

Ю. Л. ВИННИКОВ, М. О. ХАРЧЕНКО (Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка)

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК УЩІЛЬНЕНИХ МАТЕРІАЛІВ ҐРУНТОВИХ ПОДУШОК ЯК ВИПАДКОВИХ ВЕЛИЧИН

Виконано статистичний аналіз випадкових величин механічних характеристик ущільнених ґрунтів і встановлено закономірності їх розподілу. Зокрема, для модуля деформації, питомого зчеплення і кута внутрішнього тертя отримано логарифмічно нормальний закон розподілу, для опору пенетрації – експоненційний.

Выполнено статистический анализ случайных величин механических характеристик уплотненных грунтов и установлены закономерности их распределения. В итоге, для модуля деформации, удельного сцепления и угла внутреннего трения получен логарифмически нормальный закон распределения, для удельного сопротивления пенетрации – экспоненциальный.

The statistic analysis of variability values of mechanical characteristics of compacted soils is done. Also the laws of their distribution are determined. As a result, it is determined that for the deformation modulus, unit cohesion and internal friction angle the logarithmic normal law of distribution is more correct, while for penetration resistance – exponential law.

Варіювання значень механічних характеристик ґрунтів як природних, так і ущільнених масивів значно більше за розкид аналогічних величин в інших матеріалах будівельних конструкцій. Зокрема, згідно з ДСТУ Б В.2.1-5-96 «ґрунти. Методи статистичної обробки результатів випробувань» інженерно-геологічний елемент вважається однорідним, якщо величина коефіцієнта варіації для його фізичних властивостей не перевищує $v = 15\%$, а для механічних – $v = 30\%$. Ці значення значно перевищують, наприклад, призмову міцність бетону на стиск ($v = 13,5\%$) і на розтяг ($v = 11,2...15,5\%$), модуль пружності бетону ($v = 4,4...9,2\%$), міцність арматурної сталі на розтяг ($v = 5...9,4\%$), межу текучості сталі ($v = 4,6...7,3\%$), міцність скла ($v = 6\%$) і навіть міцність фанери ($v = 24,3\%$) [1–4] тощо.

Деформації та напруження основ, фундаментів і споруд доцільно представляти у вигляді просторово-часових випадкових полів, властивості яких залежать від неоднорідності ґрунтового масиву, а також від просторових і часових флуктуацій зовнішніх навантажень. Отже, оцінювання напружено-деформованого стану (НДС) як природних, так і штучних основ будівель і споруд є задачею ймовірісно-статистичних досліджень.

Випадкові величини (ВВ), до яких відносять і властивості ґрунтів, повністю характеризуються кривими розподілу (КР). Залежно від особливостей тих чи інших ґрунтів КР їх ВВ можуть мати різний вигляд. За М. М. Єрмолає-

вим [5], М. М. Масловим [6], В. І. Крутовим [7], А. П. Пшенічкіним [8], V. Wijeyakulasuriya, B. Look [9], Z. Mlynarec, J. Wierzbicki [10], КР значень, головним чином, фізичних характеристик ґрунтів відповідають закону нормального розподілу Гаусса. М. Н. Гольдштейн [11] прогнозував, що для механічних властивостей ґрунтів найбільш коректним має бути логнормальний (логарифмічно нормальний) розподіл. За дослідженнями О. К. Бугрова та В. Г. Шиліна [12], стохастичні властивості ґрунтів найточніше описуються нормальним покращеним і Грама-Шарльє ЗР ВВ.

Таким чином, досі експериментально недостатньо обґрунтовано коректність ЗР ВВ механічних характеристик ущільнених ґрунтів, оскільки для штучних масивів подібні дослідження майже не виконувались. У цьому напрямку відомі лише роботи Л. М. Тимофєєвої [13], І. Г. Чарушнікова [14], Б. І. Баликова [15] й авторів [16]. Згідно з цими дослідженнями найбільш вірогідними є нормальний, логарифмічно нормальний та експоненційний ЗР цих ВВ.

Коректно отримані статистичні закономірності ЗР ВВ дозволять розробити методіку розрахунку ґрунтових подушок із урахуванням неоднорідності властивостей ущільненого масиву [17, 18], зокрема, і при використанні методу скінченних елементів (МСЕ) [19].

