

## **ДО ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОЦЕМЕНТУ**

*У роботі подані результати досліджень фізико-механічних характеристик ґрунтоцементу, виготовленого у лабораторних умовах. Особлива увага приділяється вивченню впливу часу та вмісту цементу на механічні властивості, а також визначенню структурної міцності (опору зрізу) ґрунтоцементу.*

***Ключові слова:** ґрунтоцемент, лесовий суглинок, міцність на стиск, опір зрізу, модуль деформації.*

*В работе представлены результаты исследования физико-механических характеристик ґрунтоцемента, изготовленного в лабораторных условиях. Особое внимание уделяется изучению влияния времени и содержания цемента на механические свойства, а также определению структурной прочности (сопротивления срезу) ґрунтоцемента.*

***Ключевые слова:** ґрунтоцемент, лессовый суглинок, прочность на сжатие, сопротивление срезу, модуль деформации.*

*The results of investigations of soil-cement physical and mechanical characteristics in laboratory conditions are presented in this article. The special attention is spared to study of time and cement factor influences on mechanical properties. The structural durability (shear strength) of the soil-cement is determined.*

***Key words:** soil-cement, loess loam, durability on a clench, shear strength, module of deformation.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими практичними завданнями.** Протягом останніх десяти років у практиці фундаментобудування та влаштування штучних основ досить часто використовують такий будівельний матеріал, як ґрунтоцемент. Шляхом цементації піщаних або глинистих ґрунтів завдяки струминній, струминно-змішувальній чи бурозмішувальній технологіям у масиві можна влаштовувати вертикальні, горизонтальні та похилі жорсткі ґрунтоцементні елементи (ГЦЕ). На території України, зокрема у Дніпропетровській, Запорізькій, Полтавській, Сумській та інших областях, для поліпшення слабких основ (особливо лесових просадочних ґрунтів) під фундаментами будівель і споруд, закріплення зсувонебезпечних схилів та укосів, улаштування протифільтраційних завіс, огороження бортів котлованів, виготовлення шпунтових стінок тощо використовують струминно-змішувальну та бурозмішувальну технології [1, 2]. Значною перевагою застосування ґрунтоцементних елементів є те, що найбільш сприятливим середовищем для їх улаштування є водонасичені ґрунти, у тому числі ті, що розташовані нижче рівня ґрунтових вод.

Різноманіття ґрунтів, процентний уміст цементу, гідрогеологічні умови, технологічні особливості – всі ці фактори створюють ускладнення при складанні нормативів із визначення узагальнених фізико-механічних характеристик ґрунтоцементу для конкретних ґрунтів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ґрунтоцемент являє собою складну багатофазну систему, яка містить ґрунт, що має полідисперсний та

полімінеральний склад, цемент, який з'єднує частинки ґрунту в моноліт, та за необхідності різні домішки [3].

Дослідження показують, що міцність ґрунтоцементу, як і бетону, зростає в часі й такий процес може тривати роками. Найбільш швидко зростання міцності спостерігається у початковий період. Підвищення температури й вологості середовища значно прискорює процес тужавіння ґрунтоцементу. При зберіганні ґрунтоцементу у воді спостерігається більш інтенсивне зростання міцності. Це свідчить про те, що найбільш сприятливим для тужавіння ґрунтоцементу слід вважати його знаходження у водонасичених ґрунтах. Міцність ґрунтоцементу, як і бетону, залежить від кількості цементу, фізико-механічних властивостей ґрунту (заповнювачів для бетону) та цементного каменю. Збільшення кількості цементу підвищує щільність ґрунтоцементу, у свою чергу збільшення щільності приводить до підвищення його міцності [3, 4].

На відміну від бетону, на механічні властивості ґрунтоцементу суттєво впливає хімічний склад ґрунту. Норми [5] вимагають на кожному будівельному майданчику проводити експериментальні дослідження фізико-механічних характеристик ґрунтоцементу та підсилених ним основ, які виконують у лабораторних умовах на зразках, відібраних із влаштованих ГЦЕ, або шляхом проведення польових випробувань.

**Виділення не розв'язаних раніше частин проблеми, котрим присвячується стаття.** Оскільки в існуючих нормативних документах відсутній розрахунок основ, підсилених ґрунтоцементними елементами, виникає необхідність детального вивчення характеристик ґрунтоцементу.

