

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕОДНОРІДНОСТІ УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТІВ У СКЛАДІ ШТУЧНОГО НАСИПУ

Виконано статистичний аналіз даних геотехнічного контролю якості ущільнення ґрунтів штучного насипу на майданчику під зведення металургійного заводу „Ворскла Сталь” потужністю 3 млн. т слябів на рік у м. Комсомольськ Полтавської області.

Statistic analysis of geotechnical control data of quality of soil compaction of artificial embankment at construction of metallurgical plant „Vorskla Stal” having production capacities of 3 mln. t slabs on year in Komsomolsk in Poltava region was done.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв’язок із важливими практичними завданнями. Відповідно до існуючої на сьогодні нор-мативної бази [1] при поверхневому ущільненні ґрунтового масиву контролюють лише його фізичні характеристики. Як правило, у проекті задають коефіцієнт ущільнення k_s чи максимальну щільність скелета ґрунту ρ_d , якої можна досягнути при оптимальній вологості ґрунту W_{opt} . Відбір зразків потрібно виконувати з одного пункту на кожні 300 м², з котрого відбирається 3 зразки ґрунту. При цьому середнє значення параметрів ґрунту ρ_d (k_s) повинне відповідати проекту, а його допустиме зменшення не може перевищувати 0,05 г/см³ у кількості не більше 10 % від загальної кількості визначень.

Це достатньо ефективний спосіб контролю якості зведення штучної основи для невеликих об’єктів. Але при спорудженні масивних ґрунтових подушок нормативна кількість контрольних точок суттєво зростає, що відповідно веде до збільшення вартості робіт та часу на їх виконання.

Невідомо також і як впливають різні технологічні параметри ущільнення на неоднорідність характеристик штучних масивів, що слід урахувати при проектуванні подібних земляних споруд.

Одним із напрямів розв’язання цих проблем може бути більш широке розповсюдження статистичних методів для нормування й прогнозування фізико-механічних характеристик ущільнених ґрунтів штучних масивів з урахуванням при цьому технологічних параметрів ущільнення (характеристики ущільнювального механізму, кількість його проходів за одним слідом, застосування вібраційного режиму, товщина відсипаного шару тощо), гранулометричного і літологічного складу вихідного матеріалу та його вологості. Тоді можливо буде при відомих вихідних властивостях

матеріалу насипу й параметрах ущільнення з певною ймовірністю спрогнозувати наведені величини фізичних і механічних характеристик ґрунту штучного масиву.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв’язання даної проблеми. З аналізу нормативної літератури [1] відомо, що на сьогоднішній день, по-перше, не враховують неоднорідність ущільнення штучних основ, по-друге, для проектування та контролю якості ущільнення земляних споруд використовують поодинокі значення характеристик ущільнених ґрунтів, а не розподіл таких величин. Ці питання експериментально досліджував ряд учених, зокрема, Єрмолаєв М.Н. і Міхєєв В.В. [2], Маслов М.М. [3]. Вони встановили, що для фізичних властивостей природних ґрунтів найкоректнішим є нормальний розподіл Гауса. Для характеристик міцності таких ґрунтів Гольдштейн М.Н. [4] віддає перевагу логарифмічно нормальному (логнормальному) розподілу.

Для поверхнево ущільнених лесових ґрунтів коректність застосування нормального закону розподілу для фізичних характеристик та експоненційного для їх механічних властивостей доводили фахівці ПолтНТУ [5]. Л.М. Тимофєєва вважає [6], що при поверхневому ущільненні лесових ґрунтів неоднорідність їх структури різко зростає порівняно з їх природним станом, що пов’язано, головним чином, із нерівномірним розсіюванням енергії трамбування в масиві, котрий ущільнюють.

Виділення не розв’язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття. Отже, деякі статистичні закономірності отримані для характеристик природних або поверхнево ущільнених лесових ґрунтів. Але для штучно ущільнених масивів із малозв’язного ґрунту коректність застосування тих чи інших закономірностей розподілу випадкових величин не перевірялася.

Тому за **мету роботи** прийнято зібрати й статистично обробити достатній масив фізико-механічних характеристик ущільнених малозв’язних ґрунтів у складі подушки з фіксацією при цьому технологічних параметрів ущільнення та вихідних властивостей матеріалу подушки. Тобто потрібно оцінити неоднорідність ущільнених малозв’язних ґрунтів і виявити фактори, що впливають на неї.

Виклад основного матеріалу дослідження. Протягом 2007 – 2008 років виконувався геотехнічний контроль якості ущільнення штучного піщаного насипу при підготовці території для зведення основних і допоміжних виробництв металургійного заводу „Ворскла Сталь” потужністю 3 млн. т слябів на рік у м. Комсомольськ Полтавської області.

