

Ю.Л. Винников, д.т.н., професор, Р.М. Лопан, асистент

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

РІВНЯННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ФІЗИЧНИМИ ТА МЕХАНІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ УЩІЛЬНЕНИХ РОЗКРИВНИХ МАЛОЗВ'ЯЗНИХ ҐРУНТІВ З УРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ ЇХ УКОЧУВАННЯ

Запропоновано нові номограми та рівняння взаємозв'язку між фізичними властивостями і механічними характеристиками ущільнених малозв'язних розкривних порід для проектування піщаних подушок.

Ключові слова: *піщана подушка, питомий об'єм скелета ґрунту, кут внутрішнього тертя, питоме зчеплення, модуль деформації.*

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими практичними завданнями. Доведено економічну й екологічну доцільність використання відходів гірничо-збагачувальних виробництв як матеріалу основ, але геотехнічні аспекти застосування розкривних малозв'язних порід у подушках вивчені недостатньо [1, 2]. Недолік норм з проектування та зведення подушок – відсутність вимог щодо визначення механічних властивостей ущільнених ґрунтів [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання проблеми. При проектуванні великої кількості об'єктів в умовах відносно однакових нашарувань ґрунту (матеріалу подушок) існує певний досвід розроблення таблиць значень модуля деформації E , кута внутрішнього тертя φ , питомого зчеплення c для ґрунтів певного регіону. Їх складають для пісків залежно від гранулометричного складу та коефіцієнта пористості ґрунту, а для глинистих ґрунтів – залежно від їх назв, показника текучості I_L й коефіцієнта пористості e . Збільшення e ґрунту при інших рівних умовах обов'язково викликає зниження його міцності та підвищення деформативності. Відповідно зростання вологості w чи I_L глинистого ґрунту обумовлює той же результат.

Певні залежності механічних характеристик ґрунтів від технологічних параметрів зведення подушок досліджувалися лише для зв'язних ґрунтів [1, 4 – 7] та їх сумішей [8]. Установлення взаємозв'язку між фізичними і механічними властивостями ґрунтів опрацьовано науковою школою В.Ф. Разорьонова [1, 4, 7 – 9]. Умовою встановлення взаємозв'язку між показниками фізичного стану ґрунтів та їх механічними властивостями є накопичування результатів випробувань для визначення перелічених характеристик ґрунтів. Коефіцієнти рівнянь взаємозв'язку визначають способом найменших квадратів із розрахунком необхідних статистичних даних (коефіцієнтів кореляції, варіації, похибок вимірів).

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття. Отже, між механічними та фізичними властивостями ущільнених ґрунтів можливі кореляційні залежності, які для малозв'язних розкривних порід майже не досліджено [10]. Вплив технології уочування на ці залежності поки також невідомий.

З урахуванням вищесказаного за **мету роботи** прийнято встановлення взаємозв'язку фізичних і механічних характеристик ущільнених розкривних малозв'язних ґрунтів подушок з параметрами їх уочування.

Виклад основного матеріалу дослідження. У підсумку комплексних польових і лабораторних досліджень [10] за нормативними методами [11] властивостей ущільнених малозв'язних розкривних порід Лавриковського і Єристовського родовищ у межах подушок загальною площею 190 га під електрометалургійний завод поблизу м. Комсомольськ Полтавської області отримано статистично обґрунтований для встановлення взаємозв'язку між фізичними і механічними характеристиками цих

ґрунтів з урахуванням впливу параметрів укочування об'єм визначень ($n = 550$) ґрунтових характеристик (гранулометричний склад, w , ρ_d , E , φ , c) і технологічних параметрів укочування (товщина відсипаних шарів породи h , зниження їх поверхні під котком Δh , статичний чи вібраційний режим роботи котків Vibromax VM132 (масою 14 т), НАММ 3516 (15,8 т), ATLAS 1140 (14 т), ДУ-16 (22 т)), зокрема:

– для піску мілкового, однорідного: вологості w та щільності скелета ґрунту ρ_d $n = 314$; 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 , ρ_d , а також E – $n = 61$;

– кількість дослідних замірів проходів котка за одним слідом (Δh) $n = 45$;

– кількість дослідних замірів товщини (h) відсипаних шарів $n = 45$.

Для кожного типу розкритих порід (пісок мілкий, однорідний; суміш піску мілкового, однорідного, із супіском пилюватим, пластичним; пісок середньої крупності, однорідний) побудовано для чотирьох – семи малих інтервалів вологості у напівлогарифмічних координатах лінійні графіки залежності від питомого об'єму скелета ґрунту $1/\rho_d$:

– модуля деформації для чотирьох інтервалів тиску $\sigma = 0 \dots 0,05$; $0,05 \dots 0,1$; $0,1 \dots 0,2$; $0,2 \dots 0,3$ МПа – $\lg E = f(1/\rho_d)$ (рис. 1 – 4);

– кута внутрішнього тертя $\lg \varphi = f(1/\rho_d)$ та питомого зчеплення $\lg c = f(1/\rho_d)$ (рис. 5 – 7).

Розглянемо лише кілька характерних прикладів цих залежностей. Так з рис. 1 добре видно, що при зменшенні питомого об'єму скелета ґрунту $1/\rho_d$ величина модуля деформації E зростає для всіх інтервалів вологості.

З графіків на рис. 2 чітко простежується така закономірність – при збільшенні інтервалу тиску в процесі компресійних випробувань σ від $0 - 0,05$ до $0,2 - 0,3$ МПа значення модуля деформації ґрунту лінійно зростає для кожного виду піску при постійній величині його вологості.

З рис. 3 можливі такі узагальнення: лінійні графіки $\lg E = f(1/\rho_d)$ близькі до паралельних; значення вологості суттєво на величину модуля деформації піску не впливає; децю більші його значення досягаються при вологості ґрунту, близькій до оптимальної, $w = w_{opt}$.

