

УДК 624.138.22

Ю.Л. Винников, д-р техн. наук, професор

М.О. Харченко, канд. техн. наук, доцент

Р.М. Лопан, канд. техн. наук, доцент

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

С.М. Манжалій, головний інженер

Управління капітального будівництва ТОВ «Vorskla Steel»

ГЕОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ШТУЧНИХ ОСНОВ ІЗ РОЗКРИВНИХ МАЛОЗВ'ЯЗНИХ ҐРУНТІВ

АНОТАЦІЯ: На базі натурних досліджень впливу мінливості технологічних чинників зведення подушок із розкривних пісків, у т. ч. з плином часу, представлено характерні приклади реалізації моделей імовірного опису розподілів випадкових величин будівельних властивостей ущільнених ґрунтів і ряду технологічних параметрів. Встановлено взаємозв'язок між фізичними та механічними властивостями ущільнених розкривних пісків подушок з урахуванням впливу параметрів їх укочування. Обґрунтовано підвищення якості проектування геомасивів з розкривних пісків удосконаленням геоінформаційних технологій.

Ключові слова: РОЗКРИВНИЙ ПІСОК, ПОДУШКА, УКОЧУВАННЯ, КУТ ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ, ПИТОМЕ ЗЧЕПЛЕННЯ, МОДУЛЬ ДЕФОРМАЦІЇ, ПИТОМИЙ ОБ'ЄМ СКЕЛЕТУ ҐРУНТУ, ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК, МЕТОД СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими практичними завданнями. Через урбанізацію геотехніки використовують підтоплені території, складені слабкими ґрунтами. За цих умов зводять штучні масиви з кращими будівельними властивостями, ніж у природних ґрунтів. Тому екологічно й економічно доцільно використати четвертинні розкривні породи, підняті на поверхню при розробці кар'єрів, для влаштування подушок [1, 2]. Їх використання норми не забороняють.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для підвищення точності оцінювання параметрів напружено-деформованого стану (НДС)

основ слід враховувати різні види неоднорідностей, притаманних і реальним масивам, за рахунок різноманітності їх складу й структури, полідисперсності, багатофазності, полімінеральності ґрунтів, характеру внутрішніх зв'язків, впливу інженерно-геологічних процесів. За параметри неоднорідності ущільнених малозв'язних ґрунтів розуміють розкид їх фізико-механічних властивостей, закономірності ущільнення середовища за глибиною [3 – 7].

При пошаровому ущільненні контролюють лише фізичні параметри ґрунту подушок (коефіцієнт ущільнення k_s , щільність скелету ґрунту ρ_d). Та при проектуванні основ і фундаментів геотехнікам потрібні переважно механічні характеристики ґрунтів (кут внутрішнього тертя φ , питоме зчеплення c , модуль деформації E) [4 – 9].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття. Між механічними та фізичними властивостями ущільнених розкривних малозв'язних порід подушок можливі кореляційні чи функціональні залежності, які досліджено недостатньо [8, 9]. Не встановлено й вплив технології укочування матеріалу на механічні властивості ґрунту. Для введення в інженерну практику стохастичних моделей штучної основи слід визначити статистичні параметри характеристик міцності й деформативності ущільнених ґрунтів, дослідити фактори, які впливають на характер розподілу їх випадкових величин (ВВ), вивчити закономірності, наявні в штучних масивах за час їх експлуатації.

Тому **метою роботи** є оцінювання неоднорідності ущільнених ґрунтів штучних основ і встановлення взаємозв'язку між фізичними й механічними характеристиками ущільнених розкривних малозв'язних ґрунтів подушок з урахуванням впливу параметрів укочування.

