

doi.org/10.29295/2311-7257-2021-104-2-151-158
УДК 624.137.5

Калмиків О.О., Халіфе Рабі

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
(вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002; e-mail: olegkalmikov010@gmail.com;
Sama4eng@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7294-4279>; <https://orcid.org/0000-0002-8800-0325>)

НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМИ «СИПУЧЕ ТІЛО – КОНСТРУКЦІЯ» У ВИПАДКУ ПРЯМОЛІНІНОЇ ТА КРИВОЛІНІЙНОЇ СТІНИ

У статті розглянуто питання щодо визначення надійності системи «сипуче тіло – конструкція» у випадку прямолінійної та криволінійної стінки. Враховуючи результати попередніх експериментальних досліджень напружено-деформованого стану двох таких систем, отримані значення узагальнених коефіцієнтів запасу таких систем та визначено надійність систем проти зсуву. Попередньо з'ясовано загальна стійкість системи за методом кругло циліндричних поверхонь. З'ясовано, що рівень надійності для обох запропонованих розрахункових схем високий, але все ж таки вищий у випадку криволінійного обрису підпірної стіни, також вищим є узагальнений коефіцієнт запасу. Результати даних досліджень можуть бути використані для вирішення задач надійності, пов'язаних з роботою систем «сипуче тіло – конструкція».

Ключові слова: надійність, система «сипуче тіло – конструкція», зсув, метод кругло циліндричних поверхонь, коефіцієнт варіації, характеристика безпеки, коефіцієнт запасу.

Вступ. Під *надійністю* розуміють здатність об'єкта виконувати задані функції протягом заданого проміжку часу [1]. Поширюючи термін надійності на систему «сипуче тіло – конструкція», зауважимо, що дана система повинна виконувати функції забезпечення потреб життєдіяльності населення протягом розрахункового терміну служби, зберігаючи у встановлених режимах експлуатаційні та конструктивні показники в заданих режимах роботи та в умовах експлуатації, технічного обслуговування і ремонту. У стандарті ISO 2394 [2] формулювання *надійності* звучить так – це здатність конструкції відповідати встановленим вимогам в заданих умовах протягом її передбаченого терміну експлуатації.

До комплексної властивості надійності розглянутої складної системи належить стабільність показників якості та ефективності її функціонування, яка залежить від надійності конструкцій і систем, тобто, в нашому випадку, це збереження міцності елементів і вузлів з'єднань підпірної стіни при будь-яких можливих впливах (і їх поєднанні), забезпеченість несної здатності ґрунту основи стіни, стійкість стіни внаслідок: плаского зсуву в рівні підошви, крену, повороту, зміщення при глибинному зсуві та а також відсутність перевищення нормативних значень деформацій основи стіни.

Відомий документ Об'єднаного комітету з надійності конструкцій (JCSS) «Імовірнісні модельні норми JCSS» [3] рекомендує використовувати імовірнісні методи оцінки конструктивної надійності; в цьому ж документі описуються моделі основних змінних і методів імовірнісної оцінки.

Сучасна теорія надійності складних технічних систем дозволяє отримати кількісну оцінку надійності та безпеки будівельних конструкцій і споруд. Теорія надійності стала бурхливо розвиватися після впровадження методу граничних станів, що базується на роботах М.С. Стрелецького, О.О. Гвоздева, В.М. Келдиша, Й.І. Гольденבלата [4]. Основи теорії надійності були започатковані в роботах В.В. Болотіна, М.Н. Гольдштейна, М.М. Єрмолаєва, В.В. Михеєва, К. Капура, К. Корнелла, Л. Ламберзона, М.Ф. Хоциалова, Ф.М. Фрейденталя [5]. Прикладні задачі теорії надійності розглянуто в роботах Г. Аугусті, А. Баратта, Б.І. Беляєва, А.Н. Бирбраєра, Ф. Кашиаті, В.Д. Костюкова, Б.Е. Кочеткова, Б.П. Макарова, Н.Р. Моргенштерна, А.В. Перельмутера, М.М. Складнева, Б.Й. Снаркиса, С.А. Тімашева, П.І. Яковлева [6-8].

