

*С.В. Біда, к.т.н., доцент, Ю.Л. Винников, д.т.н., проф.*

*Т.В. Литвиненко, асистент*

*Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

*П.М. Омельченко, к.т.н.*

*Підприємство з дослідження, проектування та будівництва ефективних фундаментів «ЕКФА», Полтава*

## **АНАЛІЗ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ПИТОМОГО ОБ'ЄМУ СКЕЛЕТА ГРУНТУ ТА ВОЛОГОСТІ З ПИТОМИМ ОПОРОМ СТАТИЧНОЇ ТА ДИНАМІЧНОЇ ПЕНЕТРАЦІЇ**

*Наведено результати випробувань ґрунтів статичною та динамічною пенетрацією. Установлено взаємозв'язок між показниками фізичного стану ґрунту і питомим опором статичної та динамічної пенетрації.*

**Ключові слова:** *статична пенетрація, динамічна пенетрація, питомий об'єм скелета ґрунту, вологість, контроль ущільнення ґрунту.*

*С.В. Беда, к.т.н., доцент, Ю.Л. Винников, д.т.н., проф.*

*Т.В. Литвиненко, асистент*

*Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

*П.М. Омельченко, к.т.н.*

*Предприятие по исследованию, проектированию и строительству эффективных фундаментов «ЕКФА», Полтава*

## **АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ УДЕЛЬНОГО ОБЪЕМА СКЕЛЕТА ГРУНТА И ВЛАЖНОСТИ С УДЕЛЬНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЕНЕТРАЦИИ**

*Приведены результаты испытаний ґрунтов статической и динамической пенетрацией. Установлена взаимосвязь между показателями физического состояния ґрунта и удельным сопротивлением статической и динамической пенетрации.*

**Ключевые слова:** *статическая пенетрация, динамическая пенетрация, удельный объем скелета ґрунта, влажность, контроль уплотнения ґрунта.*

*S.V. Bida, Ph.D., Y.L. Vynnykov, Prof., DrSc.*

*T.V. Lytvynenko, assistant*

*Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*

*P.M. Omelchenko, Dr-Ing*

*The company of the research, design and construction of efficient foundations «EKFA» in Poltava*

## **ANALYSIS OF INTERRELATION OF THE SPECIFIC VOLUME OF THE SOIL SKELETON AND HUMIDITY WITH A RESISTIVITY OF STATIC AND DYNAMIC PENETRATION**

*The results of soil tests of static and dynamic penetration are presented. The interrelation between the indicators of physical soil condition and the resistivity of static and dynamic penetration is installed.*

**Keywords:** *static penetration, dynamic penetration, specific volume of the soil, humidity, control of soil compaction.*

**Вступ.** Розвиток технологій зі створення штучних основ і земляних споруд (насипи, дамби тощо), особливо за рахунок ущільнення ґрунтів, у т.ч.

динамічним навантаженням [1–4], потребує відповідного забезпечення контролю за якістю ущільнення ґрунту. З аналізу досліджень у галузі геотехніки можна зробити висновок, що методики дослідження властивостей ґрунтів постійно вдосконалюються. Одним із найбільш актуальних напрямів є контроль властивостей ґрунтів за допомогою пенетрації. Ефективним способом для нормування механічних властивостей ґрунтів і оперативного контролю якості їх ущільнення є встановлення графіків взаємозв'язку фізичних і механічних властивостей ґрунтів [5].

**Огляд останніх джерел досліджень і публікацій.** Для використання пенетраційного методу контролю якості ущільнення ґрунтів проводять пенетраційні випробування при різній вологості й будують номограму взаємозв'язку між питомим об'ємом скелета ґрунту  $1/\rho_d$ , вологістю  $W$  та питомим опором пенетрації  $R$ . У процесі виконання робіт знаходять значення питомого об'єму скелета ґрунту  $1/\rho_d$  і при відомому значенні вологості визначають величину питомого опору пенетрації  $R_c$ , яке повинне бути досягнуто в кінці ущільнення [6–8]. Після проектної кількості проходів котка виконують пенетраційні випробування, знаходять питомий опір пенетрації  $R$  та роблять висновок про можливість відсипання наступного шару (якщо  $R \geq R_c$ ) чи про необхідність додаткового ущільнення (якщо  $R < R_c$ ) [5, 6].

**Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми.** У зв'язку з тим, що статична пенетрація й відомі методи динамічного прикладання навантаження при випробуваннях ґрунту мають певні обмеження для достовірного вирішення питань, пов'язаних з дією на ґрунт динамічних впливів, доцільно вдосконалювати динамічний метод пенетрації та зіставляти його результати з даними статичної пенетрації. У ньому для визначення властивостей ґрунтів теж використовують конічний наконечник, але для його занурення прикладають ударне навантаження, що створюється скиданням вантажу з певної висоти.

**Постановка завдання.** Умовою встановлення взаємозв'язку [5, 8] між показниками фізичного стану ґрунту (природна вологість  $W$ , коефіцієнт пористості  $e_0$ , щільність скелета ґрунту  $\rho_d$ , питомий об'єм скелета ґрунту  $1/\rho_d$  тощо) й показниками механічних властивостей (питомий опір пенетрації  $R$ , кут внутрішнього тертя  $\varphi$ , питома зчеплення  $c$ , модуль деформації  $E$  та ін.) є накопичення результатів випробувань для визначення перелічених характеристик ґрунтів із відносно постійним числом пластичності й літологічно (генетично) однорідних. Визначення коефіцієнтів рівнянь взаємозв'язку за кожним масивом експериментальних даних звичайно виконують способом найменших квадратів із розрахунком значень необхідних статистичних даних (коефіцієнтів кореляції  $r$ , варіації  $v$  тощо).

Тому за мету обробки результатів лабораторних випробувань поставлено виявлення взаємозв'язку показників фізико-механічних

властивостей генетично однорідного, штучно ущільненого укочуванням зв'язного ґрунту із застосуванням методу пенетрації.

**Основний матеріал і результати.** У квітні–травні 2013 року автори спільно з фахівцями полтавського ТОВ «ЕКФА» виконали дослідження якості ущільнення ґрунту дорожнього насипу Хрестищенського ГКР у Красноградському р-ні Харківської обл. (рис.1 –4). Насип загальною товщиною близько 3 м улаштувався з місцевих суглинків важких пилуватих ( $I_p \approx 17\%$ ),  $W_p \approx 23\%$ ,  $W_L \approx 40\%$ ), які пошарово укочували за допомогою причіпного кулачкового котка та самохідного котка на пневматичних шинах НАММ HD150 при 10 – 12 їх проходів за одним слідом [9].

Якість ущільнення ґрунту постійно контролювали відповідно до реальних темпів зведення насипу й намагалися, щоб проміжок часу між відбором зразків і початком випробувань їх у лабораторії не перевищував однієї доби для оперативного внесення коректив у процес ущільнення. Так було здійснено комплексні лабораторні випробування зразків, до складу яких входило визначення показників фізичних властивостей ущільненого ґрунту (щільність скелета ґрунту  $\rho_d$ , природна вологість  $W$ , вологість на межі розкочування  $W_p$ , вологість на межі текучості  $W_L$ , число пластичності  $I_p$ , показник текучості  $I_L$ , оптимальна вологість  $W_{opt}$ ).

При пенетраційних випробуваннях (рис.4) використовували конічний наконечник з кутом при вершині  $\alpha=30^\circ$ . Завантаження його в лабораторному пенетрометрі ЛП-1 виконували ступенями різної величини залежно від фізичного стану ґрунту, переважно від 1 до 10 Н. Кількість ступенів навантаження визначалася глибиною занурення наконечника  $h \geq 10$  мм. Тривалість витримування кожного ступеня – 1 хв. Фіксація глибини занурення здійснювалася за індикатором годинникового типу з точністю до 0,01 мм. Обробку результатів пенетрації виконували, враховуючи відому властивість інваріантності показника пенетрації  $R$  від величини навантаження  $P$  та квадрату глибини занурення конуса  $h^2$  методом найменших квадратів за виразом  $R=(P \pm P_0)/h^2$  [7].