Виклад основного матеріалу. Об'єкт досліджень – проектування та геотехнічний супровід зведення з розкривних пісків (мілкий, однорідний; мілкий з домішками супіску пилуватого; середньої крупності, однорідний; гранулометричний склад однієї із вибірок наведено в табл.1 подушки товщиною 4 – 6 м і площею 190 га (пошаровим ущільненням вібраційними кулачковими і гладкими й пневматичними котками – рис. 1) під споруди заводу «Vorskla Steel» (рис. 2) прямого відновлення заліза потужністю 3 млн. т. слябів у рік в м. Комсомольськ. Сплановано пасивний однофакторний експеримент для отримання статистичних даних фізико-механічних характеристик ущільненого ґрунту й змінності технологічних

факторів. Дисперсійним багатофакторним аналізом за планом 3^3 визначено вплив мінливості товщини шарів, гранскладу, кількості проходів і режиму механізму на змінність характеристик ущільненого ґрунту.

Таблиця 1

**Приклад результатів ситового аналізу
гранулометричного складу піску однієї із вибірок**

№ шурфу	Діаметр частинок, мм						Найменування ґрунту за гранскладом (ДСТУ Б.В.2.1-2-96)
	>2,0	2,0-1,0	1,0-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	<0,1	
карта №21 шар №5	0,43	0,57	0,81	4,71	58,52	3,75	пісок мілкий, однорідний
	0,6%	0,8%	1,2%	6,8%	85,1%	5,5%	

У результаті польових і лабораторних досліджень властивостей ущільнених пісків отримано статистично обґрунтований для коректного встановлення взаємозв'язку між фізичними і механічними властивостями ґрунтів з урахуванням впливу параметрів укочування об'єм визначень ґрунтових характеристик і параметрів укочування (товщина шару ґрунту до укочування h , зниженням його поверхні під котком Δh , статичний чи вібраційний режим котка і т. ін.), а саме: для піску мілкового, однорідного: вологості w й щільності скелету ґрунту $n = 314$; кута внутрішнього тертя φ й питомого зчеплення c $n = 70$; модуля деформації E $n = 314$; для піску мілкового, однорідного з домішками супіску пилюватого, пластичного: w та ρ_d – $n = 144$; φ й c – $n = 39$; E – $n = 144$; для піску середньої крупності, однорідного: w та ρ_d , а також E – $n = 61$; кількість Δh і h – по $n = 45$.

Порівнянням коефіцієнтів варіації характеристик ущільненого і природного ґрунту доведено, що при використанні розкривних пісків у подушці він більш однорідний, ніж у природному стані. Багатофакторним експериментом визначено, що найбільший вплив на змінність властивостей матеріалу нового масиву має вид ґрунту й вміст у ньому домішок, менший – кількість проходів одним слідом і режим роботи механізму (вібраційний чи статичний), а найменший – товщина шару до ущільнення. Коефіцієнт варіації значень щільності скелета ґрунту становив 2 – 4,4 %, вологості – 23 – 36 %, питомої ваги ґрунту – 4 – 4,6 %, модуля деформації – 33 – 57 %, кута внутрішнього тертя – 11 %, питомого зчеплення – 25 %. Дослідження впливу часу на параметри ґрунту показали, що за 2 роки у нижніх шарах подушки відбулося додаткове ущільнення від власної ваги вищерозташованого ґрунту. Встановлена більш висока інтенсивність його самоущільнення при вологості $w = 20 - 25$ % порівняно з $w = 6 - 18$ %. За однакового тиску від власної ваги ґрунту спостерігались значення щільності скелету ґрунту на 6 % більші (з 1,62 до 1,65 г/см³).



Рис. 1. Етапи зведення штучної основи: *а* – підтоплена територія під насип; *б, в* – зняття ґрунтово-рослинного шару, прорізання дренажних траншей екскаватором; *г, д* – доставка автосамоскидами і розрівнювання грейдером розкривної породи; *е* – доведення ґрунту до оптимальної вологості (при необхідності); *ж, з* – пошарове ущільнення ґрунту однобарабаним самохідним кулачковим вібрототком



Рис. 2. Супутниковий знімок території кар'єру Полтавського ГЗК та майбутнього заводу «Vorskla Steel»

Модуль деформації ущільнених ґрунтів визначали у приладах з компресійних випробувань. Після компресії ті ж зразки випробували в приладі одноплощинного зрушення та визначали характеристики міцності для II групи граничних станів. При цьому застосовувались стандартні методики. У результаті було встановлено, що для фізичних властивостей ущільнених ґрунтів подушок коректними є нормальний закон розподілу, а сумішей – поліномо-експоненційний, для модуля деформації – логарифмічно нормальний, кута внутрішнього тертя – нормальний, питомого зчеплення – логарифмічно нормальний.