Тому за **метою роботи** прийнято – експериментально дослідити ЗР ВВ механічних характеристик ущільнених ґрунтів, зокрема, їх моду-

ля деформації, питомого зчеплення, кута внутрішнього тертя та питомого опору penetрації.

Авторами протягом 2006...2010 рр. виконувалися польові та лабораторні дослідження фізико-механічних характеристик ущільнених ґрунтів штучних основ для кількох будівельних об'єктів, зокрема, протитуберкульозного диспансеру по вул. Шилівській у Полтаві (об'єкт № 1), двох резервуарів під нафтопродукти ємністю 3000 м³ у с. Качанове Гадяцького району Полтавської обл. (об'єкт № 2), споруд електрометалургійного заводу потужністю 3 млн. т. слябів на рік поблизу м. Комсомольськ Полтавської обл. (об'єкт № 3).

Технологічні параметри ґрунтової подушки на об'єкті № 1 наступні: матеріал – місцевий лесовий суглинок легкий пілуватий із вологістю на межі текучості $W_L = 0,29$ і розкочування $W_p = 0,21$. Ущільнення ґрунту дна котловану було поверхневе за допомогою важкої трамбівки. Поверх дна зводилась штучна основа відсіпанням суглинку шарами по 50 см з укочуванням завантаженими самоскидами масою 20 т за 8...12 проходів за одним слідом до проектного значення щільності скелета ґрунту $\rho_d = 1,65$ г/см³ при коефіцієнті ущільнення $k_s = 0,90$. Потужність подушки відповідала її проектному значенню $h = 4,0...4,4$ м.

На об'єкті № 2 ґрунтова подушка під резервуари мала товщину близько 3 м і діаметр 22 м. Її виконали з місцевих лесових пілуватих супісків і суглинків (число пластичності $I_p = 5,3...15,8$ %), які пошарово укочували 10...12 проходками за одним слідом завантаженими самоскидами та 12...14 ударами за одним слідом трамбівки у формі конусу з нижнім і верхнім діаметрами відповідно 930 і 430 мм, висотою 800 мм і масою 2 т, яку скидали з висоти 5...6 м (рис. 1, а).

На об'єкті № 3 штучний насип площею 190 га та потужністю 4...5 м зводили на заболоченій місцевості з використанням розкривних порід Єристовського та Лавриковського родовищ залізних кварцитів. Для зміцнення основи насипу заболочений масив прорізали траншеями перерізом 1x1,5 м із кроком 3 м, які заповнювали щебенем. Потім розкривні породи доставлялись на майданчик, розрівнювались шарами потужністю 0,3 м й ущільнювались пневматичними та вібраційними котками (рис. 1, б) до проектного значення щільності скелета ґрунту $\rho_d = 1,711$ г/см³ при коефіцієнті ущільнення $k_s = 1,01$ за тестом Проктора.

Фізико-механічні характеристики ущільнених ґрунтів на всіх дослідних об'єктах визначали у кожному шарі штучної основи відбором ґрунту в металеві кільця площею поперечного

перерізу 40 см² та об'ємом 140 см³ (діаметром і висотою відповідно близько 70 і 35 мм), а потім транспортували та зберігали згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.1-8-2001 «Ґрунти. Відбирання, упакування, транспортування і зберігання зразків» і ДБН А.2.-1-2008 «Інженерні вишукування для будівництва». Визначення механічних властивостей ґрунтів виконували згідно з ДСТУ Б В.2.1-3-96 «Ґрунти. Лабораторні випробування. Загальні положення», ДСТУ Б В.2.1-4-96 «Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформативності», ДСТУ Б В.2.1-5-96 «Ґрунти. Методи статистичної обробки результатів випробувань».



Рис. 1. Технологія зведення дослідних ґрунтових подушок:
а – під резервуар ємністю 3000 м³; б – під споруди електрометалургійного заводу

Деформаційні показники визначалися шляхом ущільнення зразків ґрунту під тиском без можливості бічного розширення. Дослідження проводились на приладі для компресійних випробувань КПР-1 прикладанням тиску ступенями $\sigma = 0,025; 0,05; 0,10; 0,20; 0,30$ МПа.