Рис. 1. Ущільнення шару ґрунту дорожнього насипу котком НАММ HD150



*Рис. 2. Зняття верхньої частини ґрунтового шару для відбору зразків ґрунту*



*Рис. 3. Відбір зразків ущільненого ґрунту методом ріжучих кілець*



**а**



**б**

*Рис. 4. Проведення penetрації: а – статичної; б – динамічної*

Показники penetрації оцінювали за коефіцієнтом лінійної кореляції  $r$  між параметрами  $R$  і  $h^2$ , значення якого для динамічної penetрації перевищувало 0,99, що свідчить про практично функціональний зв'язок цих показників.

У результаті було пропенетровано близько 100 зразків ущільненого ґрунту одного генетичного різновиду й встановлено взаємозв'язок між показниками його фізичних властивостей та опором penetрації, а також внесено пропозиції щодо суттєвого зменшення обсягів випробувань традиційними методами за рахунок запровадження penetраційних випробувань. Статистичні дані та обробка результатів експерименту наведено в табл. 1. Коефіцієнт кореляції при статичних penetраційних випробуваннях склав 0,958, а при випробуваннях динамічною penetрацією – 0,998.

За результатами табл. 1 побудовано номограми залежності питомого об'єму скелета ґрунту від питомого опору статичної (рис. 5) та динамічної (рис. 6) penetрації. З аналізу номограм (рис. 5, 6) бачимо, що при відомій вологості за результатами penetраційних випробувань легко визначати відповідну величину питомого об'єму скелета ґрунту. Візьмемо, наприклад, значення вологості за результатами динамічної penetрації  $W = 0,20$ , величину щільності скелета ґрунту  $\rho_d = 1,597$  г/см<sup>3</sup> ( $1/\rho_d = 0,626$  см<sup>3</sup>/г). Для значення  $1/\rho_d = 0,626$  см<sup>3</sup>/г величина достатнього питомого опору динамічної penetрації складає  $R = 82,30$  кг/см<sup>2</sup>. Це значення і є критерієм необхідного ущільнення ґрунту.

**Таблиця 1.** Загальна зведена таблиця обробки результатів експерименту

№ шару	№ кільця	Щільність скелета ґрунту $\rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	Вологість, %	Питомий опір статичної penetрації $R_{ст}$	Питомий опір динамічної penetрації $R_{дин}$	№ шару	№ кільця	Щільність скелета ґрунту $\rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	Вологість, %	Питомий опір статичної penetрації $R_{ст}$	Питомий опір динамічної penetрації $R_{дин}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	7	1,53	18,2	6,08	46,56	63	1,588	22,4		11,0	96,01	
					9,57						9,33	
					4,61						51,41	12,76
	8	1,568	21,2	5,30	49,40	6	1,664	20,4		7,74	60,44	
					7,84						8,91	
					4,49						43,42	7,00
	63+	1,568	21,2	3,84	51,78	3	1,632	22		7,34	61,51	
					11,17						9,41	
					5,15						55,13	7,09
	4	1,536	23,7	5,28	59,17	48	1,574	20,2		6,23	61,83	
					13,40						9,64	
					4,06						57,90	6,70
	45	1,547	23,6	7,25	58,69	12	1,619	18,9		5,32	33,37	
					12,91						7,33	
					4,20						60,44	3,97
						13,37						7,76

2	27	1,572	25,2	4,48	123,33	4	0	1,571	20,2	10,69	82,08		
					10,50						11,78		
				5,94	53,13					5,57	104,59		
	54	1,512	20,4	287,49	99,37		4	1,557	21,2	33,92	1274,98		
					15,40						20,95		
				166,76	50,59					10,24	425,92		
	5н	1,655	21,5	3,39	59,06		9	1,684	20,7	7,76	72,25		
					11,65						12,18		
				3,82	56,40					5,96	50,04		
	2	63	1,646	21,8	6,09		71,69	4	7	1,717	20,1	7,89	50,64
							10,63						9,78
					6,03		57,20					7,41	56,61
		5	1,618	22,3	6,85		55,56		3	1,672	20,6	42,66	1454,80
							9,65						25,39
					7,61		56,64					10,92	2385,68
		9	1,582	23,2	5,63		58,81		1	1,564	21,2	6,55	58,36
							10,39						8,92
					6,38		57,73					8,73	56,18
		0	1,503	27,3	6,51		41,35		63	1,695	20,4	41,09	715,96
							7,74						26,67
					6,29		45,44					50,25	1096,13
		42	1,596	21,8	5,98		63,26		6	1,674	21	7,33	88,93
							7,45						12,25
					5,93		53,07					5,90	87,20
					7,67						12,66		

