

УМОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ ШТУЧНИХ ҐРУНТОВИХ МАСИВІВ

Проаналізовано світовий досвід проектування та зведення штучних ґрунтових масивів. Наведені результати досліджень міцності ущільнених ґрунтів з плином часу. Установлено, що для забезпечення довготривалої міцності штучних масивів потрібно виконувати ущільнення до максимального значення щільності скелета ґрунту при вологості, яка відповідає максимальній кількості зв'язаної води.

Ключові слова: земляна споруда, ущільнений ґрунт, вологість, максимальна щільність скелета ґрунту, максимальна кількість зв'язаної води, міцність ґрунту.

Проанализирован мировой опыт проектирования и сооружения искусственных грунтовых массивов. Приведены результаты исследований прочности уплотненных грунтов во времени. Установлено, что для обеспечения длительной прочности искусственных массивов нужно выполнять уплотнение до максимального значения плотности скелета грунта при влажности, соответствующей максимальному количеству связанной воды.

Ключевые слова: земляное сооружение, уплотненный ґрунт, влажность, максимальная плотность скелета ґрунта, максимальное количество связанной воды, прочность ґрунта.

The world experience of artificial soil massifs design and creation is analyzed in this article. The study results of compacted soils strength in time are presented. It is determined that soil need compact to maximum value of dry density using moisture content is equal the maximum water-holding capacity for guarantee the long-term strength of artificial soil massifs

Key words: earthwork, compacted soil, moisture content, maximum dry density, maximum water-holding capacity, soil strength.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими практичними завданнями. Одна з тенденцій сучасного будівництва – освоєння нових територій, які раніше вважалися непридатними для зведення будівель і споруд у зв'язку з технічними складнощами, у т. ч. території зі складними інженерно-геологічними й гідрогеологічними умовами. У таких випадках практика фундаментобудування рекомендує влаштування штучних масивів, які матимуть поліпшені фізико-механічні характеристики порівняно з природними ґрунтами.

Прикладом таких геотехнічних споруд є штучні острови, дамби, насипи, ґрунтові подушки тощо. Найбільш цікавим з островів є Кансайський міжнародний аеропорт (Японія) [1 – 4], оскільки він вистояв під час землетрусу й потужного тайфуну, за що його визнали монументом цивільного будівництва тисячоліття. Досвід зведення згаданого острова використано для створення інших – аеропорти Кітакюсю, Кобе і Чубу [1]. Заслуговує на увагу й досвід зведення з відходів звалища острова (436 га) в Токійській бухті [2]. Світу відомий амбіційний проект «Пальмові острови» в ОАЕ: Palm Jumeira (2500 га), Palm Jebel Ali (3700 га), Palm Deira (7200 га); архіпелаг «Світ». У південно-західній Азії на узбережжі Перської затоки в Катарі успішно експлуатується о. Pearl-Qatar (400 га) [3], у Бахреїні – Lulu Island (600 га). У Росії реалізується низка проектів на штучно створених територіях – зведення нових районів біля Васильєвського острова Санкт-Петербурга (500 га), «Острів Федерації» (250 га) в акваторії Чорного моря.

Цікавим є досвід спорудження гребель із природних і штучних сумішей суглинистих та великоуламкових ґрунтів. Із таких сумішей зведені ядра гребель Міборо (Японія) висотою 131 м, Серр-Понсон (Франція) – 130 м, Оровілл (США) – 227 м, Нурекська (Таджикистан) – 300 м, Сарсангська (Азербайджан) – 125 м тощо. Прикладами будівництва на насипних ґрунтах є споруда Олімпійської кінноспортивної бази у Москві [5], стадіон «Динамо» у Мінську [6], річковий вокзал у Казані [5], Льодовий палац у м. Барановичі (Білорусія) [7], Науково-технологічний університет у Саудівській Аравії [3] тощо. Чільне місце серед штучних основ також зайняли намівні ґрунти, які утворюють із використанням засобів гідромеханізації в заплавах річок, на надзаплавних терасах, в інших низинах. Так у заплавах Дніпра зведено понад 4 млн. м² житла Русанівського й Оболонського масивів Києва. Цей метод широко використовують і в інших містах [6].