Тому ми поставили за **мету** дослідити такі фізико-механічні характеристики ґрунтоцементу: щільність, щільність скелета, вологість, міцність на одновісний стиск, міцність на зріз та модуль деформації; також вивчити вплив умісту цементу на фізико-механічні характеристики ґрунтоцементу. Для досліджень був вибраний суглинок пілуватий лесовий, легкий, просадочний, високопористий, приурочений до першого горизонту, із числом пластичності  $I_p = 0,09 - 0,1$ , оскільки саме цей ґрунт доволі часто необхідно підсилювати під час будівництва і саме цей ґрунт дуже часто складає зсувонебезпечні схили.

Робота виконувалась під керівництвом д.т.н., проф. М. Л. Зоценка.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Дослідження фізико-механічних характеристик ґрунтоцементу були проведені у лабораторних умовах. Із використанням суглинку лесового, легкого, із числом пластичності  $I_p = 0,1$  було зроблено 3 серії зразків із різним умістом портландцементу М400: 15, 20, 25 % від маси сухого ґрунту. Зразки ґрунтоцементу виготовлялися циліндричної форми діаметром і висотою по 30 мм. Їх тужавіння відбувалося у водному середовищі. Випробовування зразків на одновісний стиск проводили при терміні тужавіння 28 діб, 90 діб, 1 рік та 2 роки. За даними випробувань було визначено міцність на стиск  $R$  і модуль деформації  $E$ . Перед проведенням випробування визначалася щільність ґрунтоцементу  $\rho$ , після стиску – вологість  $W$ , за якими обчислювали щільність скелета  $\rho_d$ . Кожне визначення характеристик ґрунтоцементу відбувалося у 6–8-кратній повторності. Для кожної характеристики визначався коефіцієнт варіації  $V$ . Результати лабораторних випробувань наведені у табл. 1.

**Таблиця 1 – Осереднені нормативні дані для ґрунтоцементу при вмісті цементу 15, 20, 25 % при різному терміні тужавіння**

Уміст цементу $i$ , %	Вологість ґрунто-цементу $W$ , % (коефіцієнт варіації $V$ )	Щільність скелета ґрунто-цементу $\rho_d$ , т/м <sup>3</sup> (коефіцієнт варіації $V$ )	Міцність ґрунто-цементу $R$ , МПа (коефіцієнт варіації $V$ )	Модуль деформації ґрунто-цементу $E$ , МПа (коефіцієнт варіації $V$ )	Кореляційні рівняння залежностей: $R = f(i)$ ; $E = f(i)$
Термін тужавіння – 28 діб					
15	29,2 (0,10)	1,36 (0,09)	1,37 (0,09)	153 (0,14)	$R = 0,143i - 0,79$ ( $R^2 = 0,997$ ); $E = 13,51i - 53,7$ ( $R^2 = 0,988$ )
20	29,2 (0,08)	1,37 (0,07)	2,02 (0,10)	208 (0,15)	
25	28,9 (0,10)	1,38 (0,09)	2,80 (0,06)	288 (0,18)	
Термін тужавіння – 90 діб					
15	28,9 (0,09)	1,36 (0,08)	2,53 (0,11)	245 (0,13)	$R = 0,175i - 0,23$ ( $R^2 = 0,942$ ); $E = 23,66i - 122,6$ ( $R^2 = 0,966$ )
20	28,1 (0,07)	1,37 (0,08)	3,03 (0,08)	325 (0,16)	
25	28,4 (0,09)	1,38 (0,10)	4,29 (0,13)	482 (0,17)	
Термін тужавіння – 1 рік					
15	27,7 (0,06)	1,36 (0,05)	2,75 (0,10)	278 (0,12)	$R = 0,206i - 0,44$ ( $R^2 = 0,965$ ); $E = 26,25i - 125,4$ ( $R^2 = 0,986$ )
20	27,2 (0,08)	1,37 (0,07)	3,45 (0,15)	381 (0,18)	
25	27,8 (0,07)	1,38 (0,09)	4,81 (0,14)	540 (0,15)	
Термін тужавіння – 2 роки					
15	27,5 (0,09)	1,36 (0,08)	3,10 (0,12)	302 (0,10)	$R = 0,221i - 0,18$ ( $R^2 = 0,998$ ); $E = 29,55i - 151,4$ ( $R^2 = 0,987$ )
20	27,8 (0,08)	1,37 (0,08)	4,30 (0,17)	420 (0,13)	
25	28,1 (0,10)	1,38 (0,09)	5,32 (0,11)	597 (0,14)	

Як видно з табл. 1, щільність скелета ґрунтоцементу  $\rho_d$  зі збільшенням умісту цементу підвищується, але не змінюється протягом терміну тужавіння ґрунтоцементу. Вологість  $W$  із часом змінюється не суттєво.