У геоструктурному відношенні майданчик належить до Південно-Західної частини Дніпровсько-Донецької западини, яка складається з потужної товщі осадових порід. У геоморфологічному відношенні

територія приурочена до лівої тераси річок Дніпро і Псел. Рельєф її пологий, із невеликими заболоченими зниженнями у бік Дніпра. З поверхні залягають сучасні алювіальні супіски, суглинки та піски. Територія фактично підтоплена.

За цих інженерно-геологічних умов проектувальниками поставлене завдання звести пошаровим ущільненням (товщина кожного шару 30 см) штучний насип до абсолютної позначки 70.00 (природний рівень поверхні коливається в межах 66.00÷67.00). Середня потужність насипу складатиме 4÷3 м. Площа його поверхні становитиме понад 190 га. Для зручності виконання робіт усю територію розбили на 58 карт („квадратів”) із площею близько 20000 м² кожна (рис. 1).



Рис. 1. – Територія будівництва металургійного заводу

Перед відсипанням першого шару зі всієї території знімався ґрунтово-рослинний шар й у поперечному напрямку прорізані дренажні траншеї перерізом 1х1,5 м з кроком 3 м із подальшим їх заповненням.

У якості матеріалу насипу використані четвертинні відклади Лавриковського та Єристовського родовищ, а саме піски мілкі та пілуваті, однорідні, місцями з домішками супіску пілуватого. Після доставки його на будівельний майданчик і розрівнювання за необхідності ґрунт дозволювався до оптимальної вологості. Потім його укочували пневмокотками типу ДУ-16, самохідними вібраційними однобарабанными котками. У табл. 1 наведені технічні характеристики механізмів, що найчастіше використовувалися фірмами-виконавцями земляних робіт (УМіТ „Одестрансбуд”, „Укренергобудмеханізація”, ВАТ „Доротранс”, „Краматорська транспортна компанія” та ін.).

Таблиця 1 – Технічні характеристики ущільнювальних механізмів

	<p><i>Однобарабанний кулачковий самохідний вібраційний коток Vibromax VM132</i></p> <p>Параметри:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) вага – 14000 кг; 2) навантаження на передній міст – 8000 кг; 3) навантаження на задні колеса – 6000 кг; 4) робоча ширина – 1,8 м; 5) робоча швидкість – 0÷4,4 км/год; 6) тип віброзбуджувача – з прямим гідростатичним приводом; 7) частота, Гц/мм – при першій передачі 30/1,95; при другій – 40/0,90; 8) глибина ущільнення – 0,8÷1 м.
	<p><i>Однобарабанний кулачковий самохідний вібраційний коток HAMM 3516</i></p> <p>Параметри:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) вага – 15750 кг; 2) навантаження на передній міст – 9300 кг; 3) навантаження на задні колеса – 6450 кг; 4) робоча ширина – 2,14 м; 5) робоча швидкість – 0÷4,4 км/год; 6) тип віброзбуджувача – з прямим гідростатичним приводом; 7) частота, Гц/мм – при першій передачі 30/1,95; при другій – 40/0,90; 8) глибина ущільнення – 0,8÷1 м.
	<p><i>Однобарабанний кулачковий самохідний вібраційний коток ATLAS 1140</i></p> <p>Параметри:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) вага – 14000 кг; 2) навантаження на передній міст – 8000 кг; 3) навантаження на задні колеса – 6000 кг; 4) робоча ширина – 1,8 м; 5) робоча швидкість – 0÷4,4 км/год; 6) тип віброзбуджувача – з прямим гідростатичним приводом; 7) частота, Гц/мм – при першій передачі 30/1,95; при другій – 40/0,90; 8) глибина ущільнення – 0,8÷1 м.
	<p><i>Причіпний пневматичний коток ДУ-16</i></p> <p>Параметри:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) вага – 22000 кг; 2) робоча ширина – 2,0 м; робоча швидкість – 0÷4,4 км/год.

Якість ущільнення контролювали у кожному шарі насипу відбором ґрунту в кільця площею 40 см² та об'ємом 140 см³ (рис. 2), які доставлялися до лабораторії для їх подальших досліджень. Також урахувалось використання вібраційного режиму. У процесі здійснення комплексу лабораторних робіт для кожного квадрата та шару визначався гранулометричний склад ґрунту. Усі ці параметри враховувалися у

подальшій статистичній обробці [7 – 10], зокрема, для групування експериментальних даних у вибірці.



Рис. 2. – Відбір зразків ґрунту методом ріжучих кілець

До початку відбору зразків ґрунту для квадратів насипу фіксувалася товщина відсипаного шару через кожні 2 м по довжині електронним тахеометром або оптичним нівеліром. Виконувалася оцінка мінливості (коефіцієнта варіації) цього параметра (рис. 3, а, б) та вплив його на мінливість щільності скелета ґрунту (рис. 4, а, б). Потім фіксувалася кількість проходів за одним слідом певного ущільнювального механізму. Лише після цього відбиралися зразки ґрунту. Досліджувався також вплив мінливості вологості (рис. 3, в, г) на мінливість щільності скелета ґрунту (рис. 4, а, б).