На рис. 4 наведено приклад графіка залежності $\lg E = f(1/\rho_d)$ при укочуванні шарів подушки різними механізмами. З нього видно, що не залежно від режиму та маси котків величина модуля деформації лінійно зростає при зменшенні питомого об'єму скелета ґрунту.

Загальне рівняння лінійної залежності модуля деформації E від питомого об'єму скелета ґрунту $1/\rho_d$ має вигляд

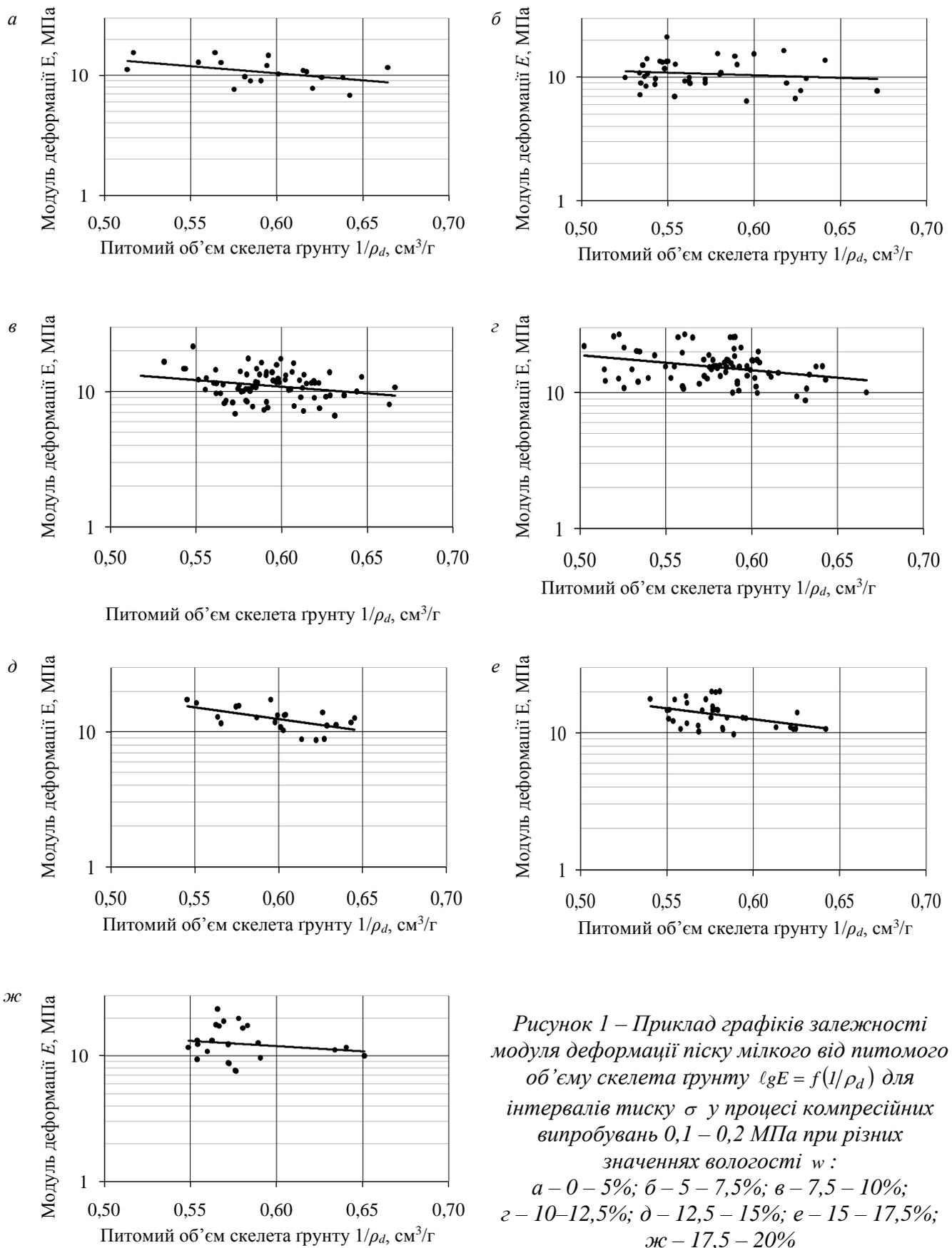
$$\lg(E/E_0) = A_E - B_E \cdot (1/\rho_d), \quad (1)$$