Розвиток імовірнісних методів продовжили такі вчені, як Л.С. Авіром, М.Б. Краковський, О.П. Кудзис, О.С. Личов, В.Д. Райзер, В.П. Чирков [9-13].

В Україні варто відзначити роботи А.Я. Барашикова, О.І. Вайнберга, Ю.Л. Винникова, О.П. Воскобійник, О.В. Кічасвої, А.І. Лантуха-Ляценка, А.В. Махінька, А.О.

Мозгового, В.А. Пашинського, С.Ф. Пичугіна, О.В. Семка, Д.В. Стефанишина, С.Б. Усаковського, О.В. Школи та інших [14-19].

Актуальність. Підпірні стінки є одними з широко розповсюджених будівельних конструкцій. Вони застосовуються для улаштування підземних переходів і тунелів, кріплення будівельних котлованів та траншей, утворюють причальний фронт морських та річних портів, є важливим елементом гідротехнічних споруд, слугують огороженням водоймищ. Широке застосування підпірні стінки мають у автодорожньому будівництві, є спорудами у залізничному транспорті, використовуються в якості протизсувних та берегоукріплювальних споруд, є важливими елементами ландшафтного дизайну.

Постійно ведуться наукові дослідження з ціллю удосконалення конструкцій, методів розрахунку, способів зведення та експлуатації підпірних стін. На заміну дорогим конструкціям гравітаційного типу прийшли економічні тонкостінні споруди. Тонкостінні підпірні стіни є складними системами за схемою своєї роботи і взаємодії з ґрунтами основи та засіпки, при цьому, їх технічний стан в значній мірі залежить від режиму експлуатації.

У свою чергу, можливості сучасних програмних комплексів сприяють більшому розумінню роботи складної системи типу «сипуче тіло – конструкція» та встановлення її дійсного напружено-деформованого стану.

Наведений аналіз стану проблеми дає змогу стверджувати, що дослідження, яке присвячене підходам до визначення надійності системи «сипуче тіло – конструкція» є своєчасною, актуальною та матиме суттєвий соціально-економічний ефект.

Матеріали і методи досліджень. Запропоновані методики та проведені розрахунки повністю узгоджуються з існуючими нормативними документами та науковими дослідженнями автора [20]. Результати наданих розрахунків підтверджуються даними результатів експерименту, які були проведені в лабораторних умовах, стандартними і оригінальними методами фізико-механічних випробувань, а також комплексом сучасних методів математичного аналізу.

Мета дослідження. Основною метою даної роботи є визначення надійності системи «сипуче тіло – конструкція» у випадку прямолінійної та криволінійної стіни.

Результати досліджень. Надійність елемента визначимо через характеристику безпеки, яка вводиться через характеристики розподілу R та Q , де R є випадковою змінною і уособлює собою узагальнений опір елемента; Q – випадкова змінна – узагальнене навантаження елемента:

$$\beta = \frac{\mu_S}{\sigma_S}, \quad (1)$$

де μ_S – середнє значення узагальненого резерву опору елемента; σ_S – середнє квадратичне відхилення (стандарт) узагальненого резерву опору елемента.

Замінивши μ_S та σ_S характеристиками розподілу ($\mu_R - \mu_Q$) та ($\sigma_R - \sigma_Q$) маємо:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}}, \quad (2)$$

де ($\mu_R - \mu_Q$) та ($\sigma_R - \sigma_Q$) є характеристиками розподілу узагальнених опору R та навантаження Q .

Надійність, як ймовірність не перевищення граничного стану, можна записати, використавши співвідношення:

$$P = \Phi \left[\frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \right] = \Phi(\beta), \quad (3)$$

де Φ – функція нормального розподілу.

Початковими даними для визначення β елемента у даному випадку є моменти: момент зсуваючий та момент утримуючий, механічні характеристики матеріалів. Параметрами, що відображають імовірнісну природу факторів напружено-деформованого стану елемента, є коефіцієнти варіації характеристик міцності матеріалів, ґрунтів та навантаження.