За даними табл. 1 побудуємо графіки залежності міцності ґрунтоцементу та модуля деформації від умісту цементу (рис. 1 і рис. 2 відповідно).

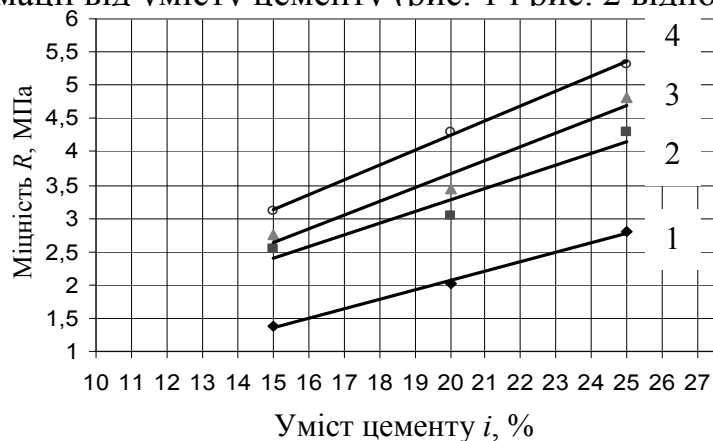


Рисунок 1 – Залежність міцності  $R$ , МПа, ґрунтоцементу від умісту цементу  $i$  при терміні тужавіння: 1 – 28 діб; 2 – 90 діб; 3 – 1 рік; 4 – 2 роки

Із графіка (рис. 1) видно, що, по-перше, зі збільшенням терміну тужавіння у воді міцність ґрунтоцементу підвищується; по-друге, залежність між міцністю на одновісний стиск  $R$  ґрунтоцементу і вмістом цементу лінійна. Кореляційні рівняння даних залежностей при різному терміні тужавіння подані в табл. 1. Для отриманих рівнянь визначалися коефіцієнти апроксимації, значення яких у всіх випадках наближаються до одиниці. Це свідчить про адекватність лінійного закону для прийнятої залежності міцності від умісту цементу.

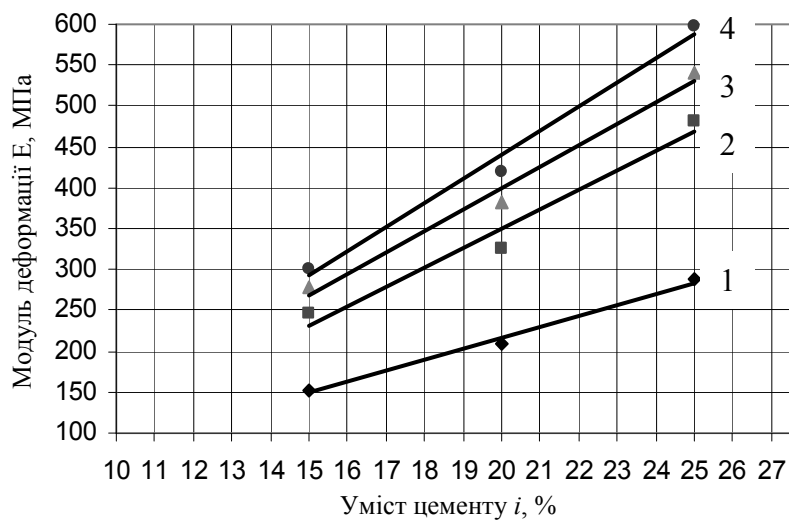


Рисунок 2 – Залежність модуля деформації  $E$ , МПа, ґрунтоцементу від умісту цементу  $i$  при терміні тужавіння: 1 – 28 діб; 2 – 90 діб; 3 – 1 рік; 4 – 2 роки

