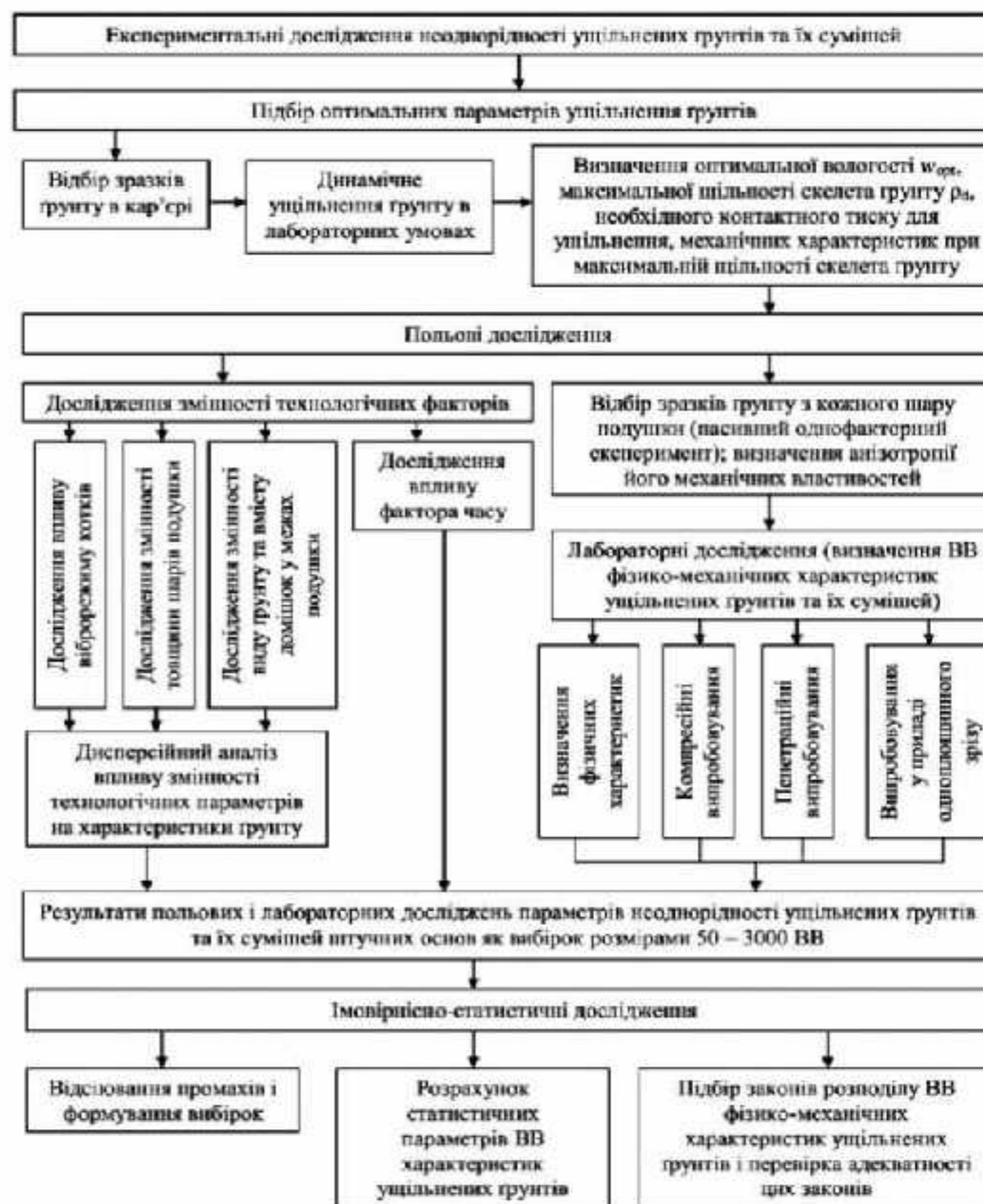


Рис.1. Структурна схема планування експериментальних досліджень ущільнених ґрунтів штучних основ: BB – випадкова величина

значень фізико-механічних характеристик ущільненого ґрунту у просторі масиву, що призводить до закладання необґрунтованих запасів міцності й деформативності при їх зведенні, а іноді й до відмови при їх експлуатації.

З точки ж зору надійності експлуатації земляної споруди також велике значення має не лише максимально досягнуті значення щільності скелета ґрунту та характеристик міцності при її влаштуванні, а й збереження їх протягом тривалого часу експлуатації [4, 17].

Вирішенню цих проблемних питань і присвячений наступний матеріал.

**3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Структурна схема планування експериментальних досліджень ущільнених ґрунтів подушок наведена на рис. 1. При складанні програми досліджень застосовані апробовані методи планування дослідів, зокрема пасивний однофакторний експеримент для отримання статистичних даних змінності фізико-механічних характеристик ущільненого ґрунту й технологічних факторів. Дисперсійним багатфакторним аналізом за планом 33 визначено сумісний вплив мінливості товщини шарів, гранскладу ґрунту, кількості проходів і режиму ущільнюючого механізму на змінність характеристик ущільненого ґрунту.

Для виконання програми на трьох дослідних об’єктах проведено комплексні польові та лабораторні дослідження властивостей ущільнених ґрунтів. До їх складу входило лабораторне динамічне ущільнення відібраних ґрунтів при різних ударних імпульсах (ASTM D 698-91, ASTM D 1557-91, ГОСТ 22733-77); польове



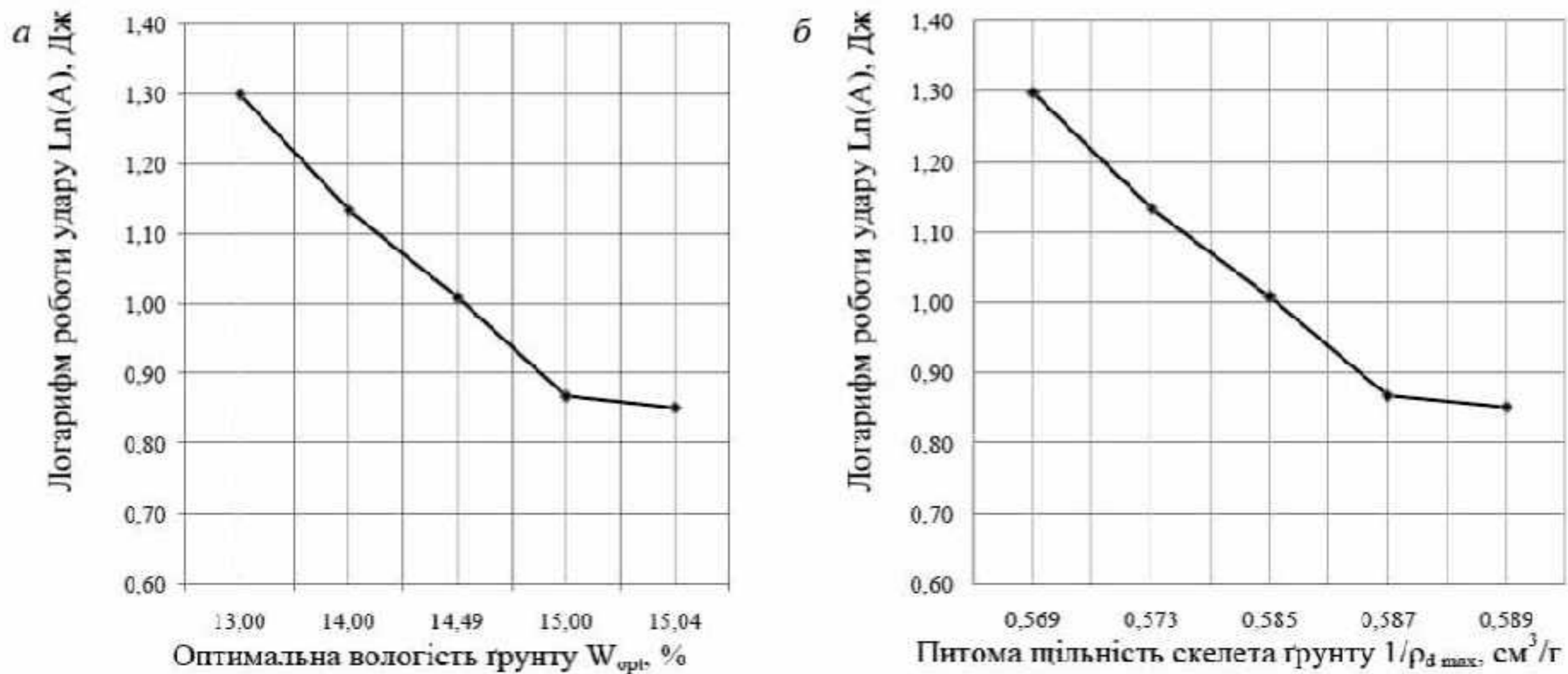


Рис.3. Результати лабораторних досліджень оптимальних параметрів ущільнення ґрунтів: а – графік залежності оптимальної вологості ґрунту від логарифма величини роботи удару; б – графік залежності питомої максимальної щільності скелета ґрунту від логарифма величини роботи удару