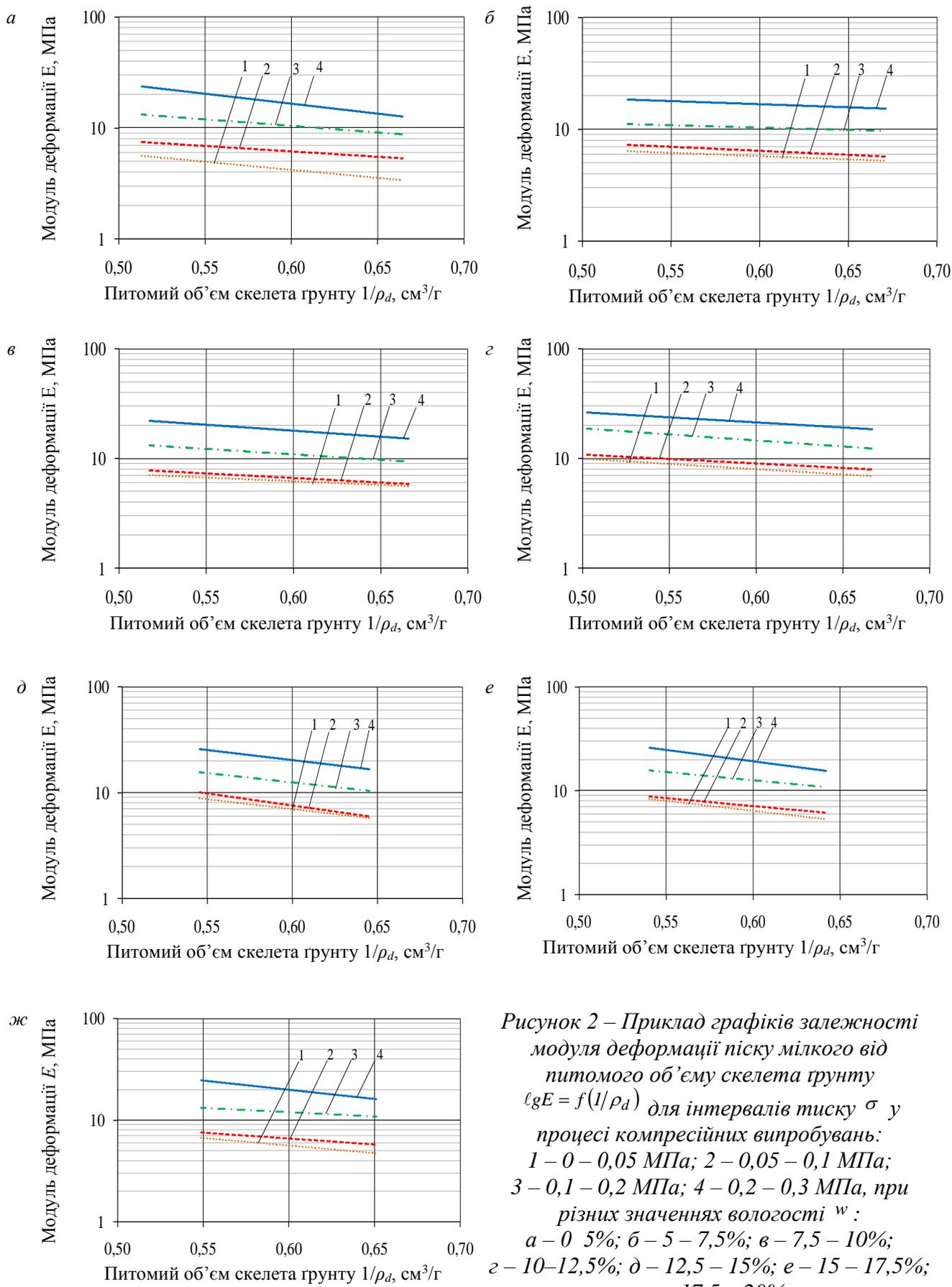
де $E_0 = 1$ МПа; A_E , B_E – емпіричні коефіцієнти рівняння взаємозв'язку.

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

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

У табл. 1 зведені коефіцієнти виразів (1) і (2) для всіх досліджень.





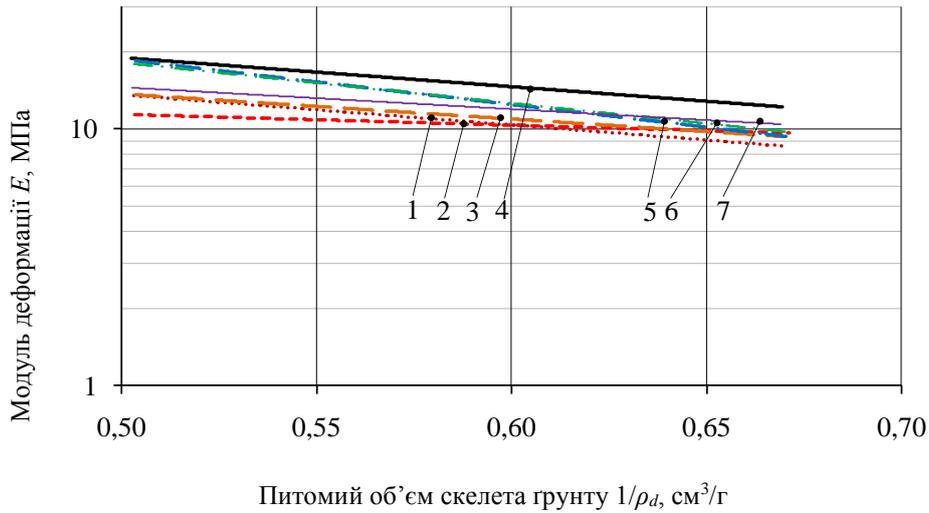
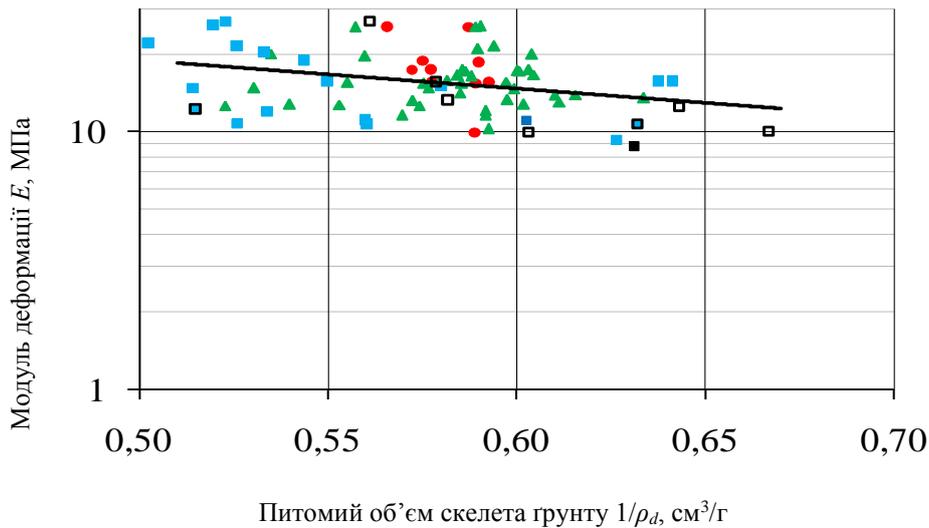