Отже, при коефіцієнтах варіації товщини першого шару $\nu = 0,262$ та вологості $\nu = 0,282$ мінливість щільності скелета ґрунту його склав $\nu = 0,0345$. Для другого шару ці параметри відповідно становили $\nu = 0,15$, $\nu = 0,181$ та $\nu = 0,0189$. Таким чином, видно, що при меншій мінливості первинних (товщини шару та вологості ґрунту) зменшується мінливість наведених параметрів (щільності скелета ґрунту).

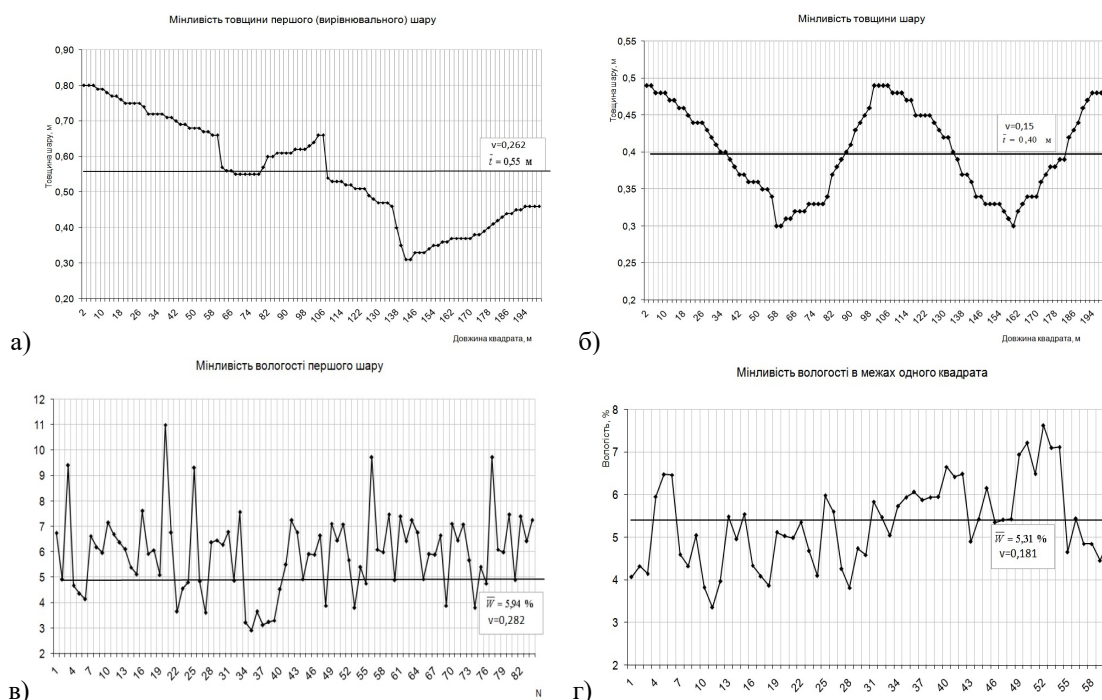


Рис. 3. – Мінливість первинних параметрів ущільнення:
а, б – товщини шарів; в, г – вологості ґрунту

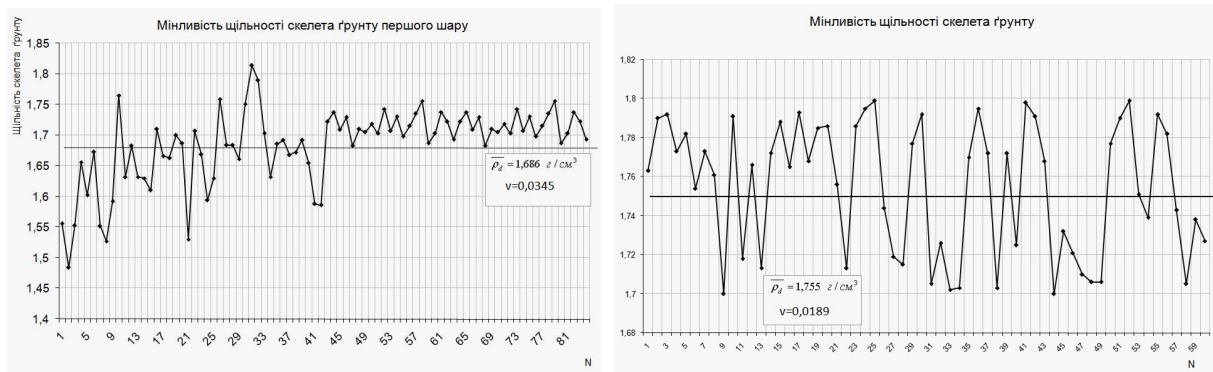


Рис. 4. – Мінливість наведених параметрів ущільнення:
а, б – щільності скелета ґрунту відповідно першого та другого шарів

На рис. 3, а та 3, б помітно, що товщина відсипаного шару коливалася в межах $0,3 \div 0,8$ м для першого шару та в межах $0,3 \div 0,5$ – для другого. До речі, за проектом шари повинні мати товщину 0,3 м. На рис. 5 зображена гістограма розподілу відхилень товщини шарів від проектного значення. Вид розподілу випадкових величин близький до нормального.