Після аналізу отриманих рівнянь (рис. 2) стає зрозуміло, що при збільшенні терміну тужавіння зростає і модуль деформації; при збільшенні вмісту цементу за лінійним законом зростає й модуль деформації. Кореляційні рівняння для даних графіків при різному терміні тужавіння наведені в табл. 1. Одержані коефіцієнти апроксимації рівнянь також за значенням наближаються до одиниці, що свідчить про адекватність лінійного закону для даних залежностей: модуль деформації – вміст цементу. Проте необхідно відмітити, що отримані кореляційні залежності є поодиноким випадком, тобто вони можуть бути застосовані тільки для такого виду суглинків і з такими фізичними характеристиками одержаних сумішей, які досліджуються в даній роботі.

Основними характеристиками міцності ґрунтів, котрі використовуються у розрахунках зсувонебезпечних територій, є кут внутрішнього тертя  $\varphi$ , питоме зчеплення  $c$ , яке складається із структурного  $c_{st}$  та водно-колоїдного  $c_w$ , а також опір зрізу  $\tau$ . На кафедрі ВНГГ були проведені дослідження з визначення цих характеристик ( $\varphi$ ,  $c_{st}$  та  $c_w$ ) для ґрунтів, закріплених вертикальними ґрунтоцементними елементами. Їх проводили, щоб довести доцільність застосування ГЦЕ, що виготовляються за бурозмішувальною технологією, для закріплення лесових просадочних ґрунтів зсувонебезпечних територій.

Для досліджень були використані суглинки лесові, високопористі, просадочні, м'якопластичні та текучі, із числом пластичності  $I_p = 0,09$ . Характеристики міцності закріплених ґрунтів визначалися за результатами випробувань на одноплосинний зріз на лабораторному приладі ПСГ-2М при площі зразка  $A = 40 \text{ см}^2$  і на стендовому приладі СПЗ, розробленому на кафедрі ВНГГ, який дозволяє випробовувати зразки площею  $A = 530 - 660 \text{ см}^2$ . Зразки ґрунту площею  $A = 40 \text{ см}^2$  були закріплені ГЦЕ діаметром 4 мм із наступними процентами закріплення  $i = 2,2, 4,4$  та  $6,6$  %. Процент закріплення – це відношення сумарної площі елементів до загальної площі зразка. Зразки ґрунту площею  $A = 530 - 660 \text{ см}^2$  були закріплені ГЦЕ діаметром 14 мм із процентом закріплення  $i = 2,6$  і  $4,4$  %. Витрати цементу для влаштування елементів приймалися у кількості 15 % від ваги сухого ґрунту, водоцементне відношення  $В/Ц = 1$ . Після виготовлення зразки

зберігалися у вологих умовах протягом 28 діб. Після закінчення строку проводилися випробування на зріз, за результатами яких були побудовані графіки зрізу в координатах «логарифм дотичних напружень  $\lg \tau$  – логарифм деформацій  $\lg \Delta l$ » [8], за котрими визначалися характеристики міцності  $\varphi$ ,  $c_{st}$  та  $c_w$ . Результати випробувань показали, що кути внутрішнього тертя, які відповідають структурній і довготривалій міцності, мають приблизно однакові значення ( $\pm 1^\circ$ ); збільшення міцності проходить більшою мірою за рахунок структурного зчеплення  $c_{st}$  [7].

Значення структурного зчеплення для суглинку лесового при  $I_p = 0,09$  залежно від процента закріплення наведені в табл. 2.

Як відомо з норм [6], модуль деформації штучних основ визначається як середньозважений між модулями деформації ґрунту та жорстких елементів. Якщо правило про середньозважене значення дійсне для будь-якої характеристики композитного матеріалу, то на основі отриманих даних закріплених ґрунтів на одноплщинний зріз можна визначити зчеплення (структурну міцність) ґрунтоцементу, який досліджується в якості матеріалу поліпшення слабкого ґрунту. З урахуванням цього значення зчеплення ґрунтоцементу необхідно визначити з рівнянь, які стосуються саме структурного зчеплення закріпленого ґрунту, тому що при руйнуванні структурних зв'язків ґрунтоцементні жорсткі елементи вже перестають працювати, оскільки втрачається їх цілісність.