Рисунок 3 – Приклад графіків залежності модуля деформації піску мілкого від питомого об'єму скелета ґрунту $\lg E = f(1/\rho_d)$ у процесі компресійних випробувань в інтервалі тиску $\sigma = 0,1 - 0,2$ МПа при різних значеннях вологості w : 1 – 0 – 5%; 2 – 5 – 7,5%; 3 – 7,5 – 10%; 4 – 10 – 12,5%; 5 – 12,5 – 15%; 6 – 15 – 17,5%; 7 – 17,5 – 20%



Умовні позначення: ■ – коток НАММ 3520, п'ять проходів у вібраційному режимі; ■ – коток НАММ 3520, шість проходів у вібраційному режимі; ■ – коток НАММ 3520, дванадцять проходів у вібраційному режимі; □ – коток НАММ 3520, чотири проходи; ■ – котки НАММ 3520, шість проходів у вібраційному режимі та ДУ-16, чотири проходи; ● – коток АТЛАС 1140, вісім проходів у вібраційному режимі; ▲ – коток Vibromax VM132, чотири проходи у вібраційному режимі

Рисунок 4 – Приклад графіків залежності модуля деформації піску мілкого від питомого об'єму скелета ґрунту $\lg E = f(1/\rho_d)$ при уочуванні різними механізмами за вологості $w = 10 \div 12,5$ % (у процесі компресійних випробувань) для інтервалу тиску $\sigma = 0,1 - 0,2$ Мпа

Таблиця 1 – Коефіцієнти рівнянь взаємозв'язку модуля деформації ґрунту та питомого об'єму скелета ґрунту
 $\lg(E/E_0) = A_E - B_E \cdot (1/\rho)$, коефіцієнта A_E й вертикального тиску $A_E = A_{E,0} + A_{E,1} \cdot \sigma$

Вологість ґрунту w, %	Коефіцієнти A_E та B_E при різних інтервалах тиску σ										Коефіцієнти $A_{E,0}$ й $A_{E,1}$						
	0 – 0,05 МПа		0,05 – 0,1 МПа		0,1 – 0,2 МПа		0,2 – 0,3 МПа		\bar{B}_E		$A_{E,0}$	$A_{E,1}$	r				
	A_E	B_E	A_E	B_E	A_E	B_E	A_E	B_E	ν	ν	ν	ν	r				
пісок мілкий																	
0 – 5	1,490	1,447	0,220	1,358	0,951	0,175	1,727	1,184	0,095	2,282	1,773	0,081	1,339	1,229	3,879	0,206	0,930
5 – 7,5	1,109	0,582	0,161	1,245	0,730	0,164	1,265	0,417	0,113	1,558	0,553	0,088	0,571	1,062	1,851	0,127	0,959
7,5 – 10	1,199	0,679	0,119	1,318	0,830	0,127	1,629	0,987	0,102	1,902	1,084	0,076	0,895	1,109	3,233	0,182	0,995
10 – 12,5	1,474	0,954	0,147	1,433	0,795	0,099	1,839	1,124	0,099	1,893	0,941	0,075	0,954	1,383	2,210	0,125	0,902
12,5 – 15	1,933	1,815	0,127	2,247	2,282	0,148	2,151	1,760	0,079	2,458	1,917	0,078	1,944	1,956	1,926	0,086	0,865
15 – 17,5	1,955	1,913	0,159	1,770	1,533	0,097	2,040	1,566	0,081	2,591	2,178	0,078	1,798	1,693	3,160	0,146	0,876
17,5 – 20	1,661	1,518	0,178	1,502	1,138	0,140	1,580	0,837	0,120	2,369	1,783	0,109	1,319	1,367	3,284	0,195	0,805
пісок мілкий з домішками супіску																	
≈ 5	1,710	1,684	0,107	1,821	1,722	0,080	2,023	1,814	0,071	2,046	1,478	0,035	1,675	1,707	1,540	0,074	0,930
≈ 10	1,749	1,718	0,174	1,897	1,835	0,146	1,942	1,553	0,101	1,984	1,287	0,079	1,598	1,776	0,932	0,047	0,891
≈ 15	1,900	1,941	0,174	2,245	2,440	0,230	2,469	2,376	0,120	2,526	2,160	0,097	2,229	1,957	2,616	0,108	0,902
пісок середньої крупності																	
≈ 5	1,152	0,526	0,096	1,328	0,771	0,140	1,570	0,824	0,095	1,749	0,850	0,085	0,743	1,118	2,653	0,157	0,987
$\approx 7,5$	1,876	1,792	0,093	1,923	1,641	0,103	1,962	1,557	0,066	2,162	1,488	0,060	1,620	1,826	1,236	0,055	0,962
≈ 10	2,155	2,155	0,090	2,835	3,119	0,116	2,344	2,110	0,102	2,709	2,418	0,096	2,451	2,336	1,390	0,109	0,931
≈ 15	1,430	1,076	0,134	1,376	0,925	0,046	1,790	1,104	0,046	1,883	0,888	0,033	0,998	1,322	2,376	0,136	0,915

ν – коефіцієнт варіації;
 r – коефіцієнт кореляції

З лінійних графіків $\lg \varphi = f(1/\rho_d)$ і $\lg c = f(1/\rho_d)$ (рис. 5 – 7) видно, що залежності кута внутрішнього тертя та питомого зчеплення піску від питомого об'єму скелета ґрунту в цілому аналогічні до залежностей модуля деформації від питомого об'єму скелета ґрунту $\lg E = f(1/\rho_d)$. Параметри котків суттєво не впливають на характер цих залежностей.

Загальні рівняння лінійної залежності характеристик міцності від питомого об'єму скелета 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 взаємозв'язку $\lg \varphi = f(1/\rho_d)$ та $\lg c = f(1/\rho_d)$, що разом зі статистичними показниками цих виразів зведені до табл. 2.