ущільнення лесових суглинків пневмокотками (об'єкт № 1 – ґрунтова подушка під багатоповерхову будівлю), лесових супісків і суглинків важкою трамбівкою (об'єкт № 2 – ґрунтова подушка під резервуар, рис. 2, а), розкривних порід (пісків пилюватих, мілких і середньої крупності, супісків та суглинків) самохідними вібро-пневмокотками (об'єкт № 3 – штучний насип площею 190 га і висотою 3...6 м, рис. 2, б); відбір зразків ґрунту та фіксація технологічних параметрів; стандартні лабораторні дослідження будівельних властивостей ґрунту (ДСТУ Б В.2.1-1-95, ДСТУ Б В.2.1-2-96, ДСТУ Б В.2.1-3-96, ДСТУ Б В.2.1- 4-96, ДСТУ Б В.2.1- 5-96).

#### 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

##### 4.1. Лабораторні дослідження

При лабораторних дослідженнях оптимальних параметрів ущільнення ґрунту визначено, що до певної межі за рахунок збільшення роботи удару збільшується й питома щільність скелета ґрунту (рис. 3).

Отже, оптимальні параметри ущільнення для конкретних ґрунтів і механізмів дослідно доцільно визначати за величинами ударного імпульсу, що близькі до технічних характеристик ущільнювачів. Такий же результат отримано і при польових дослідженнях. Отже, такий підхід дозволить влаштовувати штучні основи з більш точними геотехнічними параметрами при польовому ущільненні ґрунту.

##### 4.2. Польові дослідження

На поведінку ущільненого ґрунту в часі значний вплив має вологість, при якій було здійснено ущільнення, й кількісне співвідношення окремих видів води в ущільненому ґрунті. Було визначено, що найбільш сприятливою умовою забезпечення тривалої міцності ґрунтів і менших деформацій при експлуатації земляної споруди є ущільнення при вологості, близькій до максимального вмісту зв'язаної води.

На стабільність властивостей ущільненого ґрунту впливає й величина щільності скелета ґрунту, досягнута при його ущільненні. При підвищенні цього значення за постійної вологості уповільнюється підняття капілярної води, збільшується водонепроникність ґрунтового масиву й морозного випинання внаслідок



Рис.4. Графіки зміни щільності скелета ґрунту за глибиною ущільненої подушки самохідним котком у вібраційному та статичному режимах роботи за 8 проходів одним слідом: 1 – у статичному режимі роботи; 2 – у вібраційному режимі роботи

зниження міграції води. Отже, можна підсумувати, що для досягнення більш стабільних характеристик міцності й деформативності штучних ґрунтових масивів потрібно намагатися виконувати ущільнення до максимально можливого значення щільності скелета ґрунту при вологості, близькій до максимальної кількості зв'язаної води. Але навіть за таких умов можливе зменшення щільності ґрунту до деякого стабілізованого значення, а отже, і деяке погіршення його властивостей, що необхідно враховувати при проектуванні земляних споруд.

На характеристики ущільнених ґрунтів суттєво впливає віброрежим роботи котків. Зокрема, малозв'язні

Дивись рисунок 2 на стор. 2 обложки



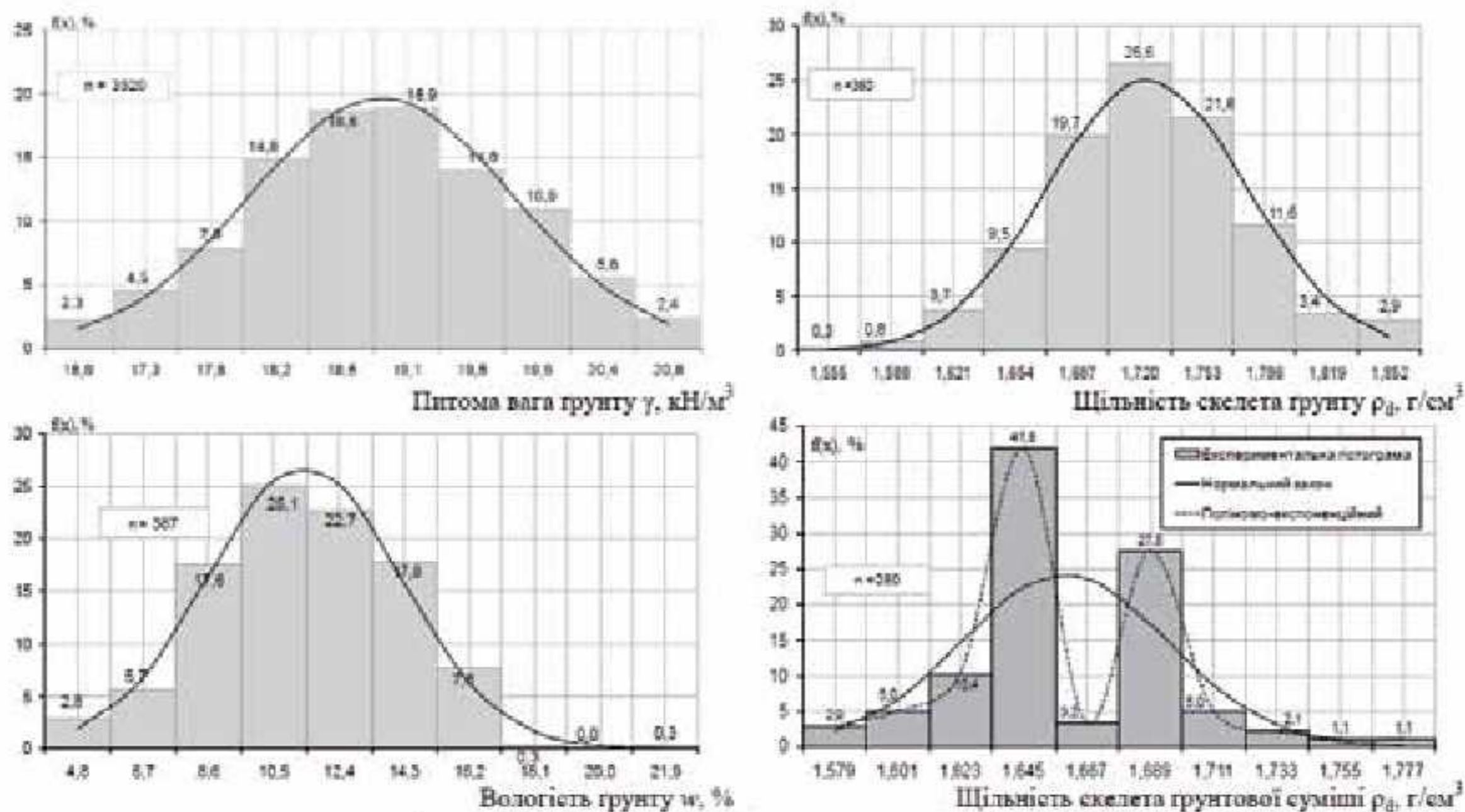


Рис.6. Розподіл випадкових величин фізичних характеристик ґрунту подушок

розкривні породи при використанні одних і тих же ущільнюючих механізмів (масою 14 т) для близьких гранулометричних складів (піски мілкі та пилюваті, однорідні) мають більш високі (на 1 – 10 %) кінцеві значення щільності скелета ґрунту при вібраційному режимі, ніж при статичному (рис. 4).