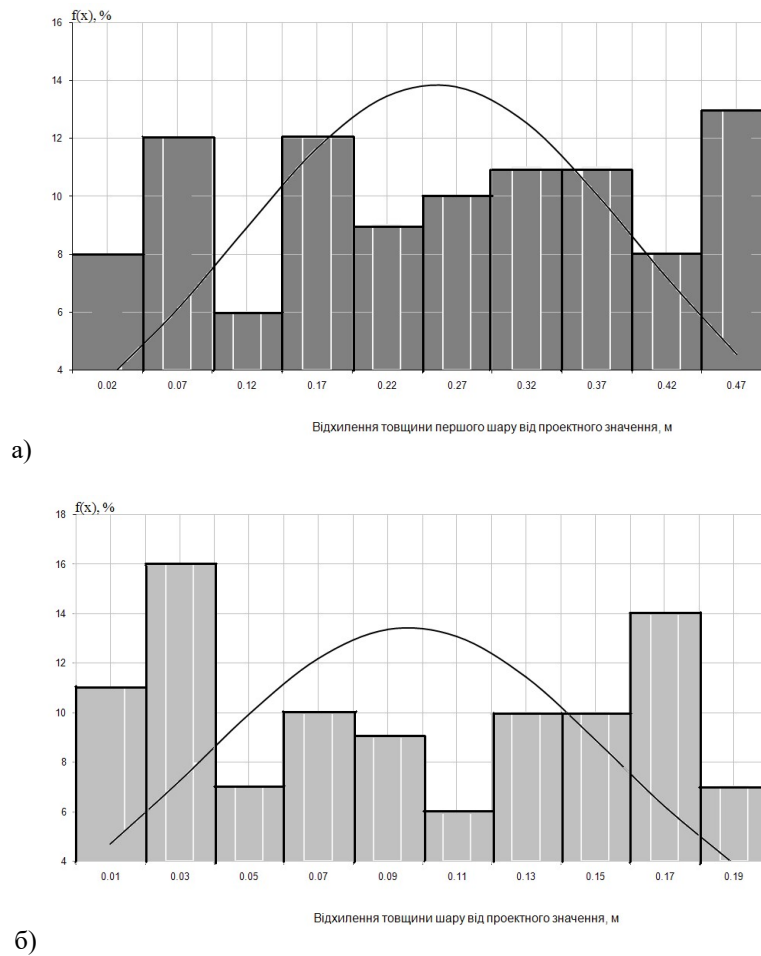


Рис. 5. – Розподіл відхилень товщини шару першого та другого шарів від проектного значення

На рис. 6 показані приклади експериментальних графіків нормального розподілу щільності скелета ґрунту для згрупованих вибірок за параметрами механізмів ущільнення без урахування (рис. 6, а) та з урахуванням виду ґрунту (рис. 6, б). Саме цим пояснюється „двогорбистість” експериментального графіка на рис. 6, а. Щільність скелета ґрунту в межах $1,594 \div 1,754 \text{ г/см}^3$ (перший „горб”) відповідає супіскам пилуватим, а в межах $1,754 \div 1,954 \text{ г/см}^3$ (другий „горб”) – піскам мілким, однорідним.