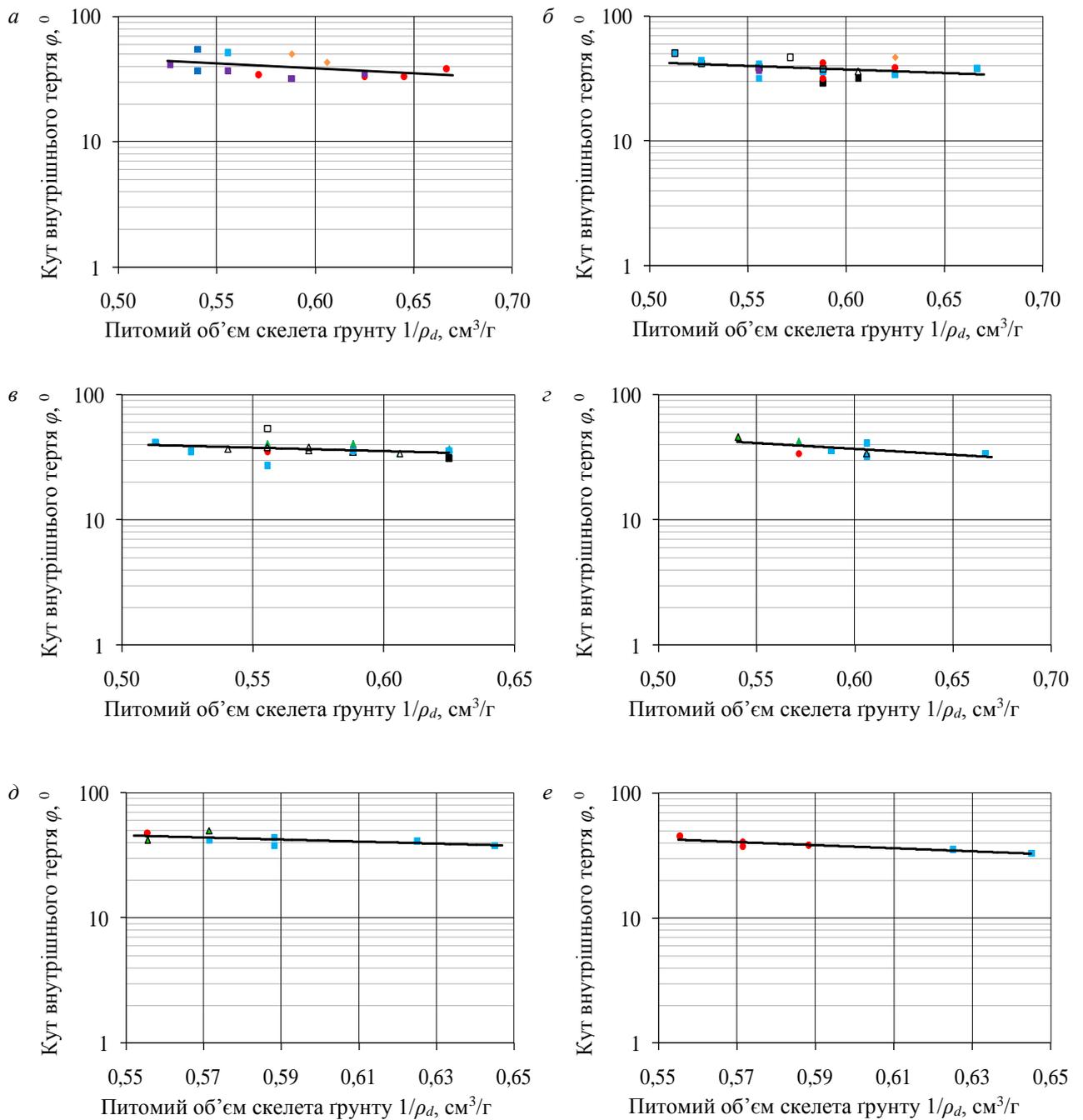
Таблиця 2 – Коефіцієнти рівнянь взаємозв'язку кута внутрішнього тертя ґрунту та питомого об'єму скелета ґрунту $\lg(\varphi/\varphi_0) = A_\varphi - B_\varphi \cdot (1/\rho_d)$, питомого зчеплення й питомого об'єму скелета ґрунту $\lg(c/c_0) = A_c - B_c \cdot (1/\rho_d)$

Вологість ґрунту w , %	Коефіцієнти для різних типів ґрунту					
	A_φ	B_φ	ν	A_c	B_c	ν
пісок мілкий						
5 – 7,5	2,051	0,777	0,047	3,726	4,406	0,169
7,5 – 10	2,209	1,111	0,040	3,356	4,093	0,139
10 – 12,5	1,912	0,607	0,035	4,362	5,458	0,181
12,5 – 15	2,125	0,932	0,034	4,005	4,781	0,159
15 – 17,5	2,458	1,255	0,025	4,207	4,957	0,133
17,5 – 20	2,289	1,200	0,027	4,078	4,785	0,143
пісок мілкий з домішками супіску						
5 – 7,5	2,254	1,189	0,039	2,484	1,992	0,042
7,5 – 10	1,993	0,832	0,013	2,647	2,220	0,057
10 – 12,5	2,046	0,783	0,058	2,493	1,865	0,063
12,5 – 15	2,225	1,067	0,047	2,480	1,800	0,080