При науково-технічному супроводженні влаштування штучної основи (об'єкт №3) досліджувалося також ущільнення ґрунтових сумішей (в різних пропорціях суміш піщаного та глинистого ґрунту). Було встановлено, що будівельні властивості ущільненої ґрунтової суміші часто кращі, ніж для однорідних ущільнених ґрунтів, хоча спостерігається збільшення розкиду їх значень при поганому перемішуванні. Технологічне змішування різних видів ґрунтів і віброрежим суттєво впливають на питоме зчеплення  $c$  ущільнених ґрунтів та мало – на кут внутрішнього тертя  $\varphi$ ; величина модуля деформації  $E$  ущільненого матеріалу залежить від щільності його скелета  $\rho_d$  й інтервалу тиску в компресійних дослідах. Таким чином, використання ґрунтових сумішей дозволяє підвищити характеристики міцності та знизити деформативність вихідного матеріалу.

Для отримання кількісного та якісного впливу змінності технологічних параметрів на щільність скелета ущільненого ґрунту і розкид цих значень використано скорочений трьохфакторний план. Кожний із дослідів відрізнявся сполученням незалежних змінних, що і визначали умови його проведення при скороченні об'єму дослідних робіт у порівнянні з повним багатофакторним експериментом. Тому, замість  $3^3=27$  дослідів, для адекватної оцінки результатів було виконано 17. При цьому у загальному вигляді отримано функцію відклику у вигляді поліному другого ступеня.

У підсумку багатофакторного експерименту визначено, що найбільш суттєвий вплив на математичне сподівання значень щільності скелета має вид ґрунту та вміст у ньому домішок; другим за значимістю чинником є кількість проходів за одним слідом і режим роботи механізму (вібраційний чи статичний); найменш впливовою на вихідні параметри виявилась товщина шару

ґрунту до ущільнення. Графічна інтерпретація результатів досліджень впливу технологічних факторів на характеристики ущільненого ґрунту подані на рис. 4 і 5.

## 5. ІМОВІРНІСНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 5.1. Об'єм експериментальних вибірок

У результаті геотехнічного моніторингу та контролю якості ущільнення штучних основ отримано достатні вибірки випадкових величин (ВВ) дослідних характеристик і технологічних параметрів. Зокрема, їх розмір становив для: вологості  $w - n = 100$ , щільності скелета ґрунту  $\rho_d - n = 55$ , кута внутрішнього тертя  $\varphi$  і питомого зчеплення  $c - n = 78$  у горизонтальних кільцях та  $n = 28$  – у вертикальних (об'єкт № 1);  $w - n = 155$ ,  $\rho_d - n = 140$  (об'єкт № 2);  $w - n = 3000$ ,  $\rho_d - n = 3000$ ,  $\varphi$  та  $c - n = 50$ , модуля деформації  $E - n = 1500$ ; кількості замірів проходів за одним слідом ущільнюючого механізму –  $n = 20$ , кількості замірів товщини шару  $h - n = 50$  (об'єкт № 3).

### 5.2. Методика імовірно-статистичного аналізу

Математичне очікування для дискретних і неперервних ВВ визначено за (1):

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n P_i x_i; \quad \bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x) dx, \quad (1)$$

де  $P_i$  – імовірність значення  $x_i$ ;  $x_i$  – можливі величини  $x$ ;  $f(x)$  – щільність імовірності неперервної ВВ.

Дисперсія для дискретних і неперервних ВВ визначено за (2):

$$\hat{x}^2 = \sum_{i=1}^n P_i (x_i - \bar{x})^2; \quad \hat{x}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 f(x) dx. \quad (2)$$

Середнє квадратичне відхилення (стандарт)  $\sigma$  і коефіцієнт варіації  $\nu$  визначено за (3):

$$\sigma = \sqrt{\hat{x}^2}; \quad \nu = \sigma / \bar{x}. \quad (3)$$

Центральні момент  $k$ -ого порядку для дискретних і неперервних ВВ визначено за (4):

Дивись рисунок 5 на стор. 2 обложки



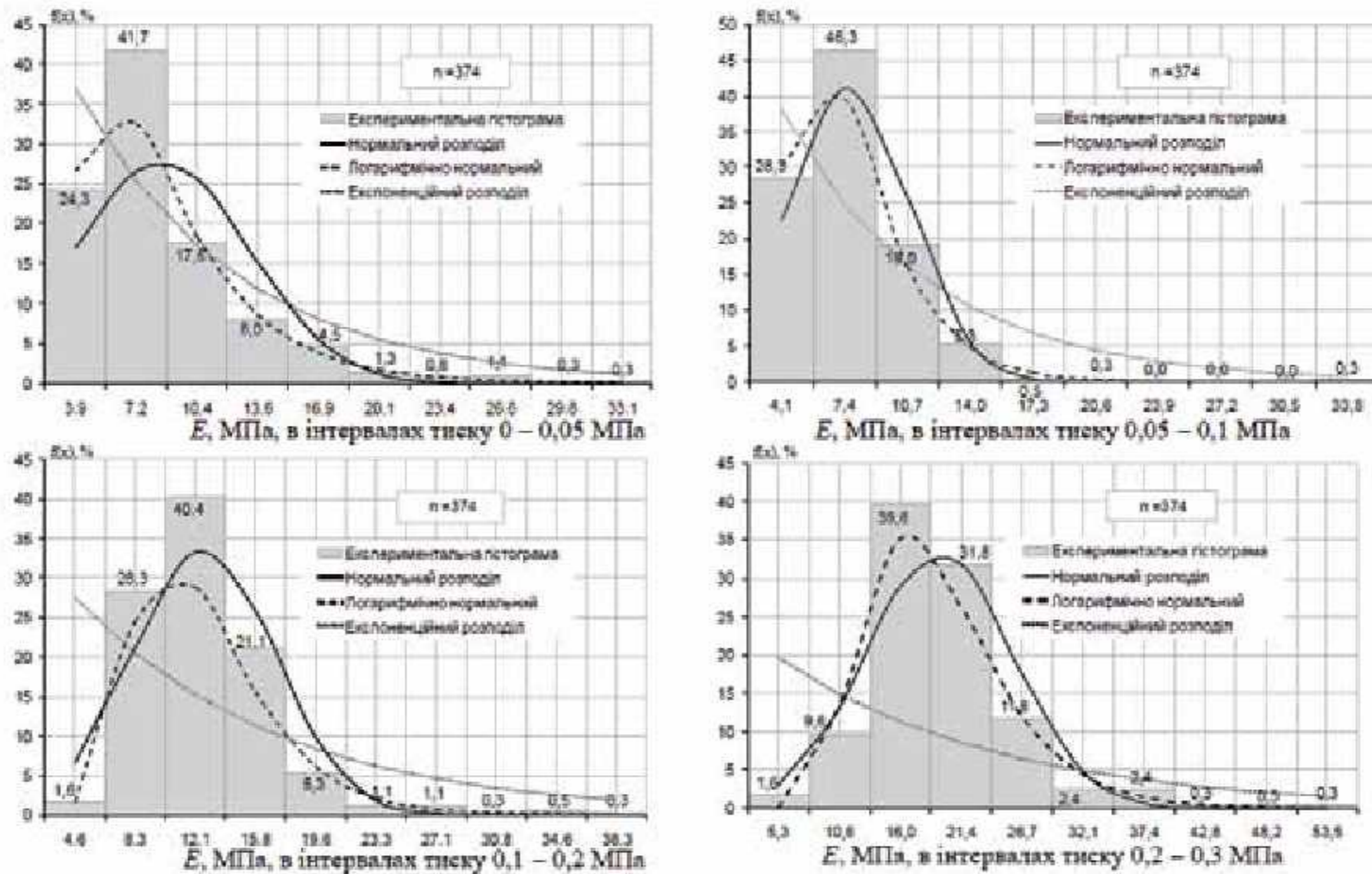


Рис.7. Розподіл випадкових величин характеристик деформативності ґрунту подушок:  $f(x)$  – частота;  $n$  – кількість випадкових величин

$$\mu_k(x) = \sum_{i=1}^n P_i(x_i - \bar{x})^k; \mu_k(x) = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^k f(x) dx. \quad (4)$$

Коефіцієнт асиметрії  $A$  й ексцес  $E$  визначено за (5):

$$A = \mu_3 / \sigma^3, \quad E = \mu_4 / \sigma^4 - 3, \quad (5)$$

де  $\mu_3, \mu_4$  – центральний момент третього і четвертого порядку відповідно.