На ґрунтових подушках споруджено низку промислових підприємств. Зокрема, Волгодонська АЕС побудована на піщано-гравійній подушці потужністю 10 м. Основи АЕС у м. Козлодуй (Болгарія) і металургійного заводу в м. Едмонтон (Канада) – ґрунтові подушки. Комплекс киснево-конвекторного цеху заводу «Азовсталь» зведено на основі з доменних шлаків потужністю 1,3 – 2,5 м [5], а Волзький і Камський автозаводи, Беловська ГЕС, резервуари ємністю 150 тис. м³ у Барселоні [8], платформа для контейнерів у Сінгапурі [3] – теж на штучних ущільнених основах. На подушках з ущільнених лесів побудовані мікрорайони у Дніпропетровську, Запоріжжі, Новосибірську, Тольятті, Шимкенті та ін.

Таким чином, дослідження забезпечення тривалої міцності таких основ є актуальними завданнями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв’язання даної проблеми. Згідно з роботою [1] зазначені геотехнічні об’єкти є складними не лише у технічному та технологічному відношеннях, але й із позицій наукових концепцій процесів, що відбуваються в ущільнених ґрунтах, зокрема самоущільнення та зміцнення, а з іншого боку – розущільнення. Проф. В.І. Крутов [5] вважав, що ці процеси залежать від низки чинників як-от: виду ґрунту, його стану і складу, способу відсипання й ущільнення, змін гідро-геологічного режиму насипу, часу відсипання тощо.

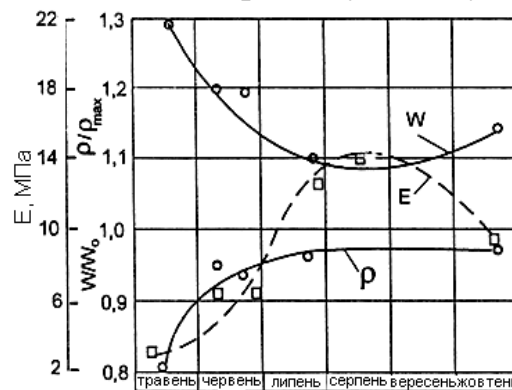


Рисунок 1 – Зміна вологості w , щільності ρ і модуля деформації E ґрунту протягом року: w/w_0 – співвідношення фактичної до оптимальної вологості; ρ/ρ_{max} – співвідношення фактичної до максимальної щільності (дані В.Д. Казарновського) [10]

Дослідженнями зміни характеристик ущільнених ґрунтів у часі також займався проф. В.Д. Казарновський [10]. За його даними, на рис. 1 зображені залежності зміни вологості w , щільності ρ і модуля деформації E ґрунту протягом року.

На сьогодні ці відомі фактори не враховані у нормах. Тому проф. М.В. Корнієнко [9] наголошує на недоліках існуючої нормативної бази проектування ґрунтових подушок.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття. Сучасний підхід до проектування штучних основ у світі суттєво не відрізняється від існуючого в Україні. Ним нормується щільність скелета ґрунту ρ_d , еталонну величину якої визначають для кожного виду ґрунту в лабораторії тестом Проктора (ASTM D 698-91) чи його модифікацією (ASTM D 1557-91), принцип яких не відрізняється від методу ГОСТ 22733-77 «Методы лабораторного определения максимальной плотности» (табл. 1).

Аналізуючи світові й вітчизняні норми, можна узагальнити, що коефіцієнт ущільнення ґрунту коливається в межах $0,93 \leq k_s \leq 1,01$, при цьому вимоги України та Росії – одні з найжорсткіших (після Фінляндії) [10]. Проблема, однак, полягає в тому, що оптимальні параметри (максимальна щільність скелета ґрунту $\rho_{d \max}$ і його оптимальна вологість w_{opt}) призначаються, виходячи з отриманих у лабораторних умовах значень для конкретного виду ґрунту та параметрів ударного навантаження, яке використовують при дослідах, без урахування параметрів реальних механізмів [11, 12].