Значення зчеплення (структурної міцності) ґрунтоцементу визначимо зворотним розрахунком. З урахуванням правила середньозваженого значення рівняння для структурного зчеплення закріпленого масиву набуде вигляду

$$c_{st} = \frac{A_{sc} \cdot c_{sc} + (A - A_{sc}) \cdot \tilde{n}_{s,st}}{A}, \quad (1)$$

де  $c_{st}$  – структурне зчеплення закріпленого масиву, кПа;  $c_{sc}$  – структурна міцність ґрунтоцементу, кПа;  $c_{s,st}$  – структурне зчеплення незакріпленого ґрунту, кПа;  $A_{sc}$  – загальна площа ґрунтоцементних елементів у зразку,  $\text{см}^2$ ;  $A$  – загальна площа зразка, що закріплюється,  $\text{см}^2$ .

Виразимо площу зразків ґрунтоцементу через загальну площу зразка з урахуванням процента закріплення  $i$ . Після проведення всіх перетворень рівняння для визначення структурної міцності ґрунтоцементу набуде вигляду

$$c_{sc} = \frac{c_{st} - (1 - i) \cdot \tilde{n}_{s,st}}{i}. \quad (2)$$

Розв'язуючи його, знайдемо структурну міцність ґрунтоцементу, який був використаний для закріплення суглинку лесового із числом пластичності  $I_p = 0,09$ , що випробовувався на лабораторному приладі одноплщинного зрізу ПСГ-2М та на стендовому приладі СПЗ (табл. 2).

**Таблиця 2 – Структурна міцність ґрунтоцементу з ґрунту (ПГЕ-3)**

Стан зразків ґрунту	Структурне зчеплення закріпленого ґрунту $c_{st}$ , кПа	Структурна міцність ґрунтоцементу $c_{sc}$ , кПа	
		$c_{sc}$ , кПа	$c_{sc}^{cep}$ , кПа
<i>Лабораторні випробування</i>			
Незакріплений	1,2	-	-
Закріплення 2,2 %	5,3	187,6	213,6
Закріплення 4,4 %	12,3	253,5	
Закріплення 6,6 %	14,3	199,7	
<i>Стенові випробування</i>			
Незакріплений	0	-	-
Закріплення 2,6 %	4,8	184,6	205,9
Закріплення 4,4 %	10	227,3	

Як видно з табл. 2, середні значення структурної міцності (зчеплення) ґрунтоцементу, отримані за результатами лабораторних та стендових випробувань, доволі близькі між собою. Тому визначимо зчеплення ґрунтоцементу як середнє значення за всіма дослідженнями:  $c_{sc} = 210,5$  кПа при коефіцієнті варіації  $V = 0,14$ . Проте виникає питання, наскільки достовірні ці дані?

Як відомо з роботи [4], міцність бетону визначається його опором різним силовим впливам – стиску (призмova міцність  $R_b$  та кубова міцність  $R$ ), розтягу (межа міцності при осьовому розтязі  $R_{bt}$ ), згину, зрізу (межа міцності при зрізі  $R_{bsh}$ ). Усі ці характеристики пов'язані між собою:

- межа міцності при осьовому розтязі з підвищенням класу бетону зростає і складає  $R_{bt} = 0,1 - 0,05 R$ ; на основі дослідних даних для важких та легких бетонів призмova міцність коливається від  $0,78R$  (для бетонів високих класів) до  $0,83R$  (для бетонів низьких класів);

- межу міцності бетону при чистому зрізі можна визначати за емпіричною формулою  $R_{bsh} = k\sqrt{R_b R_{bt}}$ , де  $k$  – коефіцієнт, що змінюється (залежно від класу бетону) в межах  $0,5 - 1$ .

Підставляючи у формулу визначення межі міцності при чистому зрізі  $R_{bsh}$  значення межі міцності при розтязі  $R_{bt}$ , отримаємо

- для бетонів класу В7,5:

$$R_{bsh} = 0,5\sqrt{0,83R \cdot 0,1R} = 0,14R; \quad (3)$$

- для бетонів класу В50:

$$R_{bsh} = 1\sqrt{0,83R \cdot 0,05R} = 0,2R, \quad (4)$$

де  $R$  – кубова міцність, МПа.