Оцінювання апроксимації ВВ характеристик ущільненого ґрунту, розкривних порід та їх сумішей у складі подушки здійснено на базі таких видів законів розподілу (ЗР):

1) нормальний розподіл (розподіл Гауса)

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right), \quad (6)$$

де  $x$  – ВВ;  $n$  – кількість значень.

2) логарифмічно нормальний розподіл:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} \frac{1}{z} \exp\left(-\frac{(\ln x - \bar{z})^2}{2\sigma_z^2}\right), \quad (7)$$

де  $\bar{z} = \ln \bar{x}; \sigma_z = \sigma_{\ln x}$ .

Параметри логнормального закона:

- математичне сподівання  $\bar{x} = \exp(\bar{z} + \sigma_z^2 / 2)$ ;
- дисперсія  $\sigma_x^2 = (\exp(\bar{z} + \sigma_z^2 / 2))(\exp(\sigma_z^2) - 1)$ ;
- коефіцієнт асиметрії  $A = (\exp(\sigma_z^2) + 2)\sqrt{(\exp(\sigma_z^2) - 1)}$ ;
- медіана  $Me = \exp(\bar{z})$ ;
- мода  $M_0 = \exp(\bar{z} - \sigma_z^2)$ .

3) розподіл, що можна описати рядом Грам-Шарльє:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right) \cdot (Ex^4 + Ax^3 - 6Ex^2 - 3Ax + 3E + 1), \quad (8)$$

де  $A = \mu_3 / 6\sigma^3; E = (\mu_4 - 3\sigma^4) / (24\sigma^4)$ .

4) експоненційний розподіл

$$p(x) = 1/\bar{x} \cdot \exp(-x/\bar{x}). \quad (9)$$

5) поліномо-експоненційний розподіл

$$p(x) = \exp(C_0 + C_1x + C_2x^2 + C_3x^3 + C_4x^4), \quad (10)$$

де  $C_0 \dots C_4$  – коефіцієнти полінома, які визначаються за оцінкою математичного очікування, дисперсії, асиметрії та ексцесу, тобто за моментами 1-4-го порядків шляхом розв'язання системи нелінійних рівнянь.

Характеристики міцності ґрунту ( $c, \varphi$ ) є сукупністю двох ВВ (системою двох ВВ). Геометрично це інтерпретується як випадкова точка з координатами ( $c, \varphi$ ) чи випадковий вектор, направлений із початку координат до точки ( $c, \varphi$ ). Функцією розподілу випадкового вектора є імовірність одночасного виконання двох нерівностей:  $X < x$  і  $Y < y$ , тобто  $p(x, y) = P((X < x)(Y < y))$ . Для таких розподілів центральні момент  $k+s$ -ого порядку для дискретних і неперервних ВВ визначають за (11):

$$\mu_{k,s}(x, y) = \sum_{i=1}^n P_i(x_i - \bar{x})^k (y_i - \bar{y})^s; \mu_{k,s}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^k (y - \bar{y})^s f(x, y) dx dy. \quad (11)$$

Апроксимацію випадкової функції розподілу  $F(c, \varphi)$  виконувалося на базі нормального чи логнормального законів (залежно від того який ЗР буде мати кожна із ВВ).

$$p(c, \varphi) = \frac{1}{\sigma_c \sigma_\varphi \sqrt{2\pi}} \exp\left(-0,5 \left( \frac{(c - \bar{c})^2}{\sigma_c^2} + \frac{(\varphi - \bar{\varphi})^2}{\sigma_\varphi^2} \right)\right); \quad (12)$$

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_{\ln c} \sigma_{\ln \varphi} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-0,5 \left( \frac{(\ln c - \ln \bar{c})^2}{\sigma_{\ln c}^2} + \frac{(\ln \varphi - \ln \bar{\varphi})^2}{\sigma_{\ln \varphi}^2} \right)\right)$$

Для перевірки адекватності прийнятого теоретичного ЗР використано критерій узгодження  $\chi_2$  ("хі-квадрат") Пірсона.

### 5.3. Результати імовірнісно-статистичного аналізу

Для аналітичного опису експериментального розподілу



Таблиця 1. 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
Питома зчеплення	логнормальний	0,3	10	0,08
Модуль деформації в інтервалах тиску 0 – 0,05 МПа в інтервалах тиску 0,05 – 0,1 МПа в інтервалах тиску 0,1 – 0,2 МПа в інтервалах тиску 0,2 – 0,3 МПа	логарифмічно нормальний	0,48	24	0,23
		0,33	17	0,11
		0,34	13	0,11
		0,33	11	0,11

Таблиця 2. 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

Таблиця 3. Результати імовірнісного 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		Багатшарова
	Одношарова подушка	Багатшарова подушка	Одношарова подушка	Багатшарова подушка	Аналітично	MCE	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
Імовірність відмови (перевищення $S > S_u = 10$ см)					$(S_u - S_{сер} >> 5\sigma)$		

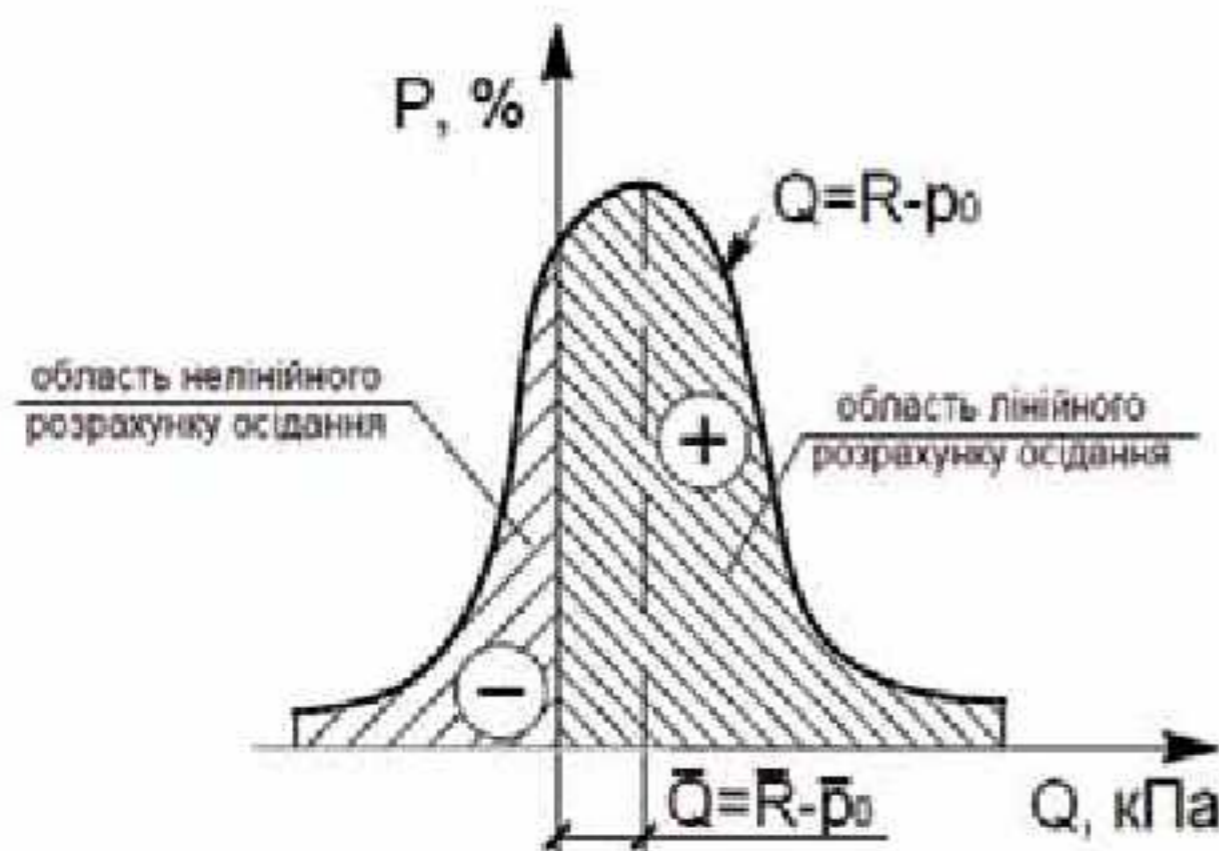


Рис.9. Графічна інтерпретація визначення імовірності меж застосування моделі осідання фундаменту на ній

ВВ фізичних характеристик ущільнених ґрунтів доцільно використовувати нормальний ЗР, а для щільності скелета ґрунту ущільнених сумішей – поліномо-експоненційний. При цьому, коефіцієнт варіації значень щільності скелета ґрунту коливався в межах 2 – 4,4 %, його вологості – 23 – 36 %, питомої ваги ґрунту – 4 – 4,6 %. Графічна інтерпретація цих результатів наведена на рис. 6.