Таблиця 1 – Параметри лабораторних методів ущільнення ґрунту

Параметри	Значення параметрів за методикою		
	ASTM D 698-91	ASTM D 1557-91	ГОСТ 22733-77
Внутрішній діаметр форми, мм	102	102	100
Висота форми, мм	116	116	127
Об'єм форми, см ³	944	944	1000
Маса вантажу, кг	2,5	4,5	2,5
Висота падіння вантажу, мм	300	457	300
Діаметр контакту при ударі, мм	51	51	100
Кількість шарів ґрунту	3	5	3
Кількість ударів на шар	25	25	40
Питома енергія ущільнення, Дж/см ³	0,6	2,7	0,9

Оптимальна вологість w_{opt} не є постійною величиною і для одного й того ж ґрунту змінюється залежно від того, який максимальний контактний тиск розвиває ущільнювач протягом одного циклу. Отже, змінюючи вологість ґрунту, завжди можна знайти такий механізм, що забезпечить потрібний оптимальний контактний тиск для даної вологості. Таким чином, при проектуванні процесу ущільнення можливо розв'язати не тільки задачу з визначення оптимальної вологості для даного механізму, але й установити оптимальний механізм для ущільнення існуючого ґрунту.

Дослідженнями проф. В.Д. Казарновського [10] й авторів [12 – 14] підтверджено, що оптимальна вологість залежить від величини ударного імпульсу (рис. 2), а отже, і від величини ущільнювального тиску, який створить сучасна техніка при виконанні штучних ґрунтових масивів. Як видно з рис. 2, а, підвищення ущільнювального тиску приводить до зміщення кривої стандартного ущільнення вліво при збільшенні значення ординати. Це означає, що величина максимальної щільності зростає, а оптимальна вологість зменшується. Отже, до певної межі за рахунок збільшення роботи удару пропорційно підвищується й питома щільність скелета ґрунту (рис. 2, б, в).

Таким чином, при збільшенні значень максимальних контактних тисків значення оптимальної вологості будуть зменшуватися, але це зменшення можливе тільки за рахунок зміни кількості вільної води. Для витиснення з пор ґрунту зв'язаної води потрібні значні зусилля, які у багато разів перевищують ті, що виникають під час ущільнення. Тому граничною межею зменшення оптимальної вологості за рахунок збільшення максимальних контактних тисків буде значення, близьке до максимального вмісту зв'язаної води у ґрунті W_{con} .

При досягненні максимальної щільності скелета ґрунту будуть отримані й найвищі характеристики його міцності.