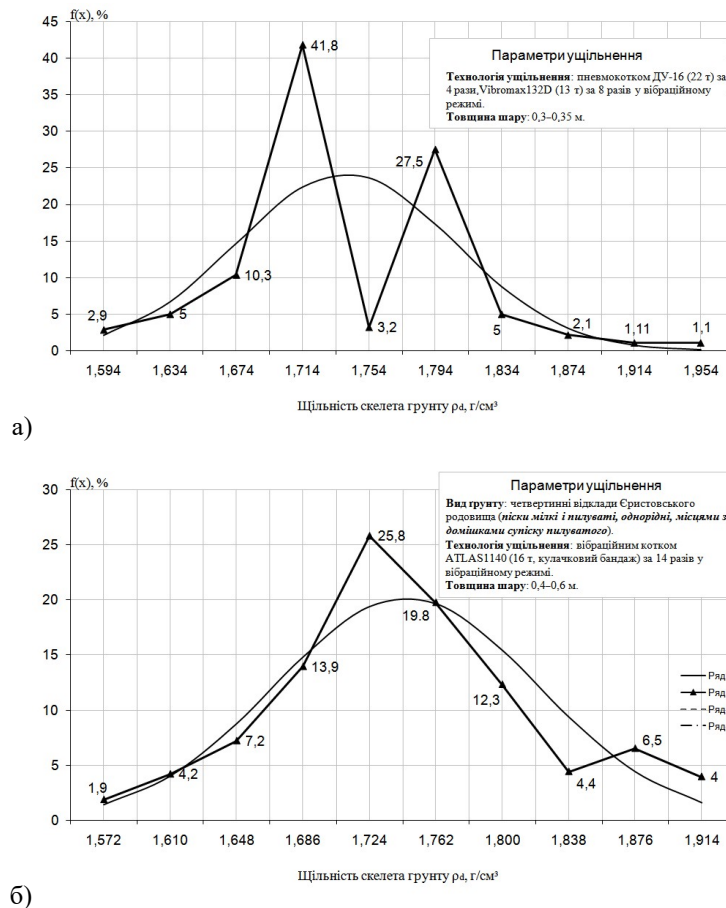


Рис. 6. – Експериментальні графіки та графіки нормального закону розподілу випадкових величин для щільності скелета ґрунту:
 а – без урахування гранулометричного складу ґрунту;
 б – з урахування гранулометричного складу ґрунту

У результаті робіт протягом першого року загальна (генеральна) вибірка щільності скелета ґрунту та його вологості склала понад 2000 поодиноких значень. Оцінка апроксимації значень щільності скелета ґрунту штучної основи розглядається на базі таких видів розподілів:

– нормальний розподіл (розподіл Гауса): $\rho(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} \right],$

де σ_x – середнє квадратичне відхилення (стандарт); $\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}};$

\bar{x} – математичне очікування (середнє значення) щільності скелета ґрунту;

$\bar{x} = \sum \frac{x_i}{n}$; n – кількість значень;

– логарифмічно нормальний розподіл: $\rho(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \frac{1}{z} \exp \left[-\frac{(\ln x - \bar{z})^2}{2\sigma_z^2} \right]$,

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

розподіл, що можна описати рядом Грам-Шарльє,

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

де $A = \frac{\mu_3}{6\sigma^3}$; $E = \frac{\mu_4 - 3\sigma^4}{24\sigma^4}$.

Для значень вологості ґрунту штучного насипу використовувався лише нормальний закон розподілу.

Для експериментальних полігонів розраховані статистичні характеристики, які наведені у табл. 2. На рис. 7 і 8 подані приклади вищеназваних розподілів та експериментальні графіки для щільності скелета ґрунту і його вологості.

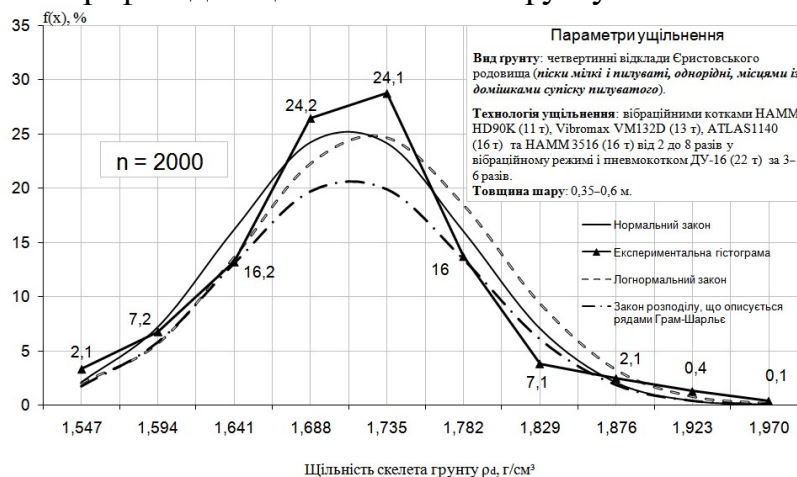


Рис. 7. – Порівняння експериментального графіка з відповідними законами розподілу випадкових величин

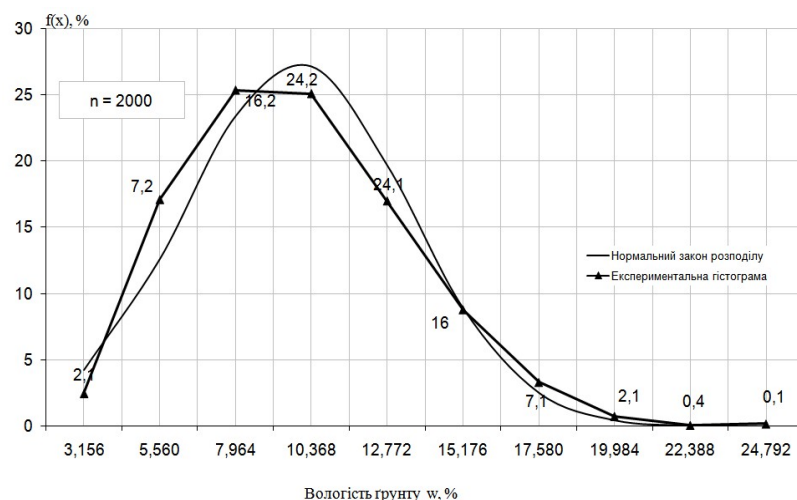


Рис. 8. – Експериментальний графік та графік нормального закону розподілу вологості ґрунту штучного насипу