Модуль деформації E ущільнених ґрунтів та їх сумішей найкраще описувати логарифмічно нормальним ЗР. Коефіцієнт варіації ВВ модуля деформації E ущільнених ґрунтів становить 33 – 57 % (11 – 24 % для логнормального). Статистичні параметри цих ВВ залежать також від

тиску в компресійному приладі. Результати досліджень зведені на рис. 7.

Кут внутрішнього тертя  $\phi$  і питома зчеплення  $c$  ущільнених ґрунтів є випадковими векторами і найкраще описуються відповідно нормальним і логнормальним ЗР. Коефіцієнт варіації значень  $\phi$  склав 11 %, а  $c$  – 25 % (10 % для логнормального). Графічна інтерпретація підсумків досліджень зображена на рис. 8.

Загальні підсумки статистичної обробки результатів досліджень наведені у табл. 1, що є вихідними даними для імовірнісного оцінювання НДС штучних основ.

### 6. ІМОВІРНІСНИЙ РОЗРАХУНОК ФУНДАМЕНТІВ НА ШТУЧНИХ ОСНОВАХ

Для застосування розрахункової схеми у вигляді лінійно-деформованого півпростору основи для визначення її осідання необхідно, щоб середній тиск  $p$  під подошвою фундаменту не перевищував розрахунковий опір ґрунту  $R$ . Значення  $R$  є ВВ за рахунок  $\phi$  і  $c$  та питомої ваги ґрунту  $\gamma$ , які входять в якості аргументів у функцію  $R = f(\phi, c, \gamma)$ . Значення тиску під подошвою фундаменту  $p$  – також ВВ, оскільки навантаження і впливи носять випадковий характер. Межа застосування розрахункової схеми у вигляді лінійно-деформованого півпростору основи для визначення її осідання на базі функції випадкових аргументів  $\tilde{Q} = \tilde{R} - \tilde{p}_0$  подано на рис. 9.

На першому етапі визначено статистичні параметри розподілів ВВ розрахункового  $R$  і граничного  $p_u$  опорів ущільненого ґрунту. Для цього використано дані табл. 3 й аналітичні методами – лінеаризація, заміна змінних за О.С. Личьовим, чисельне інтегрування за В.П. Чирковим, імітаційне моделювання (статистичне випробування) за Монте-Карло, заміну функції випадкових аргументів на обмеженій ділянці рівнянням регресії (метод апроксимуючих поліномів). Результати цих аналітичних досліджень зведені у табл. 2.

Значення осідання фундаменту  $S_d$  при лінійній стадії деформування основи є функцією випадкових аргументів з огляду на мінливість модуля деформації  $E$ , що змінюється в межах шару за відповідним законом, параметри якого залежать від виду і стану ґрунту, а також величини додаткових напружень у відповідному шарі. На мінливість осідання впливає і змінність додаткового вертикального нормального напруження у ґрунті  $\sigma_{zp}$ , що залежить від параметрів розподілу зовнішнього

Дивись рисунок 8 на стор. 2 обложки



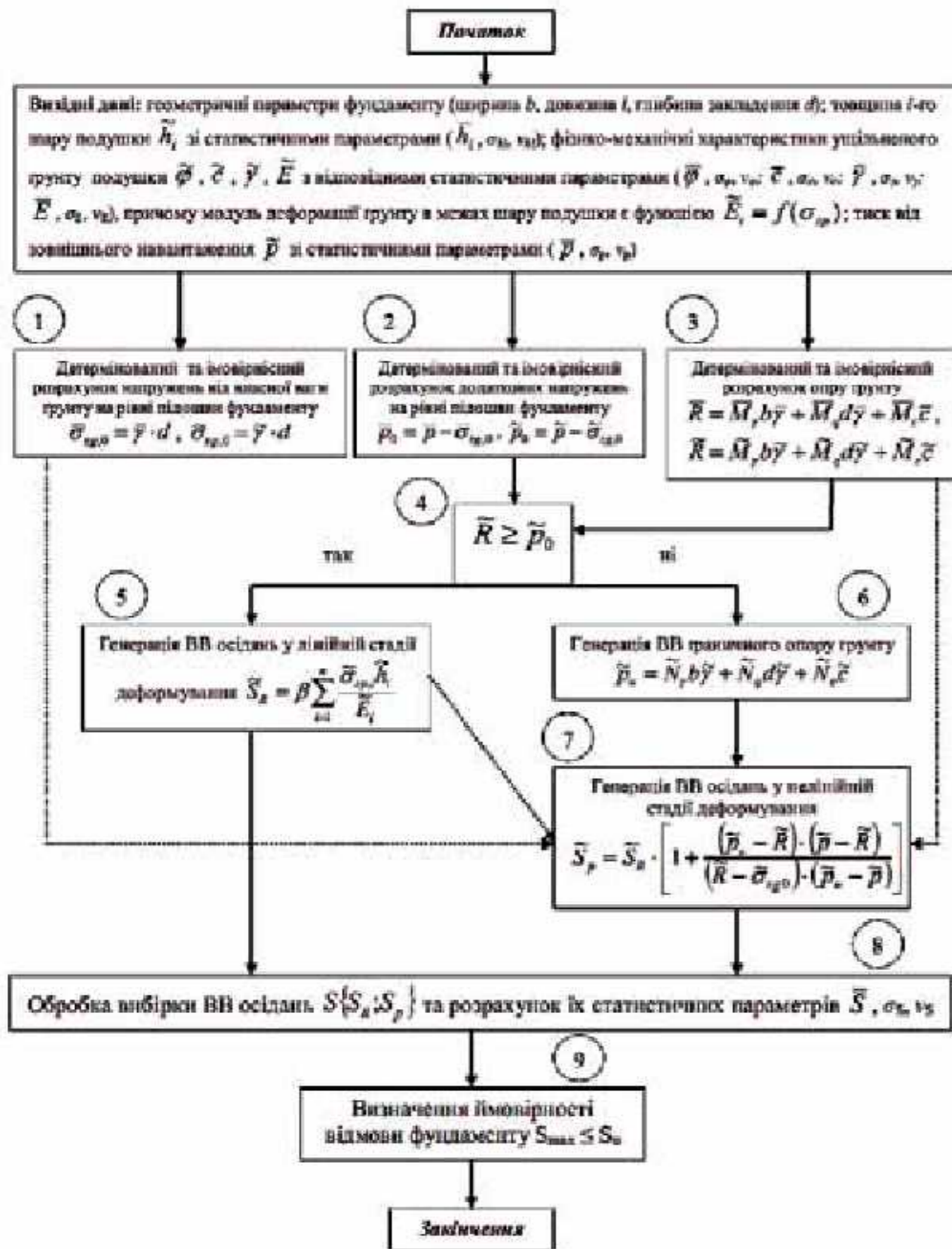


Рис.10. Блок-схема імовірнісного розрахунку осідань фундаменту на подушці з урахуванням випадковості меж лінійного деформування основи