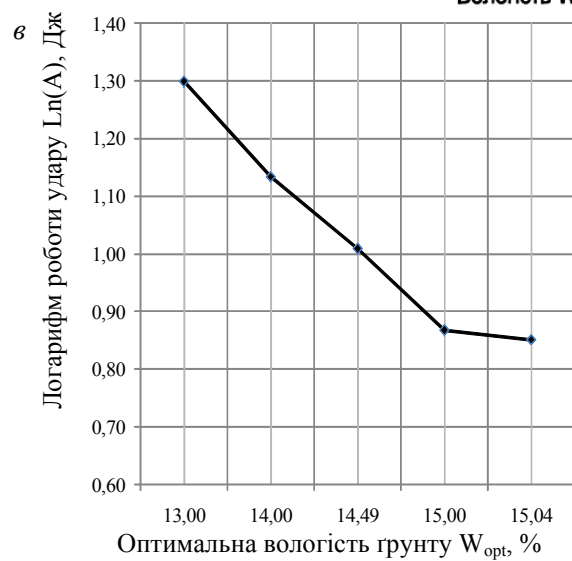
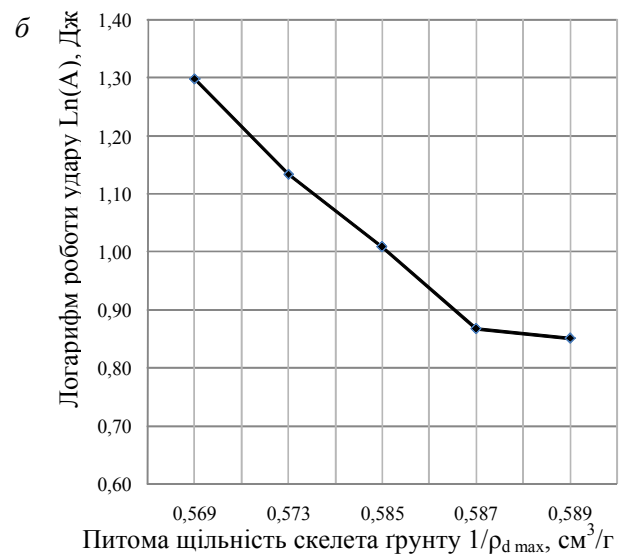
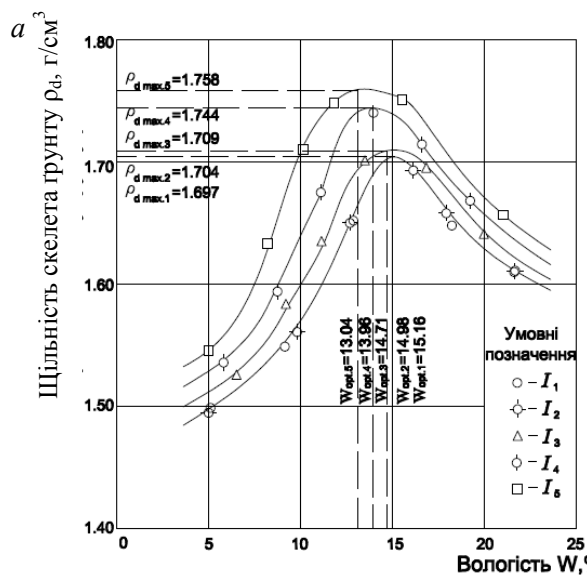


Рисунок 2 – Результати лабораторних досліджень оптимальних параметрів ущільнення ґрунтів: а – графіки залежності між щільністю скелета ґрунту та вологістю $\rho_d = f(w)$; б – графік залежності питомої максимальної щільності скелета ґрунту від логарифма величини роботи удару; в – графік залежності оптимальної вологості ґрунту від логарифма величини роботи удару; I_1 – імпульс № 1 (висота падіння вантажу $h = 6,95$ см, маса вантажу $m = 10,4$ кг); I_2 – $h = 30$ см, $m = 2,5$ кг; I_3 – $h = 6,95$ см, $m = 15$ кг; I_4 – $h = 6,95$ см, $m = 19,9$ кг; I_5 – $h = 45$ см, $m = 4,5$ кг (дані авторів [12])

З точки зору надійності експлуатації земляної споруди велике значення має не лише максимально досягнуті значення щільності скелета ґрунту та характеристик міцності, а й збереження їх протягом тривалого часу її експлуатації.

Тому за мету роботи прийнято вивчити оптимальні параметри ущільнення ґрунтів, при яких буде забезпечена тривала міцність штучних геотехнічних споруд.

Виклад основного матеріалу дослідження. Авторами проведені численні дослідження властивостей ущільнених ґрунтів як у лабораторних, так і польових умовах. При цьому значна увага приділялась визначенню характеристик міцності й деформативності ґрунтів в ущільненому стані, оскільки ці властивості необхідні для оцінювання напружено-деформованого стану штучних основ. Також особливе місце у дослідженнях займало питання встановлення оптимальних параметрів ущільнення, при яких досягнуті значення цих характеристик не будуть погіршуватися у процесі експлуатації земляних споруд.