Пенетраційні дослідження в лабораторії виконувались за такою методикою: після досягнення умовної стабілізації деформацій ґрунту кільце зі зразком виймали з ущільнювача й здійснювали penetрацію ґрунту з використанням лабораторного пенетрометра ЛП-1 наконечником із кутом конічності 30° при чотирьохп'яти ступенях навантаження й кінцевому зануренні конусу $h \geq 1$ см. Навантаження на першій ступені – 0,66...0,76 Н (вага конусу зі шта-

нгою), на наступних – залежно від виду і стану ґрунту. Інтервал прикладання навантаження – 0,5 хв. Глибину занурення конусу визначали за шкалою індикатора годинникового типу з точністю 0,01 см. Після компресії та penetрації зразки випробували у приладі одноплощинного зрушення ПСГ-2М.

Зокрема, за цією методикою на об'єкті № 1 було відібрано 78 зразків ґрунту при горизонтальній орієнтації кілець і 28 – при вертикальній. При цьому отримано $n = 55$ комплексів значень (n – кількість ВВ) модуля деформації ґрунту E при різних тисках у компресійному приладі й змінність характеристик міцності ущільненого ґрунту за глибиною подушки. Для об'єкту № 2 – $n = 108$ ВВ опору penetрації ґрунту R . На об'єкті № 3 отримано $n = 374$ комплексів ВВ модуля деформації E при різних ти-

сках у компресійному приладі, $n = 50$ ВВ кута внутрішнього тертя φ і питомого зчеплення ґрунту c .

Для аналізу експериментальних даних застосовано наступний алгоритм методики [1]:

1. визначалась необхідна кількість дослідних даних;

2. після отримання експериментальних даних у польових і лабораторних умовах у вигляді статистичного ряду вони аналізувались з метою виключення грубих помилок;

3. для «очищеного» ряду розраховувались статистичні параметри;

4. підбирався оптимальний ЗР для дослідних ВВ і перевірялась його адекватність.

У табл. 1 зведені статистичні параметри ВВ механічних характеристик ущільнених ґрунтів для дослідних об'єктів.

Таблиця 1

Статистичні параметри експериментальних ЗР ВВ механічних властивостей ущільненого ґрунту

Статистичні параметри	M_1	M_2	M_3	M_4	\bar{X}	\hat{X}	μ_3	μ_4	σ	ν	A	E
Об'єкт № 1												
Модуль деформації E , МПа, при тиску $\sigma = 0,05 \dots 0,1$ МПа	1,15	4,75	19,58	109,2	5,18	3,78	7,27	62,88	1,95	0,38	0,99	1,39
E , МПа, при тиску $\sigma = 0,1 \dots 0,2$ МПа	1,68	6,28	33,04	214,8	10,6	37,7	390,1	8935	6,14	0,57	1,68	3,28
E , МПа, при тиску $\sigma = 0,2 \dots 0,3$ МПа	0,43	4,87	18,32	117,5	13,4	48,6	408,8	9840	6,97	0,52	1,21	1,16
Об'єкт № 2												
Питомий опір penetрації R , кПа	-4,3	23,2	-136,1	853,6	436	62706	88974	10^9	250	0,57	0,57	-0,2
Об'єкт № 3												
E , МПа, при тиску $\sigma = 0 \dots 0,05$ МПа	-3,6	14,8	-62,2	275,6	8,55	21,7	187,9	3669	4,66	0,55	1,86	4,78
E , МПа, при тиску $\sigma = 0,05 \dots 0,1$ МПа	0,06	0,95	2,02	13,4	7,64	10,2	65,67	1514	3,19	0,41	2,01	11,5
E , МПа, при тиску $\sigma = 0,1 \dots 0,2$ МПа	0,14	1,43	3,61	20,23	12,6	19,8	158,4	3630	4,45	0,35	1,79	6,23
E , МПа, при тиску $\sigma = 0,2 \dots 0,3$ МПа	0,64	1,84	5,05	22,22	19,4	41,1	312,6	10975	6,42	0,33	1,18	3,47
Питоме зчеплення ґрунту c , кПа	0,9	2,3	7,05	27,2	16	16,2	82,58	1308	4,03	0,25	1,26	1,97
Кут внутрішнього тертя ґрунту φ , °	-0,9	2,4	-7,10	26,1	31,3	10,9	-38,87	514	3,3	0,11	-1,1	1,31

Примітка: $M_1 \dots M_4$ – моменти 1...4 порядків; \bar{X} – математичне очікування; \hat{X} – дисперсія; μ_3 – центральний момент третього порядку; μ_4 – центральний момент четвертого порядку; σ – середнє квадратичне відхилення (стандарт); ν – коефіцієнт варіації; A – коефіцієнт асиметрії; E – ексцес.