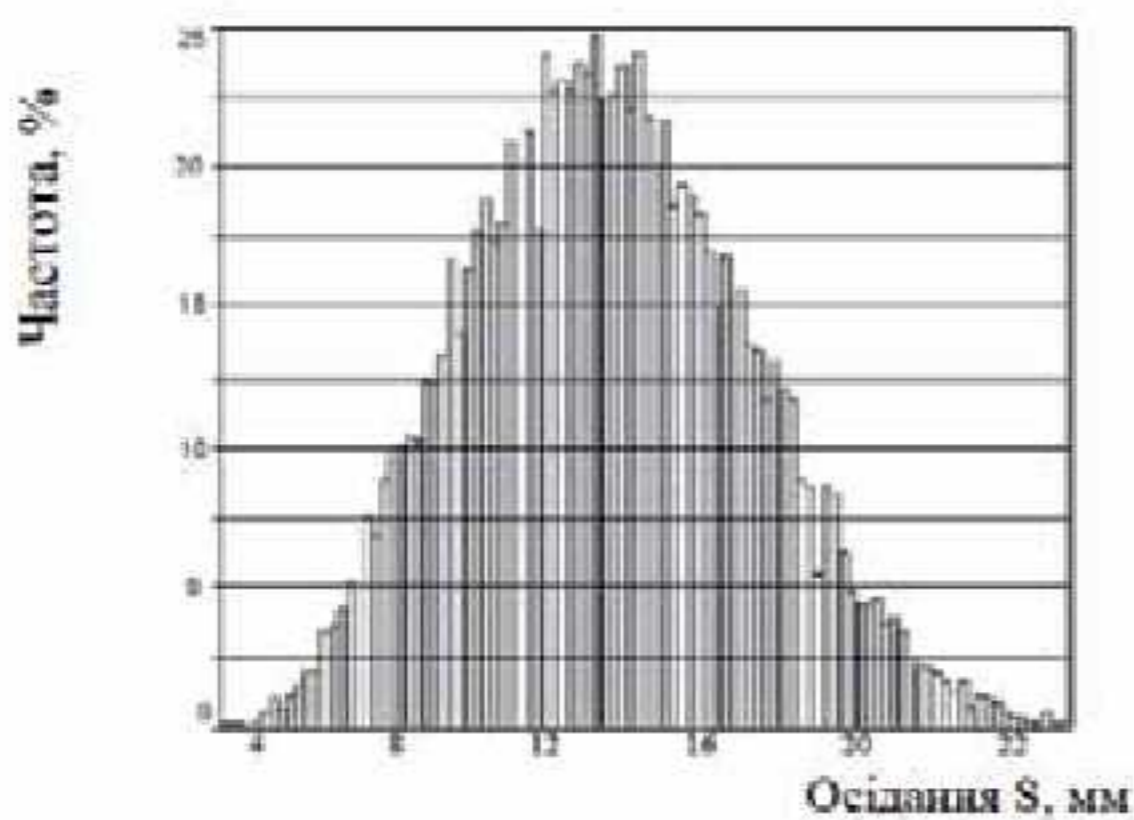


Рис.12. Гістограма розподілу ВВ осідань за чисельним розрахунком МСЕ в імовірнісній постановці

навантаження на фундамент і питомої ваги ґрунту, що залягає вище нього. Ці параметри входять в якості аргументів у функцію  $S_n = f(E, \sigma_{zp})$ .

З розвитком зон пластичних деформацій у бік й ущільнення ґрунтів навколо цих зон відбувається нелінійне осідання фундаменту  $S_p$ . Ці значення також є ВВ внаслідок мінливості значень осідання основи при тискові під підшвою фундаменту  $p$ , що дорівнює

розрахунковому опорі ґрунту  $R$ , граничного опору ґрунту основи  $p_u$  і вертикального напруження від власної ваги ґрунту на рівні підшви фундаменту  $\sigma_{zp0}$ , що зумовлюється неоднорідністю характеристик ґрунтів. Ці параметри входять в якості аргументів у функцію  $S_p = f(p, R, p_u, \sigma_{zp0})$ . Блок-схема імовірнісного розрахунку осідань фундаменту на багат шаровій подушці з урахуванням випадковості меж лінійного деформування основи наведена на рис. 10.

Дане дослідження дало змогу зробити наступне узагальнення. При імовірнісному підході до визначення осідання фундаменту на подушці встановлено, що існує імовірність лінійної та нелінійної стадій деформування основи при не перевищенні тиску під фундаментом розрахункового опору ґрунту при детермінованому підході, що зумовлено неоднорідністю ґрунтів і випадковою природою навантажень на них. ЗР осідань близький до нормального, параметри цього розподілу наведені в табл. 3.

### 7. ІМОВІРНІСНИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ШТУЧНИХ ОСНОВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Крім аналітичного підходу за блок-схемою рис. 9 виконано також моделювання з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). При цьому ітераційний процес мав постійну матрицю жорсткості (незмінну геометричну конфігурацію і пружні властивості) та змінний вектор вузлових сил. При моделюванні МСЕ

НДС подушок використано модель ґрунту у вигляді ізотропного суцільного середовища відповідно до теорії пластичної течії.

Міцність ґрунту описується відповідно до умови Друкера – Прагера. Згідно до цих передумов ґрунт вважають пружно-ідеальнопластичним матеріалом, деформування якого відбувається згідно діаграми 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, подані на рис. 11.

Результати моделювання НДС штучних основ МСЕ за допомогою імітаційного моделювання методом Монте-Карло [21] та з використанням експериментально установлених ЗР та статистичних параметрів наведено на рис. 12.

Порівняльний аналіз статистичних характеристик осідання фундаментів на ґрунтовій подушці за різними методами імовірнісного розрахунку наведені в табл. 3.

### ВИСНОВКИ

Оптимальні параметри ущільнення для ґрунтів і механізмів доцільно визначати за величинами ударного імпульсу, що близькі до технічних характеристик ущільнювачів.

Дивись рисунок 11 на стор. 2 обложки



Для досягнення більш стабільних характеристик міцності й деформативності штучних ґрунтових масивів потрібно виконувати ущільнення до максимально можливого значення щільності скелета ґрунту при вологості, близькій до максимальної кількості зв'язаної води.

Будівельні властивості ущільненої ґрунтової суміші часто кращі, ніж для однорідних ущільнених ґрунтів, хоча спостерігається збільшення розкиду їх значень при поганому перемішуванні. Технологічне змішування різних видів ґрунтів і віброрежим суттєво впливають на питоме зчеплення с ущільнених ґрунтів та мало – на кут внутрішнього тертя  $\varphi$ .

Фізичні характеристики ущільнених ґрунтів апроксимуються нормальним законом розподілу, а щільність скелета ґрунту ущільнених сумішей – поліном-експоненціальним. Модуль деформації  $E$  ущільнених ґрунтів та їх сумішей найкраще описувати логарифмічно нормальним законом розподілу, при цьому статистичні

параметри залежать від тиску в компресійному приладі. Кут внутрішнього тертя  $\varphi$  і питоме зчеплення с ущільнених ґрунтів є випадковими векторами і найкраще описуються відповідно нормальним і логнормальним законами розподілу. Статистичні параметри випадкових величин властивостей ущільнених ґрунтів наведені у табл. 2.