Згідно з проведеними дослідженнями визначено, що на поведінку ущільненого ґрунту в часі значний вплив має вологість, при якій було здійснено ущільнення, й кількісне співвідношення окремих видів води в ущільненому ґрунті.

Розглянемо схему впливу кількісного вмісту різних видів води на поведінку ущільненого ґрунту в часі (рис. 3). Якщо його ущільнення виконано при вологості, меншій, ніж максимальна кількість зв'язаної води

W_{con} (рис. 3, а), то електричний потенціал поверхні твердих частинок не використано і вони здатні збільшити товщину плівок зв'язаної води δ до її максимального можливого значення δ_{max} при додатковому зволоженні ґрунту під час експлуатації земляної споруди. Збільшення товщини плівок зв'язаної води призводить до підвищення початкового об'єму ущільненого ґрунту і деформації споруди. Треба враховувати й те, що, як правило, зволоження масиву відбувається нерівномірно, що відповідно викликає нерівномірну деформацію.

Якщо ущільнення ґрунту виконано при вологості, яка значно перевищує максимальну кількість зв'язаної води (рис. 3, б), то електричний потенціал поверхні твердих частинок повністю використано, система має нейтральний заряд, і товщина плівок зв'язаної води має максимальне значення. Але наявність значної кількості вільної води призводить до того, що із часом вона під дією сил гравітації, власної ваги ґрунту і зовнішніх навантажень витискається з пор ґрунту. У свою чергу це спричиняє додаткове ущільнення ґрунту за рахунок більш компактного розташування твердих частинок. Міцність ґрунту при цьому збільшується, але виникають значні нерівномірні деформації.

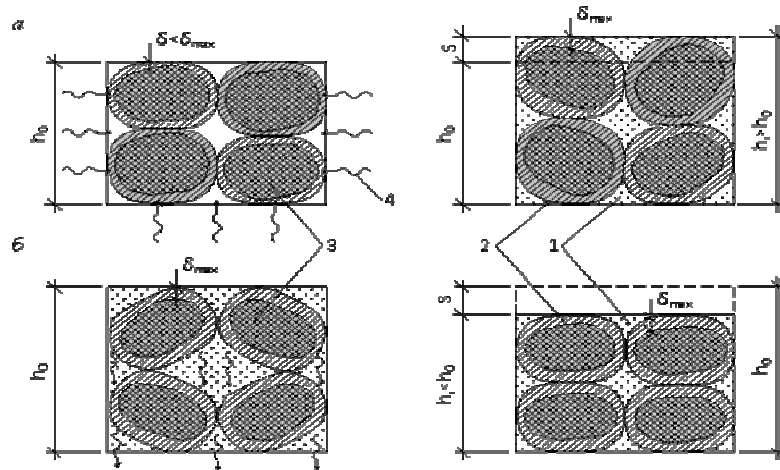


Рисунок 3 – Схеми деформацій ущільненого ґрунту із часом: а – недозволений ґрунт ($W < W_{con}$); б – перезволожений ґрунт ($W > W_{con}$); 1 – вільна вода; 2 – зв'язана вода; 3 – тверда частинка; 4 – напрям руху води

Найбільш достовірні результати можна отримати шляхом проведення польових дослідних робіт з ущільнення ґрунтів. Тому ці теоретичні положення перевірялися під час натурних досліджень властивостей ущільнених малозв'язних розкривних порід при зведенні штучного насипу потужністю 4 – 6 м і площею 190 га під споруди електрометалургійного заводу «Ворскла Сталь» поблизу м. Комсомольськ Полтавської області. На момент досліджень зміни фізико-механічних характеристик ущільнених ґрунтів із плином часу вік штучної основи склав до 2 років. Додатковий геотехнічний контроль виконувався на ділянках (захватках), де 1 – 1,5 року тому була встановлена невідповідність проектним значенням щільності скелета ґрунту в нижніх шарах насипу.