Таблиця 2 – Статистичні характеристики експериментальних полігонів

Характеристика ґрунту	Математичне очікування \bar{x}	Стандарт \hat{x}	Коефіцієнт варіації v	Асиметрія A	Експес E
ρ_d , г/см ³	1,711	0,0738	0,0431	0,25	0,70
W, %	9,927	3,5076	0,3533	0,49	0,12

Для порівняння відповідності між теоретичними розподілами та статистичним рядом варіаційний ряд розбивається на інтервали. Кількість інтервалів 10. Довжина його при цьому дорівнює розмаху емпіричного розподілу, поділеному на кількість інтервалів. Вибіркове середнє \bar{x}^* є серединою інтервалу. Застосовуючи критерій Пірсона χ^2 для виявлення найбільш коректного закону розподілу, визначали емпіричну частоту попадання випадкового значення щільності скелета ґрунту до кожного інтервалу та ймовірність попадання у той же інтервал $P_m = \delta P(\bar{x}^*)$, що розраховується за розглянутими розподілами (табл. 3).

Таблиця 3 – Порівняння використаних законів розподілу з експериментальним для щільності скелета ґрунту

Статистичний ряд			Нормальний закон			Логарифмічно нормальний закон		Закон розподілу, що описується рядом Грам-Шарльє	
№ з/п	Інтервал	x_i	m_i	nP_i	$\frac{(m_i - nP_i)^2}{nP_i}$	nP_i	$\frac{(m_i - nP_i)^2}{nP_i}$	nP_i	$\frac{(m_i - nP_i)^2}{nP_i}$
1	1,523...1,570	1,547	3,3	2,146	0,62	2,00	0,45	1,707	1,48
2	1,570...1,617	1,594	6,75	7,219	0,03	5,63	0,11	5,773	0,17
3	1,617...1,664	1,641	13,2	16,18	0,55	13,62	0,27	13,04	0,00
4	1,664...1,711	1,688	26,45	24,19	0,21	22,28	0,38	19,70	2,31
5	1,711...1,758	1,735	28,75	24,10	0,90	24,66	3,97	19,89	3,94
6	1,758...1,805	1,782	13,7	16,01	0,33	18,47	0,29	13,42	0,01
7	1,805...1,852	1,829	3,8	7,088	1,53	9,36	1,98	6,058	0,84
8	1,852...1,899	1,876	2,45	2,092	0,06	3,21	0,01	1,827	0,21
9	1,899...1,946	1,923	1,25	0,411	1,71	0,74	0,67	0,368	2,11
10	1,946...1,993	1,970	0,35	0,054	1,62	0,12	2,00	0,049	1,81
					$\chi^2 = 7,56$		$\chi^2 = 10,13$		$\chi^2 = 12,89$

Порівнюючи збіжність теоретичних та експериментальних графіків щільності скелета ґрунту штучного насипу, можна зробити висновок, що при кількості ступенів вільності $k=7$ для нормального закону розподілу, прийнявши за квантиль знайдений критерій Пірсона $\chi^2=7,56$, рівень значимості буде $\alpha=0,3$. Так, відповідно для логарифмічно нормального $\alpha=0,1$ і для закону розподілу, що описується рядом Грам-Шарльє, $\alpha=0,05$. Тобто всі використані теоретичні закони розподілів досить непогано описують експериментальний полігон, не перевищуючи при цьому рівень значимості 0,05. Але все ж таки за критерієм Пірсона найкоректнішим виявився нормальний закон розподілу. Для вологості ґрунту штучного насипу нормальний закон розподілу також коректний для рівня значимості $\alpha=0,1$.

У табл. 4 зведені статистичні характеристики щільності скелета ґрунту ρ_d , його вологості W генеральної вибірки та окремих квадратів залежно від параметрів ущільнення та виду ґрунту. Як видно з табл. 4, коефіцієнт варіації щільності скелета та вологості ґрунту генеральної вибірки більший на 10÷20 %, ніж коефіцієнт варіації по квадрату.