За імовірнісного підходу навіть за умови не перевищення тиску під фундаментом розрахункового опору ґрунту є імовірність крім лінійної, ще й нелінійної стадій деформування основи. Це зумовлено змінністю характеристик ущільнених ґрунтів і випадковою природою навантажень на фундаменти. Моделювання МСЕ НДС основ з використанням пружно-пластичної моделі ґрунту і залученням методу Монте-Карло коректно описує деформування подушок. Результати аналітичних та чисельних імовірнісних розрахунків осідання на ущільнених ґрунтах наведені у табл. 3.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Vynnykov Y.L. The peculiarities of soil large area cushions erection of overburden rock / Y.L. Vynnykov, M.O. Kharchenko // Proc. of the International Geotechnical Conf. – Moscow, 2010. – V. 3. – pp. 1024–1031.
2. Ван Импе. Проектирование, строительство и мониторинг насыпей на шельфе в условиях слабых грунтов / В. Ван Импе, Р.Д. Верастеги Флорес. – С-Пб.: НПО "Геореконструкция-Фундаментпроект", 2007. – 164 с.
3. Chu J. Construction Processes / J. Chu, S. Varaksin, U. Klotz // Proc. of the 17th International Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Olexandria, Egypt, 2009. – pp. 3006–3135.
4. Харченко М.О. Оцінка неоднорідності ущільнених ґрунтів штучних основ: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. тех. наук: 05.23.02 / М.О. Харченко. – Полтава: ПолтНТУ, 2010. – 23 с.
5. Крутов В.И. Физико-механические характеристики неоднородных уплотненных грунтов / В.И. Крутов, Н.Т. Танатаров // Основания, фундаменты и механика грунтов, 1993. – № 3. – С. 2–5.
6. Зоценко М.Л. Використання "хвостів" Полтавського ГЗК при влаштуванні земляних споруд / М.Л. Зоценко // Світ геотехніки, 2005. – № 4. – С. 7–11.
7. Farooq K. Improvement of engineering characteristics of expansive clays by sand mixing / K. Farooq, K.A. Virk // Proc. of the 17th International Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Olexandria, Egypt, 2009. – Amsterdam, Berlin, Tokyo, Washington: JOS Press. – 2009. – pp. 785–788.
8. Казарновский В.Д. Основы нормирования и обеспечения требуемой степени уплотнения земляного полотна автомобильных дорог / В.Д. Казарновский, И.В. Лейтланд, А.К. Мирошкин. – М.: ФГУП «Союздорнии», 2002. – 33 с.
9. Литвиненко А.С. До питання нормування ступеню ущільнення та контролю якості ущільнення ґрунтів земляного полотна автомобільних доріг / А.С. Литвиненко // Будівельні конструкції: Міжвід. наук.-техн. зб. – К.: НДІБК, 2011. – Вип. 75. – Кн. 1 – С. 342–352.
10. Zabievska-Adamaska K. Neural modeling of the fly ash compaction curve / K. Zabievska-Adamaska, M.J. Sulewska // Proc. of the 15rd European Conf. on Soil Mechanic and Geotechnical Engineering. – Athens, Greece, 2011. – pp. 601–606.
11. Honda M. An application of performance-based design concept to design of compacted ground / M. Honda, A. Iizuka // Proc. of the 1st International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2007). – China: Shanghai, 2007. – pp. 523–526.
12. Honda M. A study of the evaluation method for deformation characteristic of compacted soil / M. Honda, A. Iizuka, S. Ohno, K. Kawai, W. Wang // J. of Geotechnical Engineering, JSCE, 2005. – N 806/3-73, 2005. – pp. 33–44.
13. Zotsenko M. Evaluation of failure probability of soil cushions / M. Zotsenko, Y. Vynnykov, M. Kharchenko // Proc. of the 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2011). – Germany: Munich, 2011. – pp. 249–257.
14. Fang Y. Variation of soil density and earth pressure due to strip compaction / Y. Fang, Y. Chien // Proc. of the 17th International Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Olexandria, Egypt, 2009. – pp. 700–703.
15. Стефанишин Д.В. Оцінка надійності ґрунтових гідроспоруд за даними геотехнічного контролю / Д.В. Стефанишин, О.В. Жеребятєв // Будівельні конструкції: Міжвід. наук.-техн. зб. – К.: НДІБК, 2011. – Вип. 75. – Кн. 2 – С. 525–533.
16. Тер-Мартirosян З.Г. Механические свойства неоднородных грунтов / З.Г. Тер-Мартirosян, А.Ю. Мирный // Тр. междунаrod. конф. по геотехнике. – М., 2010. – Т.4. – С. 1391–1395.
17. Винников Ю.Л. Умови забезпечення тривалої міцності штучних ґрунтових масивів / Ю.Л. Винников, В.І. Коваленко, М.О. Харченко, Р.М. Лопан // Зб. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво). – Зб. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПНТУ, 2010. – Вип. 2 (27). – С. 111–117.
18. Parta C. Maximum relative density of clean sand as a function of median grain size and compaction energy / C. Parta, N. Sivakugan, B. Das, C. Atalar // Proc. of the 15rd European Conf. on Soil Mechanic and Geotechnical Engineering. – Athens, 2011. – pp. 1185–1190.
19. Deptula M. Heterogeneous soil behavior. Mechanical study of mixtures / M. Deptula, E. Dembicki, Ph. Gotteland // Proc. of the 11rd Baltic Sea Geotechnical Conf. „Geotechnics in Maritime Engineering“. – Gdansk, Poland, 2007. – P. 205–214.
20. Look B. Statistical models for reliability assessment of rock strength / B. Look, V. Wijeyakulasuriya // Proc. of the 17th International Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Olexandria, Egypt, 2009. – pp. 60–63.
21. 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. – pp. 683–689.



РИСУНКИ ДО СТАТТІ ХАРЧЕНКО М.О.  
«ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ УЩІЛЬНЕНИХ ҐРУНТІВ ШТУЧНИХ ОСНОВ  
ТА ІМОВІРНІСНИЙ АНАЛІЗ ЦИХ ДАНИХ»



Рис. 2. Дослідні об'єкти в процесі їх зведення: а – ущільнення ґрунту важкими трамбівками (об'єкт № 2– ґрунтова подушка під резервуар); б – ущільнення ґрунту вібраційними котками (об'єкт № 3 – штучний насип площею 190 га і висотою 3...6 м)