Результати досліджень показали, що в масиві відбулося додаткове ущільнення від власної ваги ґрунту, вищерозташованих шарів, а також відмічені більші за очікувані осідання насипу. Також спостерігалась вища інтенсивність його самоущільнення при більшій вологості, яка коливалась у межах 6 – 25 %. Очевидно, що ефект самоущільнення також залежить від величини тиску. Таким чином, за однакового тиску від власної ваги ґрунту були зареєстровані значення щільності скелета ґрунту на 6 % більші (з 1,62 до 1,65 г/см³) при вологості 20 – 25 %.

На інших захватках, де ступінь ущільнення сягав проектного значення, на момент виконання штучного насипу при вологості, меншій за максимальну кількість зв'язаної води W_{con} , при повторному геотехнічному

контролі було помічено, що вологість ґрунту перевищує початкове значення, а щільність скелета ґрунту стала меншою.

За даними натурних досліджень фізико-механічних характеристик ґрунтової подушки протитуберкульозного диспансеру по вул. Шилівській у Полтаві встановлено, що вологість її ґрунту через 12 років експлуатації була близькою до значення максимального вмісту зв'язаної води.

Отже, найбільш сприятливою умовою забезпечення тривалої міцності ґрунтів і менших деформацій при експлуатації земляної споруди є ущільнення при вологості, близькій до максимального вмісту зв'язаної води (для глинистих ґрунтів $W_{con} = W_p - 0,02$, де W_p – вологість на межі пластичності). Точне значення максимальної кількості зв'язаної води для конкретного виду ґрунту можна визначити методом вологомісткого середовища чи методом кінетики сушіння [14].

На стабільність властивостей ущільненого ґрунту впливає й величина щільності скелета ґрунту, досягнута при його ущільненні. При підвищенні цього значення за постійної вологості уповільнюється підняття капілярної води, збільшується водонепроникність ґрунтового масиву й морозного випинання внаслідок зниження міграції вологи. Швидкість випаровування різних видів води теж буде різною. Вільна вода випаровується швидше, ніж фізично зв'язана.

Можна підсумувати, що для досягнення більш стабільних характеристик міцності й деформативності штучних ґрунтових масивів потрібно намагатися виконувати ущільнення до максимально можливого значення щільності скелета ґрунту при вологості, близькій до максимальної кількості зв'язаної води. Але навіть за таких умов можливе зменшення щільності ґрунту до деякого стабілізованого значення, а отже, і деяке погіршення його властивостей, що необхідно враховувати при проектуванні земляних споруд.

Висновки з даного дослідження. Таким чином, проектування ущільнення за умови забезпечення тривалої міцності зводиться до наступного:

1. За даними динамічного ущільнення при різних значеннях ударного навантаження будують графіки залежності між максимальними контактними тисками й оптимальними характеристиками ущільнення (оптимальною вологістю W_{opt} і максимальною щільністю скелета ґрунту ρ_{dmax}).

2. За допомогою методу кінетики сушіння чи вологомісткого середовища визначають максимальний уміст зв'язаної води W_{con} .

3. На графіку залежності між максимальними контактними тисками в лабораторних умовах σ_{max1} та оптимальною вологістю W_{opt} знаходять тиск σ_{max1c} , який відповідає значенню оптимальної вологості $W_{opt}=W_{con}$.

4. Визначають потрібний максимальний контактний тиск, який повинен забезпечувати у польових умовах ущільнювач $\sigma_{maxc}=K_c \cdot \sigma_{max1c}$ для досягнення наприкінці ущільнення максимальної щільності скелета ґрунту.

5. Здійснюють геотехнічний контроль якості ущільнення ґрунту при зведенні земляної споруди.

6. Для досягнутих у польових умовах стабілізованих величин щільності скелета ґрунту визначають характеристики міцності (кут внутрішнього тертя й питоме зчеплення) і деформативності (модуль деформації), які будуть вихідними даними для розрахунку несучої здатності й деформацій штучних ґрунтових масивів.