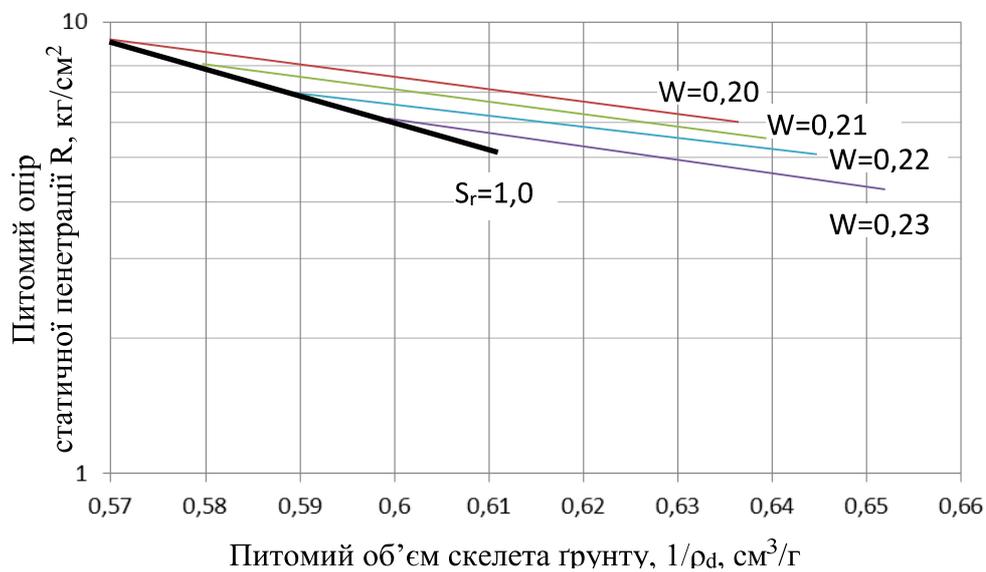


Рис. 5. Номограма статичної penetрації

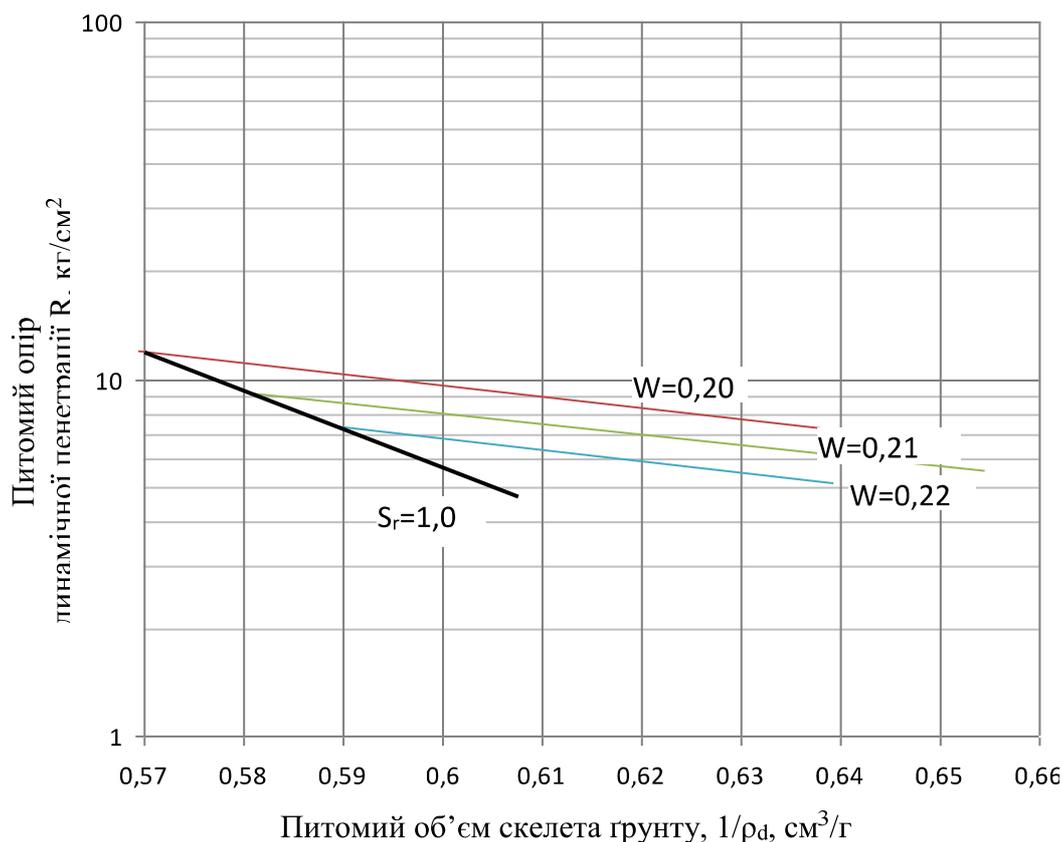


Рис. 6. Номограма динамічної penetрації

**Висновки.** Таким чином, результати комплексних випробувань генетично однорідного, штучно ущільненого зв'язного ґрунту підтвердили можливість виявлення взаємозв'язку між показниками фізичного стану ґрунту та питомим опором статичної та динамічної penetрації. Аналізуючи результати лабораторних випробувань ущільненого ґрунту статичною та динамічною penetрацією, зафіксували тенденцію до зменшення величини питомого опору penetрації зі збільшенням вологості та зростанням величини опору penetрації зі збільшенням щільності скелета ґрунту.

Застосування penetраційних випробувань з удосконаленою методикою обробки їх результатів дозволило одержати більш точний показник механічних властивостей зв'язного ґрунту  $R$ , що не залежить від особливостей проведення penetрації й тісно пов'язаний із параметрами фізичного стану ґрунту, котрі визначають традиційними методами. Точність обчислення показника penetрації забезпечується можливістю проведення великої кількості окремих випробувань і подальшого визначення його статистично обґрунтованої величини.

#### Література

1. Коваленко, В.І. Визначення опору ґрунтів динамічним навантаженням / В.І. Коваленко, М.О. Харченко, Ю.Л. Винников, Р.Г. Савенко, Т.В. Литвиненко, Я.В. Носаченко // Зб. наук. праць (галузеве машинобуд., буд-во) / Полтав. нац. техн.ун-т ім. Юрія Кондратюка. Вип. 2 (30). – Полтава: ПолтНТУ, 2011. – С. 180 – 184.