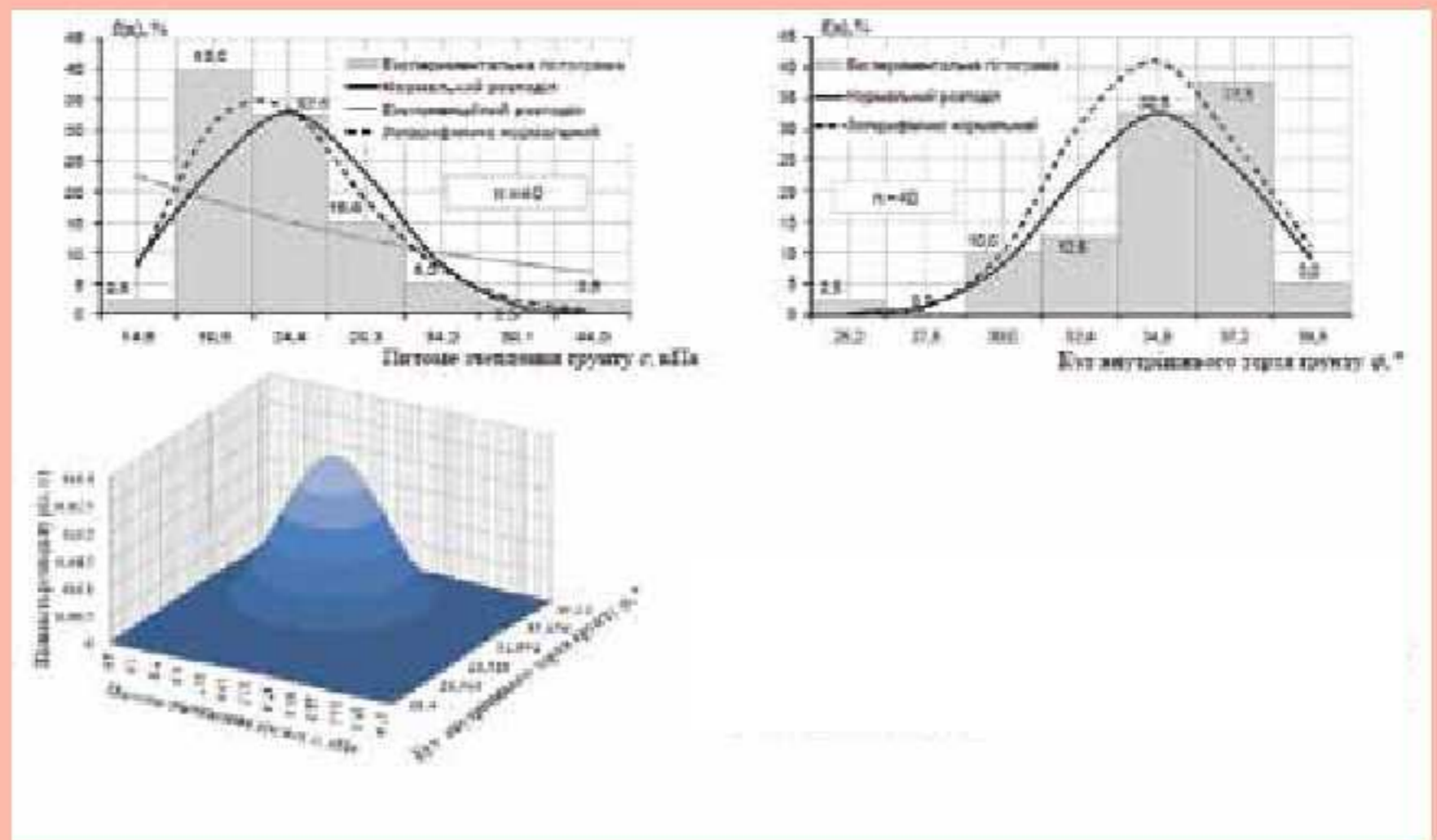
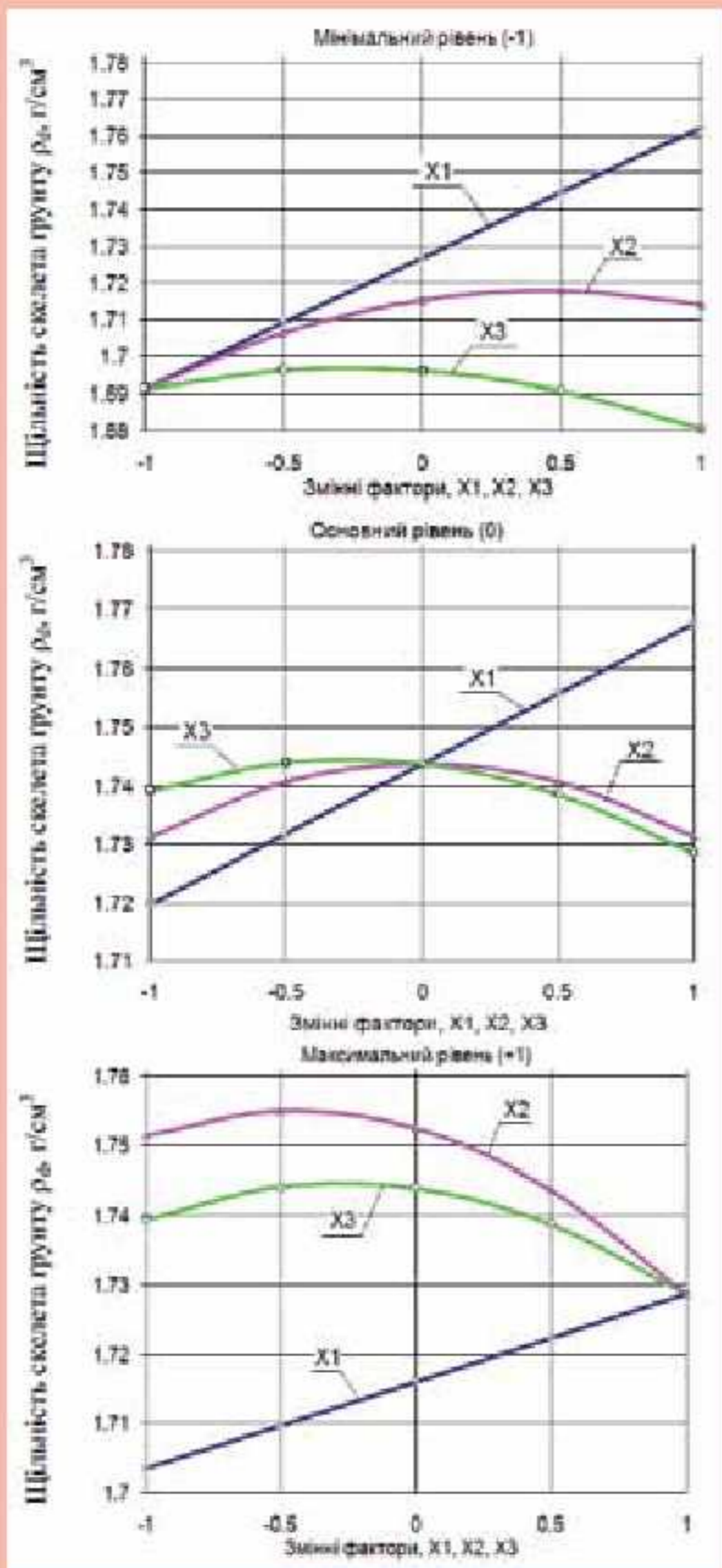


Рис. 8. Розподіл випадкових величин характеристик міцності ґрунту подушок:  $f(x)$  – частота;  $n$  – кількість випадкових величин

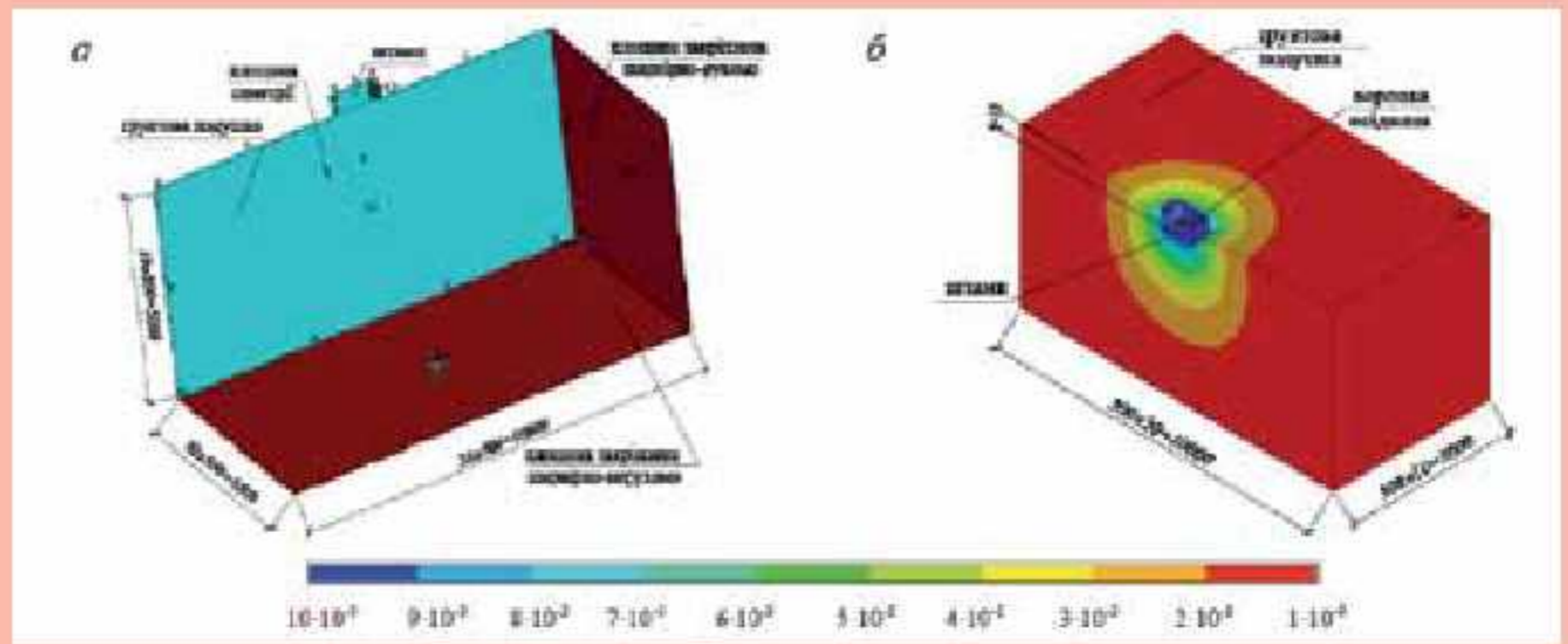


Рис. 5. Вплив змінності технологічних параметрів при зведенні масивних на-сипів на величину математичного сподівання щільності скелета ґрунту: X1 – вид ґрунту та вміст у ньому домішок; X2 – кількість проходів за одним слідом і режим роботи механізму; X3 – товщина кожного відсипаного шару подушки

Рис. 11. Розрахункова схема МСЕ фундаменту на подушці у просторовій постановці (а), деформована схема і розподіл ізополів осідання подушки при детермінованому розрахунку (б)