Література

1. Ван Импе. Проектирование, строительство и мониторинг насыпей на шельфе в условиях слабых грунтов / В. Ван Импе, Р.Д. Верастеги Флорес. – С-Пб.: НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2007. – 164 с.

2. Akai K. Ex-Post-Facto estimate of performance at the offshore reclamation of airport Osaka/KIA / K. Akai, Y. Tanaka // Proc. 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Osaka, 2005. – P. 1011–1014.

3. *Construction Processes / J. Chu, S. Varaksin, U. Klotz, P. Mengé // Proc. of the 17th International Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Olexandria, Egypt, 2009. – Amsterdam, Berlin, Tokyo, Washington: JOS Press. – 2009. – P. 3006–3135.*
4. *Furudoi T. Second phase construction project of Kansai International Airport. Large-scale reclamation works on soft deposits / T. Furudoi // Proc. 16th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Osaka, 2005. – P. 329–332.*
5. Крутов В.И. Основания и фундаменты на насыпных грунтах / В.И. Крутов. – М.: Стройиздат, 1988. – 224 с.
6. Проектирование и устройство фундаментов на намывных песчаных грунтах / [С.А. Слюсаренко, Г.П. Степаненко, М.А. Глотова и др.] – К.: Будивельник, 1990. – 128 с.
7. Лях В.Н. Фундаменты на насыпных основаниях комплекса зданий ледового дворца в г. Барановичи / В.Н. Лях // *Геотехника Беларуси: наука и практика. Сб. статей междунаrod. науч.-техн. конф.* – Мн.: БНТУ, 2008. – С. 275–285.
8. *Leira Velasco J.A. Soil improvement under two LNG tanks at the port of Barcelona / J.A. Leira Velasco, M.A. L. Kropnick // Proc. of the 14th European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Geotechnical Engineering in Urban Environments. – Madrid, 2007. – P. 1355–1360.*
9. Особливості влаштування ґрунтових подушок в сучасних умовах / М.В. Корнієнко, В.П. Голуб, А.М. Раценко, Є.Ф. Тимошук // *Будівельні конструкції: міжвід. наук.-техн. зб.* – К.: НДІБК, 2008. – Вип. 71. Т. 2. – С. 19–26.
10. Казарновский В.Д. Основы нормирования и обеспечения требуемой степени уплотнения земляного полотна автомобильных дорог / В.Д. Казарновский, И.В. Лейтланд, А.К. Мирошкин. – М.: ФГУП «Союздорнии», 2002. – 33 с.
11. *Szymanski A. Field and laboratory experience with the soft subsoil deformation / A. Szymanski, W. Sas & A. Niesiolowska // Proc. of the 17th International Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Olexandria, Egypt, 2009. – Amsterdam, Berlin, Tokyo, Washington: JOS Press. – 2009. – P. 723–726.*
12. Використання малозв'язних розкривних порід для влаштування штучних основ / Ю.Л. Винников, В.І. Коваленко, М.О. Харченко, П.М. Омельченко, С.М. Манжалий // *Будівельні конструкції: міжвід. наук.-техн. зб.* – К.: НДІБК, 2008. – Вип. 71. Кн. 2. – С. 83–92.
13. Коваленко В.И. Исследования уплотняемости связных грунтов / В.И. Коваленко, В.Ф. Разоренов, В.Г. Хилобок. – Воронеж: ВГУ, 1981. – 196 с.
14. *Инженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти / М.Л. Зоценко, В.І. Коваленко, А.В. Яковлев, О.О. Петраков, В.Б. Швець, О.В. Школа, С.В. Біда, Ю.Л. Винников. – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – 568 с.*

Надійшла до редакції 14.04. 2010

© Ю.Л. Винников, В.І. Коваленко,
М.О. Харченко, Р.М. Лопан