В практичних розрахунках є більш зручним виразити шукані випадкові змінні через їх коефіцієнти варіації – V_i . Тоді залежність (2) буде мати вид:

$$\beta = \frac{\gamma_0 - 1}{\sqrt{V_R^2 \gamma_0^2 + V_Q^2}}, \quad (4)$$

V_R – коефіцієнт варіації узагальненого навантаження елемента; V_Q – коефіцієнт узагальненої опірності елемента; γ_0 – математичне очікування узагальненого коефіцієнту запасу.

$$V_R = \frac{\sigma_R}{\mu_R}; \quad (5)$$

$$V_Q = \frac{\sigma_Q}{\mu_Q}; \quad (6)$$

$$\gamma_0 = \frac{\mu_R}{\mu_S}. \quad (7)$$

Значення математичних очікувань μ_R та μ_S отримуються через відповідні характеристичні значення. Для зручності обчислень вводяться коефіцієнти переходу від характеристичних величин до математичних очікувань. Ці коефіцієнти позначаються літерою B з відповідними індексами:

$$B_Q = \frac{1}{(1+1,64V_S)}, \quad B_R = \frac{1}{(1-1,64V_R)}, \quad (8)$$

де V_R і V_Q – те ж, що і у формулі (4);

Після визначення математичного очікування реального коефіцієнта запасу (7) за виразом (4) знаходиться шукана характеристика безпеки. Зведемо у таблицю усі коефіцієнти варіації для статистичної моделі підпірної стінки з ґрунтом (табл. 1).

Таблиця 9 – Статистична модель системи «сипуче тіло – конструкція» – коефіцієнти варіації

Фактори	Позначення коефіцієнтів	Коефіцієнти варіації	
		проектні	реальні
Геометричні характеристики			
Поперечні елементи	V_{R1}	0,0237	0,0237
Моменти опору	V_{R2}	0,0229	0,0329
Матеріали			
Ґрунт	V_{R3}	0,08	0,10
Навантаження і впливи			
Власна вага плити	V_{Q4}	0,033	0,033
Вага ґрунту в засипці	V_{Q5}	0,08	0,10
Тимчасове навантаження	V_{Q6}	0,150	0,170

Визначення характеристики безпеки та надійності для системи з прямолінійною стінкою. У результаті попередніх розрахунків загальної стійкості системи «сипуче тіло – конструкція», виконаних методом круглоциліндричних поверхонь за допомогою програми GEO-5 (рис. 1), отримані значення зсуваючого та утримуючого моментів системи, що дорівнюють $M_{зс}^1 = 8527,42$ кНм/м, $M_{утр}^1 = 13247,04$ кНм/м.

Прийmemo, що характеристики узагальненого опору та узагальненого навантаження підпорядковуються нормальному закону. Перейдемо від характеристичних величин до математичних очікувань, обчислив коефіцієнти переходу за формулами (2, 3). Узагальнений коефіцієнт варіації несної здатності та узагальнений коефіцієнт варіації навантаження обчислюємо у відповідності до формули:

$$V_{\Sigma} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_3^2} . \quad (8)$$

$$\text{Тоді } V_R = \sqrt{(V_{R1}^2 + V_{R2}^2 + V_{R3}^2)} = \sqrt{(0,0237^2 + 0,0229^2 + 0,1^2)} = 0,046,$$

$$V_Q = \sqrt{(V_{Q4}^2 + V_{Q5}^2 + V_{Q6}^2)} = \sqrt{(0,03^2 + 0,01^2 + 0,17^2)} = 0,199,$$

де V_i – позначення коефіцієнтів варіації за табл. 1.

Результати розрахунків зведемо до табл. 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунків для системи з прямолінійною стінкою

V_R	V_Q	B_Q	B_R	μ_Q , кНм/м	μ_R , кНм/м	γ	β
0,046	0,199	0,753	1,081	6425	14320	2,229	5,486

Значення надійності, якому відповідає знайдене значення характеристики безпеки, дорівнює $P_i = 0,99999$.