Будівельні властивості ущільненої суміші не гірші, ніж в однорідних ущільнених ґрунтів, хоча є збільшення розкиду їх значень, а для ВВ ρ_d неякісно перемішаної суміші характерна дво модальність графіка їх розподілу. Технологічне змішування різних видів ґрунтів і віброрежим суттєво впливають на питоме зчеплення ущільнених ґрунтів і мало – на кут внутрішнього тертя; величина модуля деформації залежить від щільності скелету ґрунту й інтервалу тиску в компресійних дослідах.

Для кожного з типів пісків, укочених у подушки, побудовано для чотирьох – семи малих (2,5 %) інтервалів вологості у напівлогарифмічних координатах графіки залежності від питомого об'єму скелету ґрунту $1/\rho_d$:

модуля деформації для 4 інтервалів тиску $\sigma = 0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2; 0,2 - 0,3$ МПа – $\lg E = f(1/\rho_d)$; кута внутрішнього тертя $\lg \varphi = f(1/\rho_d)$ і питомого зчеплення ґрунту $\lg c = f(1/\rho_d)$; вплив на ці залежності виду й режиму роботи котків досліджено нанесенням на графіки умовних позначень кожного з них. Графічні залежності $\lg E = f(1/\rho_d)$ для піску мілкого однорідного згруповані за 4 інтервалами тиску σ (рис. 3) і за 7 інтервалами вологості. Аналогічні залежності маємо й для інших типів пісків. З аналізу графіків для ущільнених пісків можливі узагальнення:

– у координатах $\lg E = f(1/\rho_d)$ графіки залежності модуля деформації E від питомого об'єму скелета ґрунту лінійізуються;

– при зменшенні питомого об'єму скелета ґрунту $1/\rho_d$ величина модуля деформації E лінійно зростає в усіх дослідних інтервалах вологості w ;

– при збільшенні інтервалу тиску σ значення модуля деформації ґрунту лінійно зростає при постійній величині його вологості, а лінійні графіки $\lg E = f(1/\rho_d)$ при різних інтервалах тиску σ – близькі до паралельних;

– для початкового інтервалу тиску $\sigma = 0 - 0,05$ МПа зафіксовано наведену (отриману внаслідок укочування) структурну міцність ґрунту;

– вологість піску не суттєво впливає на модуль деформації;

– значення коефіцієнта варіації рівнянь взаємозв'язку (1) та (2) не перевищують $\nu = 0,20$, що свідчить про коректність виразів; зі зростанням тиску від $\sigma = 0 - 0,05$ до $0,2 - 0,3$ МПа розкид даних зменшується (при $\sigma = 0,2 - 0,3$ МПа $\nu < 0,11$).

Загальне рівняння лінійної залежності E від $1/\rho_d$ має вигляд:

$$\lg(E/E_0) = A_E - B_E \cdot (1/\rho_d), \quad (1)$$

де $E_0 = 1$ МПа; A_E (вільний член), B_E (кутовий коефіцієнт із розмірністю г/см^3) – емпіричні коефіцієнти лінійного рівняння взаємозв'язку;

$$A_E = A_{E,0} + A_{E,1} \cdot \sigma, \quad (2)$$

де $A_{E,0}$ та $A_{E,1}$ (МПа^{-1}) – емпіричні коефіцієнти до виразу (2).

Загальні рівняння лінійної залежності характеристик міцності від питомого об'єму скелету ґрунту мають вигляд:

$$\lg(\varphi/\varphi_0) = A_\varphi - B_\varphi \cdot (1/\rho_d); \quad (3)$$

$$\lg(c/c_0) = A_c - B_c \cdot (1/\rho_d), \quad (4)$$

де $\varphi_0 = 1^\circ$; $c_0 = 1$ кПа; A_φ , B_φ , A_c , B_c – емпіричні коефіцієнти рівнянь.