На рис. 2 представлені найбільш типові експериментальні гістограми й аналітичні ЗР ВВ E для різних тисків у компресійному приладі, а на рис. 3 – для R , φ та c .

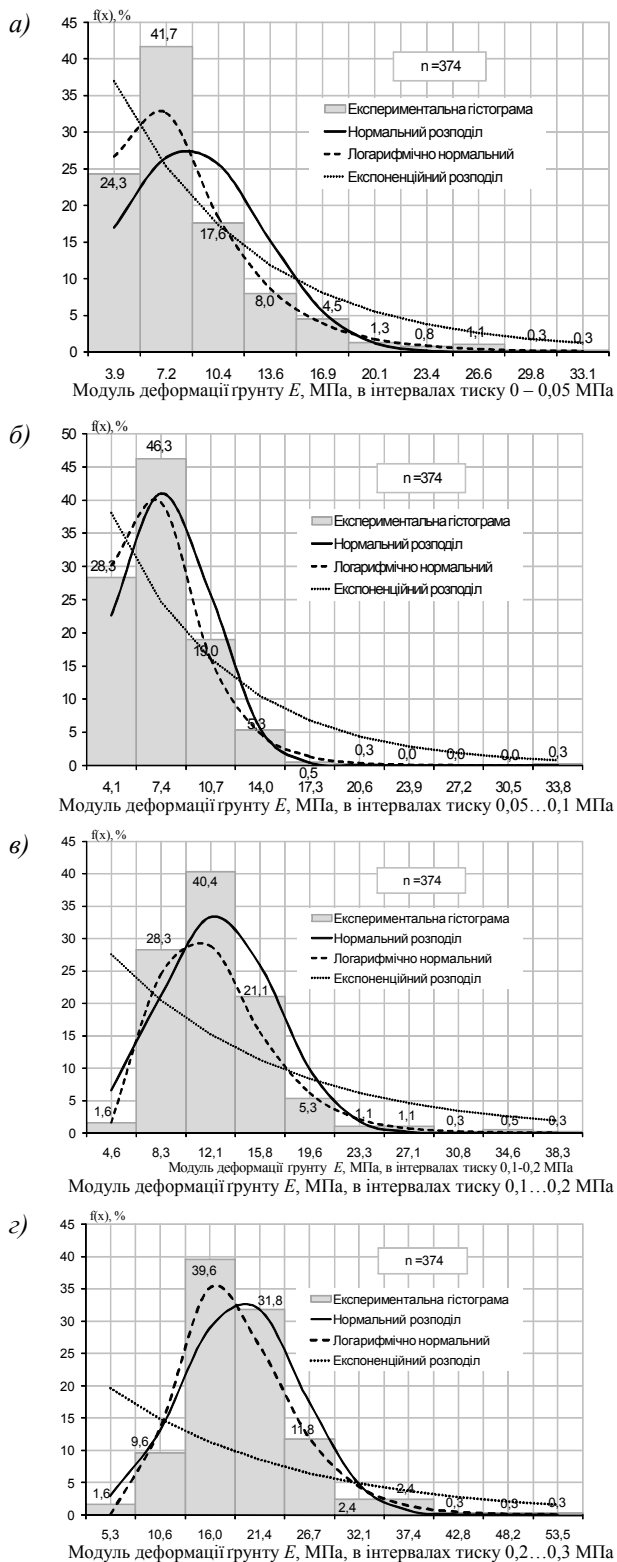


Рис. 2. Типові експериментальні гістограми і закони розподілу ВВ модуля деформації ущільненого ґрунту при різних тисках у компресійному приладі (дослідний об'єкт № 3)