Узагальнений коефіцієнт запасу дорівнює

$$\gamma = \frac{R}{Q} = \frac{13247,04}{8527,42} = 1,553 > 1,5.$$

Реалізацію алгоритму розрахунку надійності виконано у середовищі MathCAD.

На рис. 1 представлено візуалізацію розрахункової схеми «сипуче тіло – конструкція прямолінійної стінки» у програмі GEO-5, на рисунку 2 – експериментальна установка системи з прямолінійною стінкою.

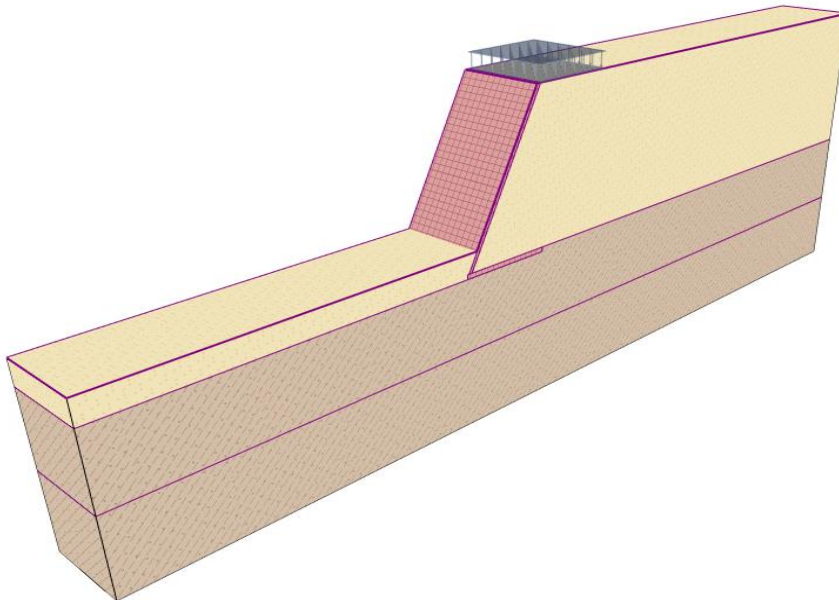


Рис. 1. Візуалізація розрахункової схеми «сипуче тіло – конструкція прямолінійної стінки» у програмі GEO-5

Визначення характеристики безпеки та надійності для системи з криволінійною стінкою. У результаті попередніх розрахунків загальної стійкості системи «підпірна стінка – ґрунт», виконаних методом кругло циліндричних поверхонь за допомогою програми GEO-5 (рис. 2), отримані значення зсуваючого та утримуючого моментів системи, що дорівнюють $M_{зс}^2 = 8615,43$ кНм/м, $M_{утр}^2 = 13771,485$ кНм/м.



Рис. 2. Експериментальна установка з прямолінійною стінкою

Узагальнений коефіцієнт варіації несної здатності та узагальнений коефіцієнт варіації навантаження залишаються тими ж, що і для прямолінійної стінки: $V_R = 0,046$, $V_Q = 0,199$. Коефіцієнти B_Q та B_R також не змінюють значення.

Результати розрахунків зведемо до табл. 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунків для системи з криволінійною стінкою

V_R	V_Q	B_Q	B_R	μ_Q , кНм/м	μ_R , кНм/м	γ	β
0,046	0,199	0,753	1,081	6425	14320	2,229	5,486

Значення надійності, якому відповідає знайдене значення характеристики безпеки, дорівнює $P_i = 0,99999$.

Узагальнений коефіцієнт запасу дорівнює

$$\gamma = \frac{R}{Q} = \frac{13771,485}{8615,43} = 1,598 > 1,5.$$

Реалізацію алгоритму оцінки надійності виконано у середовищі MathCAD.

На рис. 3 представлено візуалізацію розрахункової схеми «сипуче тіло – конструкція криволінійної стінки» у програмі GEO-5, на рис. 4 – експериментальна установка системи з криволінійною стінкою. Результати розрахунків зведені у табл. 4.