Таблиця 4 – Статистичні характеристики фізичних властивостей ущільнених ґрунтів

Фізичні властивості	Математичне очікування \bar{X}		Стандарт \hat{x}		Коефіцієнт варіації v		Співвідношення $\frac{v_{kv}}{v_{zv}}$
	Квадрата	Загальної вибірки	Квадрата	Загальної вибірки	Квадрата	Загальної вибірки	
Пісок мілкий і пиловатий із домішками супіску, однорідний							
Пневмокатком ДУ-16 за 4 рази та катком Vibromax132D за 8 разів у вібраційному режимі							
ρd	1,740	1,711	0,066	0,0738	0,0379	0,0431	0,88
W	12,49	9,927	1,71	3,5076	0,1367	0,3533	0,39
Пісок пиловатий із домішками супіску, однорідний							
Пневмокатком ДУ-16 за 4 рази та катком НАММ3516 за 6 разів у вібраційному режимі							
ρd	1,717	1,711	0,05	0,0738	0,0288	0,0431	0,67
W	9,725	9,927	3,31	3,5076	0,34	0,3533	0,96
Пісок мілкий, місцями пиловатий із домішками супіску, однорідний							
Катком ATLAS1140 за 14 разів у вібраційному режимі							
ρd	1,745	1,711	0,0752	0,0738	0,0431	0,0431	1
W	10,94	9,927	3,72	3,5076	0,34	0,3533	0,96

Використовуючи нормальний закон розподілу щільності скелета ґрунту штучної основи, можна зробити певні узагальнення про якість її ущільнення. За вимогами австрійської проектної організації „Strohhausel & Partner” ступінь ущільнення повинен складати 101% від стандартної щільності за критерієм Проктора. Значення щільності скелета ґрунту при цьому коливалося у межах $\rho_d = 1,719 \div 1,721$ г/см³ для пісків мілких Єристовського родовища. За даними геотехнічного контролю якості ущільнення та статистичними параметрами встановлено, що: 1) ймовірність того, що випадкова величина щільності скелета ґрунту $\tilde{\rho}_d$ буде більшою за 101% від максимальної за Проктором, складатиме $P = 44,63\%$; 2) ймовірність того, що $\tilde{\rho}_d$ буде менше за $(\rho_d^{\max} \times 1.01 - 0.05) = 1.669$ г/см³ – $P = 28,43\%$; 3) ймовірність того, що $\tilde{\rho}_d$ буде в інтервалі $[1,669; 1,721]$ – $P = 26,94\%$. Отже, в даному випадку забезпеченість проектного значення щільності скелета ґрунту складає 45%. Та нормативна література не враховує ймовірнісні аспекти ущільнення ґрунтів для штучних основ, а тому важко сказати про якість ущільнення напевно (для надземних конструкцій забезпеченість нормативного значення задається, як правило, не менше 90%).

Щоб зменшити неоднорідність ущільнення штучного насипу виникла необхідність у вивченні впливу кількості проходів ущільнювального механізму за одним слідом для піщаних ґрунтів, а також дослідити вплив режиму вібрації. У якості критерію змінності (випадкового розкиду) властивостей ґрунтів, як і у [10], прийнято коефіцієнт варіації v , котрий являє собою відношення середньоквадратичного відхилення σ_x характеристики X та її математичного очікування m_x .

Методика дослідження змінності неоднорідності ущільнення являла собою спостереження за зміною коефіцієнта варіації v для щільності скелета ґрунту від кількості проходів механізмів за одним слідом. При геотехнічному контролі якості ущільнення помічено, що при додатковому ущільненні масиву коефіцієнт варіації щільності скелета ґрунту зменшується. Для перевірки цього виконана експериментальна ділянка із проектною товщиною шару та вологістю, близькою до оптимальної. У якості ущільнювального механізму використовувався самохідний вібраційний коток ATLAS1140, який виконував перші 3 проходи у безвібраційному режимі, а інші – у вібраційному. Після кожних трьох проходів відбиралося по 12 зразків ґрунту.

Помічено, що для піщаних ґрунтів неоднорідність їх структури зменшується при збільшенні кількості проходів за одним слідом, але до певної межі. Так, на рис. 9 добре помітно, що коефіцієнт варіації щільності скелета ґрунту зменшувався при збільшенні кількості проходів за одним слідом до шести, а при більшій кількості проходів він знову зростав.

Потрібно зазначити, що проектна щільність скелета ґрунту була досягнута після восьми проходів.