ν – коефіцієнт варіації

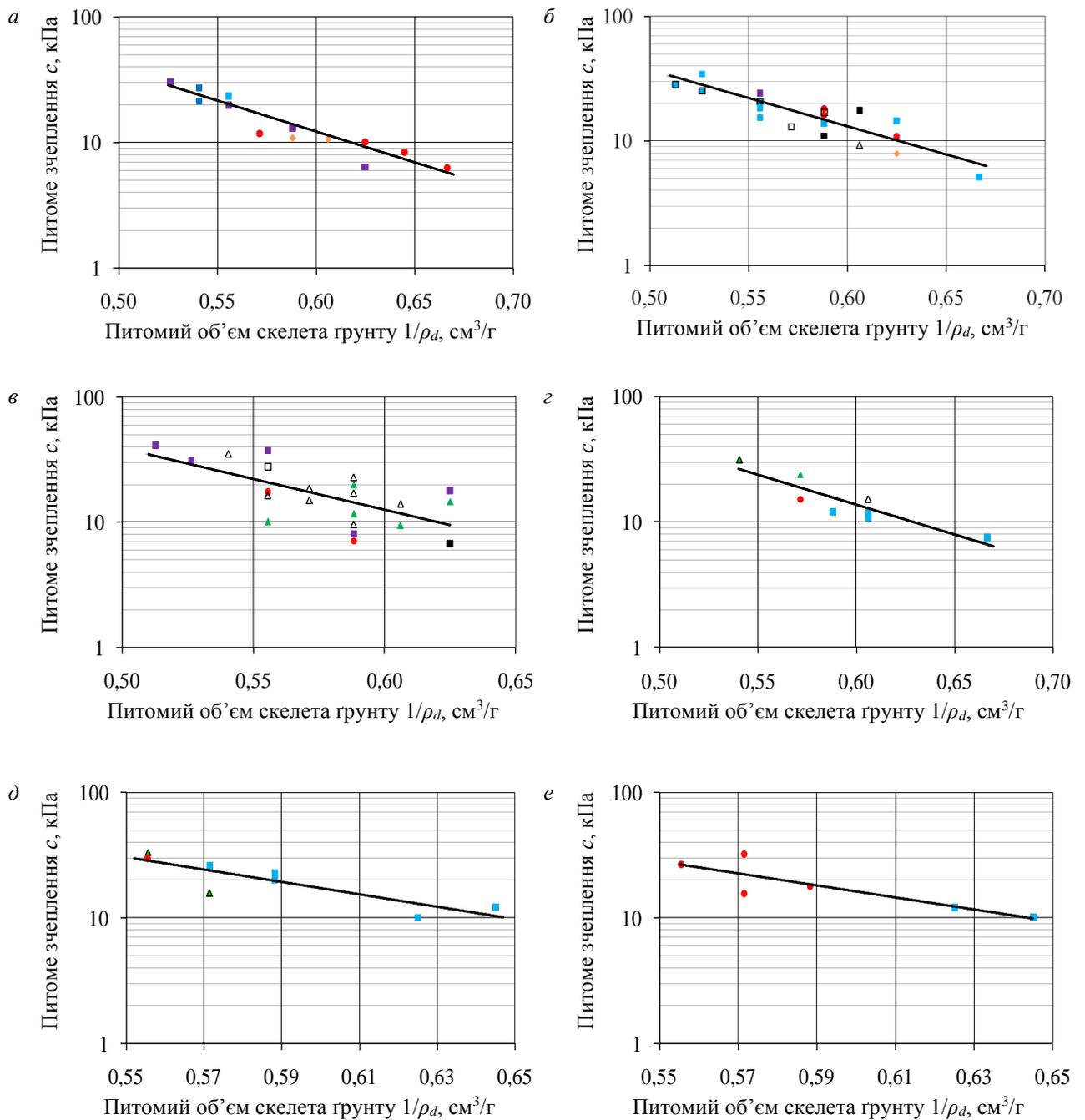
Слід зауважити, що значення коефіцієнтів варіації практично для всіх рівнянь взаємозв'язку не перевищують $\nu = 0,20$, а коефіцієнтів кореляції більші за $r = 0,85$, що свідчить про достатню коректність цих виразів.

Таким чином, за отриманими авторами новими дослідними даними геотехнічних властивостей ущільнених укочуванням малозв'язних розкривних порід у складі подушок можна зробити **висновки**:



Умовні позначення: ■ – коток НАММ 3520, дванадцять проходів у вібраційному режимі; ■ – коток НАММ 3520, вісім проходів у вібраційному режимі; ■ – коток НАММ 3520, шість проходів у вібраційному режимі; ■ – коток НАММ 3520, п'ять проходів у вібраційному режимі; □ – коток НАММ 3520, чотири проходи; ■ – котки НАММ 3520, шість проходів у вібраційному режимі та ДУ-16, чотири проходи; ● – коток ATLAS 1140, вісім проходів у вібраційному режимі; ▲ – коток Vibromax VM132, чотири проходи у вібраційному режимі; ▲ – коток Vibromax VM132, чотири проходи; ▲ – котки Vibromax VM132, шість проходів та ДУ-16, чотири проходи; ◆ – коток ДУ-16, чотири проходи

Рисунок 5 – Графіки залежності кута внутрішнього тертя піску мілкокого від питомого об'єму скелета ґрунту $\lg \varphi = f(1/\rho_d)$ при укочуванні різними механізмами (в процесі випробувань на одноплосинне зрушення) за різних значень вологості w : а – 5 – 7,5%; б – 7,5 – 10%; в – 10 – 12,5%; г – 12,5 – 15%; д – 15 – 17,5%; е – 17,5 – 20%



Умовні позначення: ■ – коток НАММ 3520, дванадцять проходів у вібраційному режимі; ■ – коток НАММ 3520, вісім проходів у вібраційному режимі; ■ – коток НАММ 3520, шість проходів у вібраційному режимі; ■ – коток НАММ 3520, п'ять проходів у вібраційному режимі; □ – коток НАММ 3520, чотири проходи; ■ – котки НАММ 3520, шість проходів у вібраційному режимі та ДУ-16, чотири проходи; ● – коток ATLAS 1140, вісім проходів у вібраційному режимі; ▲ – коток Vibromax VM132, чотири проходи у вібраційному режимі; ▲ – коток Vibromax VM132, чотири проходи; ▲ – котки Vibromax VM132, шість проходів та ДУ-16, чотири проходи; ◆ – коток ДУ-16, чотири проходи