2. Rito, F. *Development and field application of static cone penetrometer combined with dynamic penetration* / F. Rito, N. Sugavara // *Proc. of the 17th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. – Alexandria, Egypt: JOS Press, 2009. – P. 969 – 972.
3. Qingyan, T. *Experimental Study of the Light Dynamic Penetration Method to Test Shallow Fill of Coarse-sand in Subsoil Engineering* / T. Qingyan, F. Helin // *Proc. of the 1st Intern. Symposium on Geotechnical Safety and Risk*. – China: Shanghai, 2007. – P. 217 – 226.
4. Lunne, T. *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice* / T. Lunne, P.K. Robertson, J.J. Powell. – London: Blackie Academic and Professional. – 1997. – 508 p.
5. Исследования уплотняемости связных грунтов. Коваленко В.И., Разоренов В.Ф., Хилобок В.Г. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1981. – 196 с.
6. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти: підручник / [М.Л. Зоценко, В.І. Коваленко, А.В. Яковлєв та ін.]. – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – 568 с.
7. Разоренов, В.Ф. *Пенетрационные испытания грунтов: (теория и практика применения)* / В.Ф. Разоренов. – М.: Стройиздат, 1980. – 248 с.
8. *Инженерная геология и механика грунтов. Основания и фундаменты: учеб. пособие* / В.Г. Хилобок, В.И. Коваленко. – К.: УМК ВО, 1989. – 148 с.
9. *Науково-технічний звіт про інженерно-геологічні вишукування на об'єкті: «Облаштування Хрещищенського ГКР. Реконструкція Хрещищенської ДКС»*. – К., 2011. – 26 с.

Надійшла до редакції 03.10.2013

© С.В. Біда, Ю.Л. Винников, Т.В. Литвиненко, П.М. Омельченко