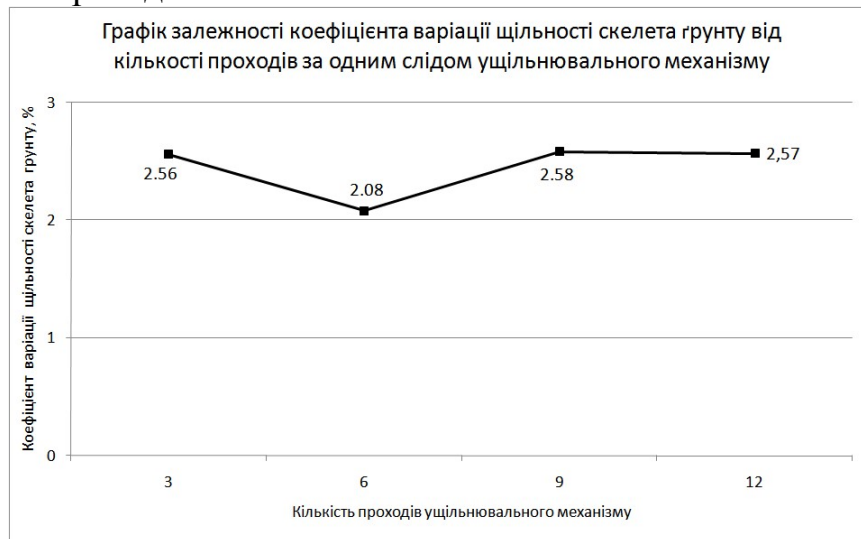


Рис. 9. – Графік залежності коефіцієнта варіації щільності скелета ґрунту від кількості проходів за одним слідом ущільнювального механізму

Отже, можна зробити висновок, що для малозв'язних ґрунтів збільшення кількості проходів за одним слідом після певної межі може не призвести до зменшення неоднорідності. Тому слід у польових умовах визначати потрібну кількість проходів за одним слідом для кожного типу ущільнювального механізму.

Висновки з даного дослідження. При зменшенні мінливості (коефіцієнта варіації) товщини шару та мінливості його вологості знижується мінливість щільності скелета ґрунту. Отже, для досягнення більш однорідного масиву необхідно намагатися виконувати шари приблизно однакової товщини, близької до проектної, та за необхідності рівномірно їх зволожувати. Статистичні вибірки потрібно формувати, враховуючи не лише параметри ущільнювальних механізмів, але й обов'язково гранулометричний склад ґрунту.

За результатами геотехнічного контролю якості ущільнення розкривних четвертинних відкладів доведено коректність нормального закону для розподілу величин щільності скелета ґрунту та його вологості.

Для малозв'язних ґрунтів збільшення кількості проходів за одним слідом призводить до зниження значення коефіцієнта варіації до певної межі, після якої неоднорідність уже не зменшується. Тому слід у польових умовах визначати потрібну кількість проходів ущільнювального механізму за одним слідом.

Пропонуються подальші напрями досліджень неоднорідності ущільнених четвертинних відкладів для зведення штучних основ: 1) порівняти дані фізичних характеристик ґрунту, отримані у натурних умовах та у лабораторії; 2) зібрати достатній обсяг значень характеристик міцності та деформативності (φ, c, E) ґрунтів і дослідити закони розподілу

механічних властивостей ущільнених ґрунтів у складі штучного насипу;
3) порівняти дані властивостей міцності та деформативності ґрунту, одержані у натурних умовах й у лабораторії. Виконані дослідження можуть надалі дозволити розв'язати деякі наукові та інженерні задачі проектування й нормування штучних насипів.

Література

1. СНиП 3.02.01-83. *Основания зданий и сооружений/ Госстрой СССР*. – М.: Стройиздат, 1983. – 39 с.
2. Єрмолаєв М.Н. *Надежность оснований и фундаментов/ М.Н. Єрмолаєв, В.В. Михеев*. – Л.: Стройиздат, Ленинград. отд-ние, 1976. – 152 с.
3. Маслов Н.Н. *Основы инженерной геологии и механики грунтов/ Н.Н. Маслов*. – М.: Высш. шк., 1982. – 511 с.
4. Гольдиштейн М.Н. *Механические свойства грунтов/ М.Н. Гольдиштейн*. – М.: Стройиздат, 1971–1979. – Т. I. – 1971. – 368 с., Т. II. – 1973. – 375 с., Т. III. – 1979. – 304 с.
5. *Натурні дослідження неоднорідності ґрунтової подушки/ [Ю.Л. Винников, А.В. Яковлев, А.М. Пащенко та ін.]// Зб. наук. праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. – Полтава: ПолтНТУ, 2006. – Вип. 17. – С. 148–154.
6. Тимофеева Л.М. *О статистическом подходе к оценке прочности уплотненных лессовых грунтов/ Л.М. Тимофеева // Основания и фундаменты: межвуз. сб. науч. тр.* – Пермь: ППИ, 1978. – С. 78–83.
7. Райзен В.Д. *Расчет и нормирование надежности строительных конструкций/ В.Д. Райзен*. – М.: Стройиздат, 1995. – 352 с.
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.: Маришрут, 2006. – 620 с.
10. ДСТУ Б В.2.1-5-96 (ГОСТ 20522-96). *Ґрунти. Методи статистичної обробки результатів випробувань/ Державний комітет України у справах містобудування та архітектури*. – К.: МНТКС, 1997. – 32 с.