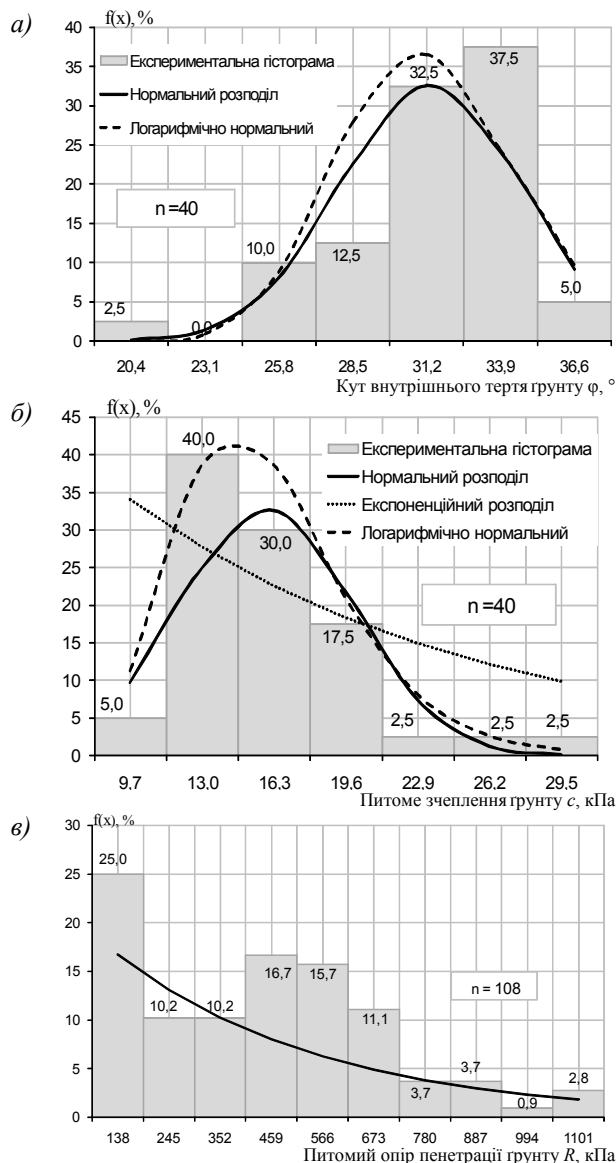


Рис. 3. Типові експериментальні гістограми і закони розподілу ВВ механічних характеристик ущільненого ґрунту: а – кута внутрішнього тертя (об'єкт № 3); б – питомого зчеплення (об'єкт № 3); в – питомого опору penetрації (об'єкт № 2)

Аналізуючи експериментальні й аналітичні розподіли ВВ модуля деформації ущільненого ґрунту (рис. 2), кута внутрішнього тертя (рис. 3, а) і питомого зчеплення (рис. 3, б), можна зробити узагальнення про те, що для них найбільш коректним є логарифмічно нормальний ЗР. Зокрема, критерій Пірсона $\chi^2_{\text{досл.}}$ для аналітичних кривих ВВ модуля деформації склав 3,3 (рис. 2, а), 2,53 (рис. 2, б), 8,03 (рис. 2, в), 3,95 (рис. 2, г); кута внутрішнього тертя – 4,12 (рис. 3, а) і питомого зчеплення – 16,92 (рис. 3, б). Отже, нашими дослідженнями фактично підтверджена гіпотеза М. Н. Гольдштейна [8].

Розподіл ВВ значень питомого опору penetрації ущільненого ґрунту (рис. 3, в) найкраще апроксимується експоненційним ЗР, хоча у деяких інтервалах спостерігаються достатньо значні відхилення від аналітичної кривої, що підтверджується критерієм Пірсона $\chi^2_{\text{досл.}} = 34,4$. Таким чином, розподіл ВВ цієї характеристики потрібно ще додатково вивчати. Для цього доцільно, крім лабораторних penetраційних випробувань, виконувати і польові.

Висновки

Механічні характеристики ущільнених ґрунтів найбільш коректно описуються логарифмічно нормальним та експоненційним ЗР. Зокрема, для опору penetрації R у багатьох випадках правомірним є експоненційний ЗР, а для модуля деформації E , питомого зчеплення c і кута внутрішнього тертя φ – логарифмічно нормальний.