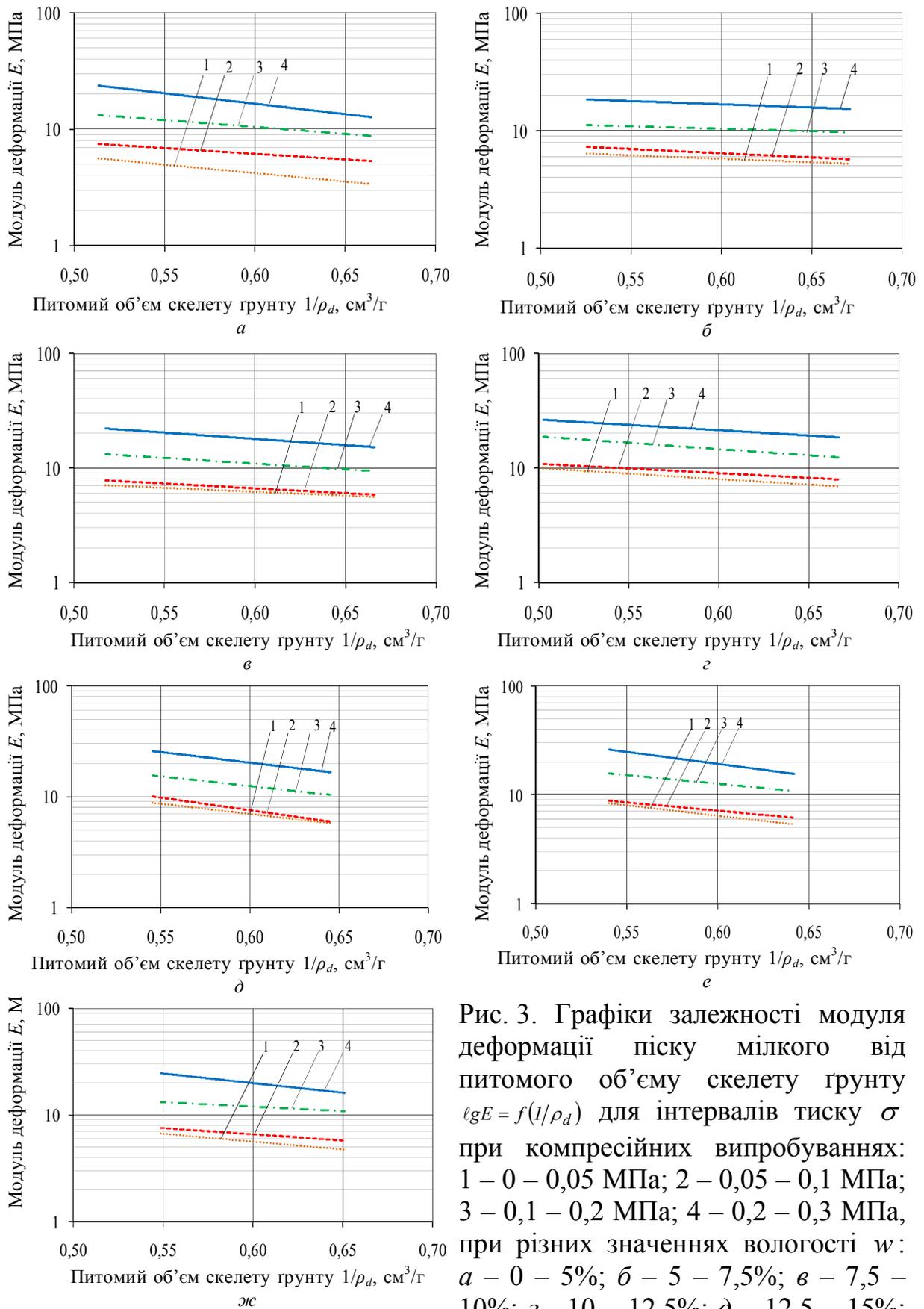


Рис. 3. Графіки залежності модуля деформації піску мілкового від питомого об'єму скелету ґрунту $\lg E = f(1/\rho_d)$ для інтервалів тиску σ при компресійних випробуваннях: 1 – 0 – 0,05 МПа; 2 – 0,05 – 0,1 МПа; 3 – 0,1 – 0,2 МПа; 4 – 0,2 – 0,3 МПа, при різних значеннях вологості w : а – 0 – 5%; б – 5 – 7,5%; в – 7,5 – 10%; г – 10 – 12,5%; д – 12,5 – 15%; е – 15 – 17,5%; ж – 17,5 – 20% (дослідні точки умовно не показано)

Коефіцієнти варіації рівнянь взаємозв'язку фізичних і механічних властивостей ущільнених пісків (1 – 4) не перевищують $\nu=0,20$, а кореляції більші за $r=0,85$, що свідчить про коректність виразів.

Якість проектування подушок з розкривних пісків можливо підвищити застосуванням геоінформаційних технологій, зокрема побудови ізополів нормативних значень E (рис. 4), φ , c ущільнених різних видів піску в плані подушки під споруди для діапазону глибин 1 – 1,5 м.

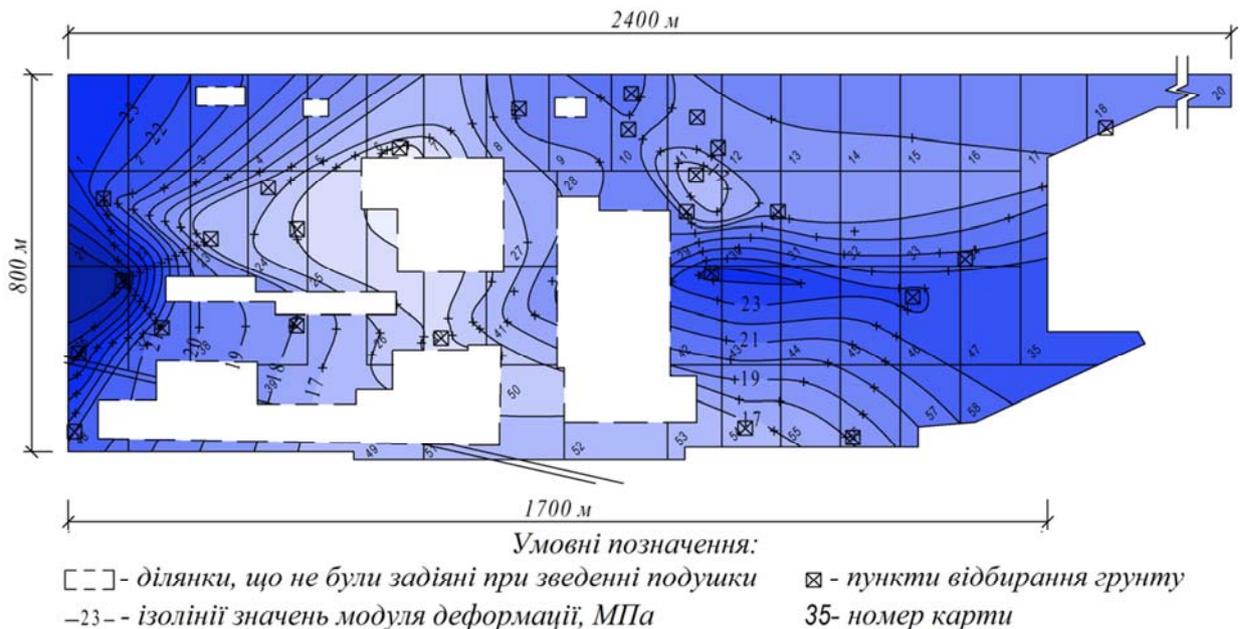


Рис. 4. Ізополя величин модуля деформації E , МПа, ущільненого укочуванням піску мілкого однорідного шарів подушки під споруди заводу «Vorskla Steel»