Рисунок 6 – Графіки залежності питомого зчеплення піску мілкового від питомого об'єму скелета ґрунту $\lg c = f(1/\rho_d)$ при укочуванні різними механізмами (в процесі випробувань на одноплосинне зрушення) за різних значень вологості w : а – 5 – 7,5%; б – 7,5 – 10%; в – 10 – 12,5%; г – 12,5 – 15%; д – 15 – 17,5%; е – 17,5 – 20%

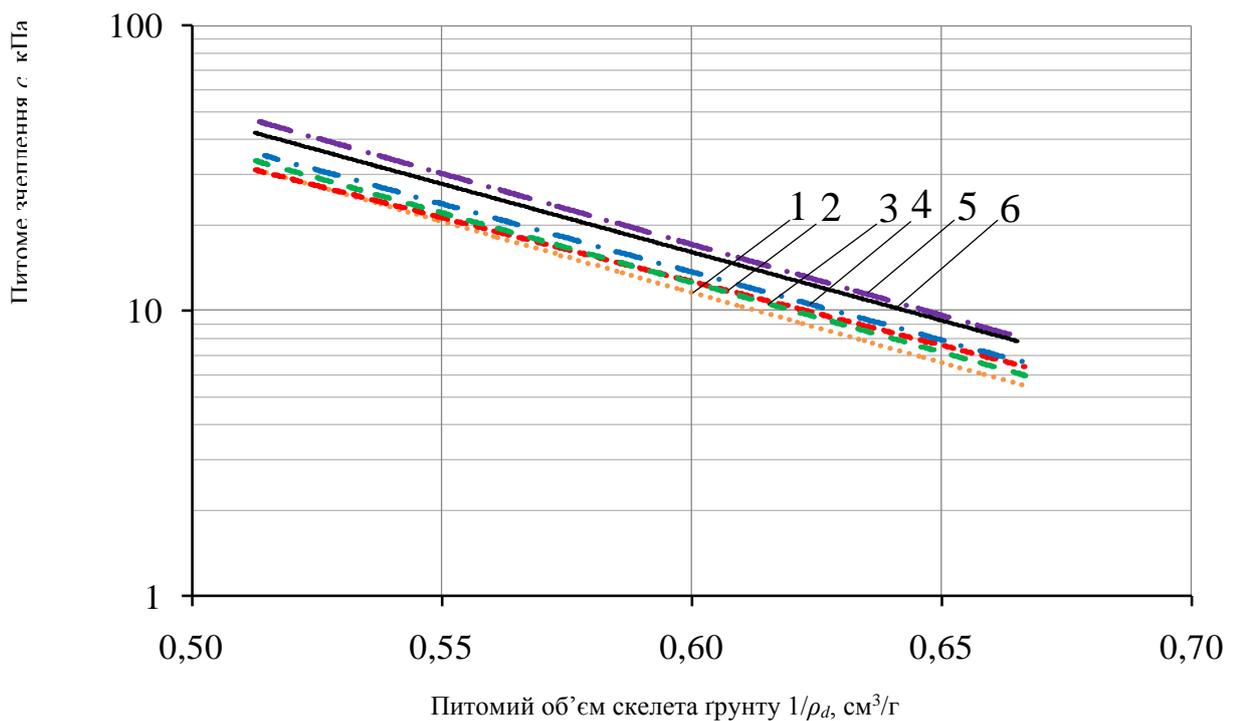
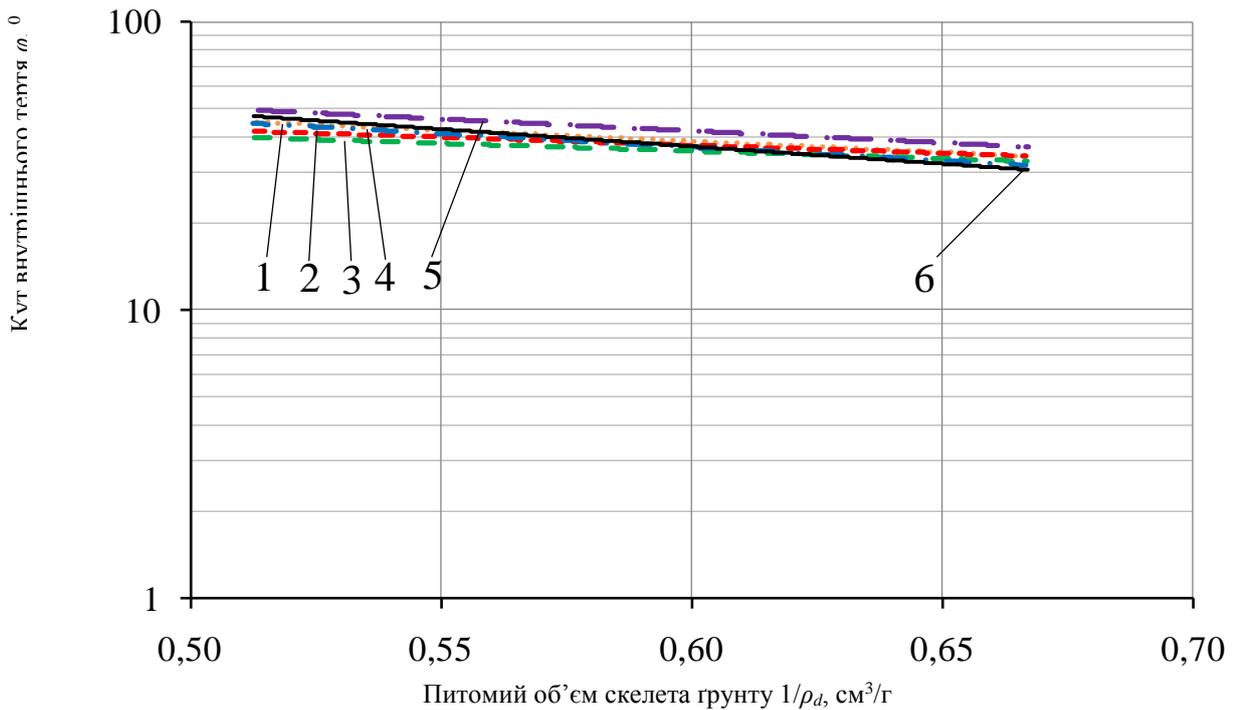