Дані досліджень є певною базою для ймовірнісних розрахунків ґрунтових подушок. Зокрема, вони відкривають можливість аналітично визначати розрахунковий опір ущільнених ґрунтів й осідання фундаментів на них як випадкових функцій, виконувати математичне моделювання геотехнічних задач для штучних основ за допомогою МСЕ в імовірнісній постановці, а в перспективі – оцінювати рівень надійності споруд як системи «ґрунтова подушка-фундамент-будівля» тощо.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Лычев, А. С. Надежность строительных конструкций [Текст] : учебное пособие / А. С. Лычев. – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 184 с.
2. Чирков, В. П. Прикладные методы теории надежности в расчетах строительных конструкций [Текст] / В. П. Чирков. – М.: Маршрут, 2006. – 620 с.
3. Надежность стальных конструкций производственных зданий [Текст] : монография / под ред. С. Ф. Пичугина. – Полтава: ООО «Асми», 2009. – 452 с.
4. Зоценко, М. Л. Використання «хвостів» Полтавського ГЗК при влаштуванні земляних споруд [Текст] / М. Л. Зоценко // Світ геотехніки. – 2005. – № 4. – С. 7-11.
5. Ермолаев, М. Н. Надежность оснований и фундаментов [Текст] / М. Н. Ермолаев, В. В. Михеев. – Л.: Стройиздат, 1976. – 152 с.
6. Маслов, Н. Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов [Текст] / Н. Н. Маслов. – М.: Высш. шк., 1982. – 511 с.
7. Крутов, В. И. Физико-механические характеристики неоднородных уплотненных грунтов [Текст] / В. И. Крутов, Н. Т. Танатаров // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1993. – № 3. – С. 2-5.
8. Пшеничкин, А. П. Определение вероятностных оценок физических и деформационных характе-

- ристик грунтовых полей [Текст] / А. П. Пшеничкин // Тр. межд. конф. по геотехнике «Взаимодействие сооружений и оснований: методы расчета и инженерная практика». – СПб.: АСВ, 2005. – Т. 2. – С. 323-329.
9. Look, B. Statistical models for reliability assessment of rock strength [Текст] / B. Look, V. Wijeyakulasuriya // Proc. of the 17th Int'l Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Alexandria, Egypt, 2009. – Amsterdam, Berlin, Tokyo, Washington: JOS Press, 2009. – P. 60-63.
 10. Mlynarec, Z. Statistical criteria of determination of homogenous geotechnical layers [Текст] / Z. Mlynarec, W. Tschuschke, J. Wierzbicki // Proc. of the 16th Int'l Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Rotterdam Mill press Science Publishers, 2005. – P. 725-728.
 11. Гольдштейн, М. Н. Механические свойства грунтов [Текст] / М. Н. Гольдштейн. – М.: Стройиздат, 1971...1979. – Т. I. – 1971. – 368 с., Т. II. – 1973. – 375 с., Т. III. – 1979. – 304 с.
 12. Бугров, А. К. Определение вероятностных характеристик активного давления грунта методом Монте-Карло [Текст] / А. К. Бугров, В. Г. Шилин // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2003. – № 5. – С. 92-94.
 13. Тимофеева, Л. М. О статистическом подходе к оценке прочности уплотненных лессовых грунтов [Текст] / Л. М. Тимофеева // Основания и фундаменты: межвуз. сб. науч. тр. – Пермь: ППИ, 1978. – С. 78-83.
 14. Чарушников, И. Г. Прочностные характеристики уплотненных просадочных грунтов Новосибирска [Текст] / И. Г. Чарушников, Я. Е. Шаевич // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1966. – № 5. – С. 10-11.
 15. Бальков, Б. И. Способ оценки представительности проб крупнообломочного грунта при инженерно-геологических изысканиях и геотехконтроле качества уплотнения [Текст] / Б. И. Бальков // Инженерная геология. – 2007. – С. 21-25.
 16. Винников, Ю. Л. К оценке неоднородности сложения грунтовых подушек [Текст] / Ю. Л. Винников, М. А. Харченко, А. В. Яковлев // Материалы V Межд. науч.-техн. конф. «Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов». – Волгоград: ВолГАСУ, 2009. – С. 193-200.
 17. Михеев, В. В. Расчет крупнопанельных зданий на статистически неоднородном основании [Текст] / В. В. Михеев, Г. Б. Рывкин, В. И. Шейнин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1975. – № 2. – С. 21-23.
 18. Гарагаш, Б. А. Надежность пространственных регулируемых систем «сооружение – основание» при неравномерных деформациях основания [Текст] / Б. А. Гарагаш. – Сочи: Кубанькино, 2004. – 908 с.
 19. Гагин, В. И. Расчет балок на многослойном стохастическом основании [Текст] / В. И. Гагин, П. М. Иванилов // Строительная механика и расчет сооружений. – 2006. – № 3. – С. 61-64.

Надійшла до редколегії 10.03.2010.

Прийнята до друку 17.03.2010.