Визначено, що коефіцієнт варіації розрахункового опору ущільненого ґрунту подушки як ВВ становить 21,8 – 36,3 %, а граничного опору – 34,4 – 37,5 %. Тому за ймовірного підходу навіть при неперевіщенні тиску під фундаментом розрахункового опору ґрунту є ймовірність, крім лінійної, ще й нелінійної стадій деформування основи, що зумовлено змінністю характеристик ущільнених ґрунтів і випадковою природою навантажень на фундаменти. Моделювання методом скінчених елементів з використанням пружно-пластичної моделі ґрунту і залученням методу Монте-Карло при числі ітерацій 10^4 НДС основ коректно описує деформування подушок. Для багатошарової подушки значення коефіцієнта варіації осідання ν_s менші за одношарову, хоча математичне очікування осідання в 2,4 рази більше. Коефіцієнт ν_s збільшується зі зростанням

неоднорідності нашарувань, зокрема, при більшій стисливості верхніх шарів, ніж підстилаючих і зростанні співвідношення модулів деформації у них. Спосіб зведення подушки з різним ступенем ущільнення її шарів зменшує змінність осідання фундаменту на ній.

Встановлено, що ймовірність відмови фундаментів на подушці за I граничним станом є прийнятною, бо характеристика безпеки $\beta > 3 - 4$, а за критерієм відносної нерівномірності їх осідань на одношаровій подушці – досягає 10 % за граничної величини $(\Delta S/L)_u=0,002$ і 3 % за $(\Delta S/L)_u=0,004$, але для багатошарової подушки ці значення становлять відповідно лише 0,02 % та 0,0006 %.

Висновки. Таким чином, шляхом комплексних лабораторних і натурних досліджень отримано понад 3000 ВВ фізико-механічних характеристик ущільнених розкритих пісків та їх сумішей, визначено вплив технологічних факторів на розкид цих значень, статистично обґрунтовано для фізичних властивостей ґрунтів подушок коректність застосування нормального закону розподілу, а сумішей – поліномо-експоненційного, для модуля деформації ущільнених ґрунтів і сумішей – логарифмічно нормального, кута внутрішнього тертя – нормального, питомого зчеплення – логарифмічно нормального закону розподілу.

Для рівнянь взаємозв'язку між питомим об'ємом скелету ґрунту і модулем деформації, кутом внутрішнього тертя, питомим зчепленням кожного типу розкритих пісків слід визначити його індикаційні ознаки – вільний член (відповідно A_E , A_φ , A_c) й кутовий коефіцієнт (B_E , B_φ , B_c) лінійних рівнянь. Вільний член A_E для кожного з типів пісків описують лінійним рівнянням залежно від тиску компресійних випробувань зразків.

Список літератури

1. Van Impe, W.F. On the design, construction and monitoring of embankments on soft soil in underwater conditions / W.F. Van Impe, R.D. Verastegui Flores. – SPtb.: «Georeconstruction – Fundamentproject», 2007. – 164 p.
2. Зоценко М.Л. Використання «хвостів» Полтавського ГЗК при влаштуванні земляних споруд / М.Л. Зоценко // Світ геотехніки, 2005. – № 4. – С. 7 – 11.
3. Ouni M. Vibro compaction improvement of Tunisian liquefiable sands / M.Ouni, M.Bouassida, B.Das // Proc. of 17th Intern. Conf. on Soil Mechanics