Рисунок 7 – Графіки залежності: а – кута внутрішнього тертя $lg\varphi = f(1/\rho_d)$; б – питомого зчеплення $lgc = f(1/\rho_d)$ піску мілкового від питомого об'єму скелета ґрунту при випробуваннях на одноплосинне зрушення при різних значеннях вологості w : 1 – 5 – 7,5%; 2 – 7,5 – 10%; 3 – 10 – 12,5%; 4 – 12,5 – 15%; 5 – 15 – 17,5%; 6 – 17,5 – 20%

1. Вперше встановлено номограми й рівняння взаємозв'язку модуля деформації та характеристик міцності ущільнених розкривних малозв'язних ґрунтів з їх фізичними властивостями з урахуванням впливу параметрів укочування.

2. У напівлогарифмічних координатах графіки залежності модуля деформації, кута внутрішнього тертя та питомого зчеплення всіх типів дослідних розкривних

малозв'язних порід (пісок мілкий, однорідний; суміш піску мілкового, однорідного із супіском пилюватим, пластичним; пісок середньої крупності, однорідний) від питомого об'єму скелета ґрунту $lg E = f(1/\rho_d)$, $lg \varphi = f(1/\rho_d)$, $lg c = f(1/\rho_d)$ мають лінійний характер. При зменшенні питомого об'єму скелета ґрунту не залежно від режиму котка величини механічних властивостей ґрунту зростають.

3. При збільшенні інтервалу тиску від 0 – 0,05 до 0,2 – 0,3 МПа значення модуля деформації зростає для кожного виду піску.

Література

1. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти: підручник / [М.Л. Зоценко, В.І. Коваленко, А.В. Яковлев та ін.]. – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – 568 с.
2. 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 – Saint Petersburg: NPO «Georeconstruction – Fundamentproject», 2007. – 164 p.
3. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 104 с.
4. Коваленко, В.И. Исследования уплотняемости связных грунтов / В.И. Коваленко, В.Ф. Разоренов, В.Г. Хилобок. – Воронеж: ВГУ, 1981. – 196 с.
5. Mayne, P.W. Geomaterial behavior and testing / P.W. Mayne, M.R. Coop, S.M. Springman // Proc. of 17th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Olexandria, 2009. – Amsterdam, Berlin, Tokyo, Washington: JOS Press. – 2009. – P. 2777 – 2872.
6. Kim, T.H. Relationship between cohesion and tensile strength in wet sand at low normal stresses / T.H. Kim, J.M. Nam, J.M. Yun // Proc. of 17th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Olexandria, 2009. – Amsterdam, Berlin, Tokyo, Washington: JOS Press. – 2009. – P. 364 – 367.
7. Разоренов, В.Ф. Пенетрационные испытания грунтов / В.Ф. Разоренов. – М.: Стройиздат, 1980. – 248 с.
8. Зоценко, М.Л. Використання «хвостів» Полтавського ГЗК при влаштуванні земляних споруд / М.Л. Зоценко // Світ геотехніки. – 2005. – № 4. – С. 7 – 11.
9. Zotsenko, M. Modern practice of determination of strength characteristics of cohesive soils by penetration methods / M. Zotsenko, Y. Vynnykov, A. Yakovlev // Proc. of XIVth Danube – European Conf. on Geotechnical Engineering. – Bratislava: Slovak University of Technology. – 2010. – P. 245 – 253.
10. Лопан, Р.М. Зв'язок між фізичними та механічними характеристиками ущільнених розкритих порід / Р.М. Лопан // Будівельні конструкції: міжвід. наук.-техн. зб. – К.: НДІБК, 2011. – Вип. 75. – Кн. 2. – С. 648 – 655.
11. ДСТУ Б В.2.1-4-96. Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформативності. – К.: Державний комітет України у справах містобудування й архітектури, 1997. – 101 с.

Надійшла до редакції 08.12. 2011

© Ю.Л. Винников, Р.М. Лопан

Ю.Л. Винников, д.т.н., проф., Р.М. Лопан, асистент

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

УРАВНЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ФИЗИЧЕСКИМИ И МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ УПЛОТНЕННЫХ ВСКРЫШНЫХ МАЛОСВЯЗНЫХ ГРУНТОВ С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ ИХ УКАТЫВАНИЯ

Предложены новые номограммы и уравнения взаимосвязи между физическими свойствами и механическими характеристиками уплотненных малосвязных вскрышных пород для проектирования песчаных подушек.

Ключевые слова: песчаная подушка, удельный объем скелета ґрунта, угол внутреннего трения, удельное сцепление, модуль деформации.

Y.L. Vynnykov, Prof., DrSc., R.M. Lopan, assistant

Poltava National Technical University named in honor of Yuri Kondratyuk

**EQUATIONS OF RELATION BETWEEN PHYSICAL AND
MECHANICAL CHARACTERISTICS OF COMPACTED LITTLE
OVERBURDEN WITH CALCULATION OF ROLLING PARAMETERS**

New nomographs and equations of relation between physical properties and mechanical characteristics of compacted little overburden for design of sand cushion are proposed.

Key words: *sand cushion, specific volume dry soils, corner of internal friction, unit cohesion, modulus of deformation.*