Припустімо, що для ґрунтоцементу в якості ґрунту з підвищеними характеристиками міцності справедливе рівняння Мора – Кулона

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c_{sc}. \quad (5)$$

Тоді значення структурної міцності ґрунтоцементу (структурного зчеплення) відповідатиме межі опору при зрізі, коли  $\sigma = 0$  (чистий зріз). Якщо припустити, що ґрунтоцемент за характером сприйняття навантаження подібний до бетону, тоді для визначення межі міцності при чистому зрізі ґрунтоцементу буде справедлива формула (3) (як для бетону низьких класів). Тобто задача зводиться до визначення кубової міцності ґрунтоцементу.

Також при виготовленні зразків закріпленого ґрунту для стендових випробувань із суглинку лесового ( $I_p = 0,09$ ) були зроблені 12 зразків ґрунтоцементу циліндричної форми ( $d \approx 30$  мм,  $h \approx 30$  мм). Вони зберігалися у вологому ексикаторі протягом 28 діб, а потім випробовувались на одновісний стиск на спеціальному приладі «Буртехніка» (рис. 3). Були визначені:

- міцність на одновісний стиск –  $R = 1,54$  МПа ( $V = 0,16$ );
- модуль деформації ґрунтоцементу –  $E = 123,3$  МПа ( $V = 0,18$ );
- щільність ґрунтоцементу –  $\rho = 1,64$  г/см<sup>3</sup> ( $V = 0,02$ );
- вологість ґрунтоцементу –  $W = 0,32$  ( $V = 0,15$ ).



Рисунок 3 – Прилад одновісного стиску

Вважаючи, що міцність на одновісний стиск для зразків циліндричної форми дорівнює кубовій міцності, й підставляючи одержане значення  $R = 1,54$  МПа у рівняння (3), отримаємо структурну міцність ґрунтоцементу –  $c_{sc} = 215,8$  кПа, яка відповідає опору при чистому зрізі.

Порівнюючи значення структурної міцності ґрунтоцементу як елемента композитного матеріалу зі значенням структурної міцності ґрунтоцементу як матеріалу, подібного за властивостями до бетону, одержали схожі результати, розбіжність між ними складає лише 2,5 %.

**Висновки.** Проведені дослідження показали, що: 1) міцність на одновісний стиск і модуль деформації при водному зберіганні залежать від умісту цементу та збільшуються із часом: у віці 2 роки міцність і модуль деформації приблизно вдвічі більші, ніж у віці 28 діб; 2) структурна міцність ґрунтоцементу (опір зрізу) складає приблизно 14 % міцності на одновісний стиск, але цю залежність слід перевірити за результатами лабораторних досліджень матеріалу (ґрунтоцементу) на одноплощинний зріз.

#### Література

1. Зоценко М.Л. Прогресивні методи підготовки основ та будівництва фундаментів / М.Л. Зоценко // Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 71. Кн. 1. – К.: НДІБК, 2008. – С. 23 – 37.
2. Крысан В.И. Струйное и смесительно-струйное закрепление грунтов / В.И. Крысан // Инновационные технологии диагностики, ремонта и восстановления объектов строительства и транспорта: сб. науч. трудов ПГАСА. – 2004. – №30. – С. 132 – 136.
3. Токин А.Н. Фундаменты из цементогрунта / А.Н. Токин. – М.: Стройиздат, 1984. – 183 с.
4. Проектирование железобетонных конструкций: справочное пособие / А.Б. Гольшев, В.Я. Бачинский, В.П. Полищук, А.В. Харченко, И.В. Руденко; под ред. А.Б. Гольшева. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Будивельник, 1990. – 544 с.
5. ДБН В.3.1-1-2002. Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій і основ промислових будинків та споруд. – К., 2003. – 83 с.
6. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 104 с.
7. Ларцева І.І. Моделювання одноплощинного зрізу закріплених ґрунтів / І.І. Ларцева, В.І. Марченко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: ОДАБА, 2009. – Вип. №36. – С. 257 – 263.
8. Великодний Ю.Й. Захист територій від зсувів: навчальний посібник / Великодний Ю.Й. – Полтава: ТОВ «Поліграфічний центр «Скайтек», 2006. – 116 с.

Надійшла до редакції 14.04. 2010

© І.І. Ларцева, М. В. Петруняк