- and Geotechnical Engineering. – Olexandria, 2009. – Amsterdam, Berlin, Tokyo, Washington: Press. – 2009. – P. 2366 – 2369.
4. Сахаров В.О. Модель деформування водонасичених ґрунтів основ при дії сейсмічних та довготривалих динамічних навантажень / В.А. Сахаров // Основи та фундаменти. Міжвід. наук.-техн. зб. КНУБА, 2013. – Вип. 33. – С. 47 – 57.
 5. Бойко І.П. Особливості визначення механічних характеристик ґрунтів / І.П.Бойко, О.О.Арешкович // Основи та фундаменти: міжвід. наук.-техн. зб. – Вип. 32. – К.: КНУБА, 2011. – С. 20 – 26.
 6. Zotsenko M. Evaluation of Failure Probability of Soil Cushions / M.Zotsenko, Y.Vynnykov, M.Kharchenko // Geotechnical Safety and Risk: Proc. of the 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR 2011). – Germany: Munich. – 2011. – P. 249 – 257.
 7. Винников Ю.Л. Імовірнісні методи в геотехніці / Ю.Л.Винников, М.О.Харченко // Зб. наук. праць (галузеве машинобуд., буд-во) / Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. Вип. 1 (43). – Полтава: ПолтНТУ, 2015. – С. 93 – 111.
 8. Kim T. Relationship between cohesion and tensile strength in wet sand at low normal stresses / T.Kim, J.Nam, J.Yun // Proc. of 17th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Olexandria, 2009. – Amsterdam, Berlin, Tokyo, Washington: Press. – 2009. – P. 364 – 367.
 9. Винников Ю.Л. Шляхи підвищення ефективності геотехнічного супроводження зведення піщаних подушок / Ю.Л.Винников, Р.М.Лопан // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. Вип. 23. – Рівне: НУВГП, 2012. – С. 548 – 554.

Винников Ю.Л., д-р. техн. наук, професор, Харченко М.А., канд. техн. наук, доцент, Лопан Р.Н., канд. техн. наук, доцент

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

Манжалий С.Н., головний інженер

Управление капитального строительства ООО «Vorokla Steel»

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИСКУССТВЕННЫХ ОСНОВАНИЙ ИЗ ВСКРЫШНЫХ МАЛОСВЯЗНЫХ ГРУНТОВ

АННОТАЦИЯ: На базе натурных исследований влияния изменчивости технологических факторов возведения подушек из

вскрышних песков, в т.ч. с течением времени, представлены примеры реализации моделей вероятностного описания распределения случайных величин строительных свойств уплотненных грунтов и ряда технологических параметров. Установлена взаимосвязь между физическими и механическими свойствами уплотненных вскрышных песков подушек с учетом влияния параметров их укатывания. Обосновано повышение качества проектирования геомассивов из вскрышных песков путем совершенствования геоинформационных технологий.

Ключевые слова: ВСКРЫШНОЙ ПЕСОК, ПОДУШКА, УКАТЫВАНИЕ, УГОЛ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ, УДЕЛЬНОЕ СЦЕПЛЕНИЕ, МОДУЛЬ ДЕФОРМАЦИИ, УДЕЛЬНЫЙ ОБЪЕМ СКЕЛЕТА ГРУНТА, ВЗАИМОСВЯЗЬ, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.

Vynnykov Y.L., Dr.Sci. Tech, Professor, Kharchenko M.O., PhD., assistant professor, Lopan R.M., PhD., assistant professor

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

Manzhaliy S.M., Chief Engineer

Capital Construction Board TOV «Vorskla Steel»

GEOTECHNICAL PROPERTIES OF FOUNDATIONS FROM OVERBURDEN LOW-COHESIVE SOILS

ABSTRACT: This paper discuss typical mathematical probabilistic models, which are necessary to represent random variables of the physical and mechanical characteristics of the compacted soils and range of technological parameters. Such models have been developed on the base of the field investigations of the overburden sands embankments erecting technological factors. Relation between the physical and mechanical properties of compacted overburden sand in the embankment with the influence of rolling parameters have been determined. Development of the geoinformation technologies leads to increasing of the design quality of the soil massive from the overburden sands.

Keywords: OVERBURDEN SAND, CUSHION, ROLLING, INTERNAL FRICTION ANGLE, UNIT COHESION, DEFORMATION MODULUS, SPECIFIC VOLUME OF THE SOIL DRY DENSITY, INTERACTION, FINITE ELEMENT METHOD.

Стаття надійшла до редакції 08.10.2015.