Таблиця 4 – Результати розрахунків надійності системи «сипуче тіло – конструкція» за умови прямолінійної та криволінійної стінки

Найменування конструкції	β	Надійність, P	Узагальнений коефіцієнт запасу, γ
Прямолінійна стінка	5,486	$999,9999794 \cdot 10^{-3}$	1,553
Криволінійна стінка	5,739	$999,9999525 \cdot 10^{-3}$	1,598

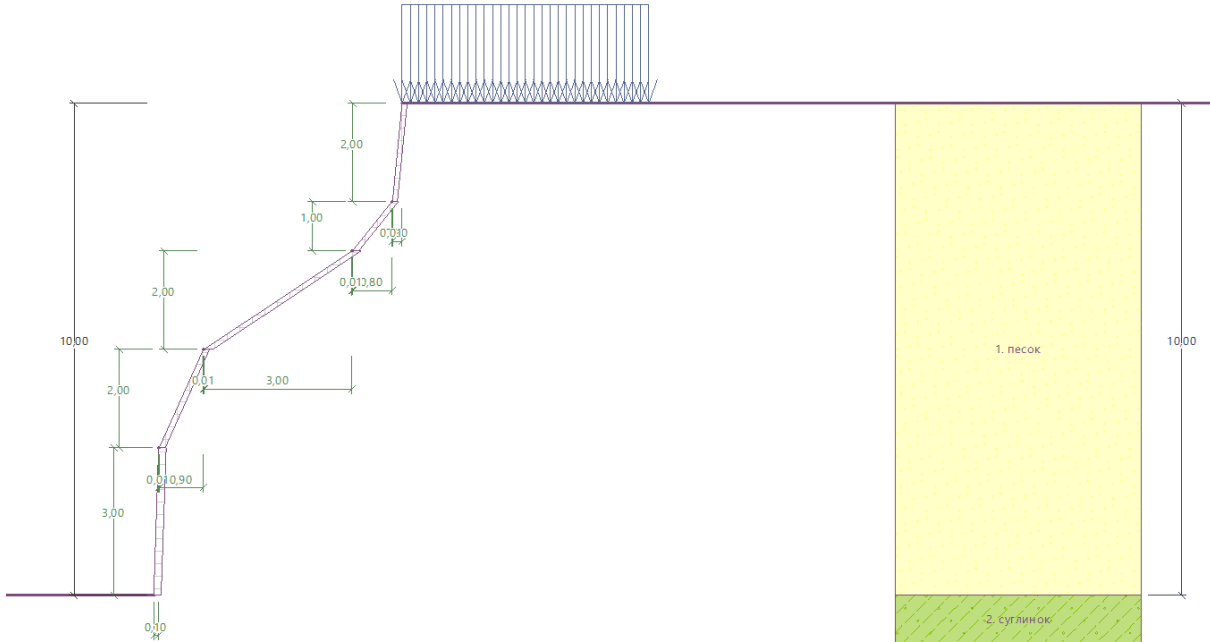


Рис. 3. Розрахункова схема системи «сипуче тіло – прямолінійна стінка» у програмі GEO-5



Рис. 4. Експериментальна установка з криволінійною стінкою

Висновки. Виконані розрахунки надійності системи «сипуче тіло – конструкція» для прямолінійної та криволінійної стінки. З'ясовано, що рівень надійності для обох запропонованих розрахункових схем високий, але все ж таки вищий у випадку криволінійного об'єкту підпірної стіни, також вищим є узагальнений коефіцієнт запасу.

На основі запропонованих методик розроблені алгоритми і складені комп'ютерні програми, які можуть бути використані для вирішення задач такого роду.

ЛІТЕРАТУРА:

1. ДБН В.1.2–14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2018. 36 с.
2. ISO 2394-1998. General principles on reliability for structures, Geneva: International Organization for Standardization, 1998. 73 p.
3. JCSS Probabilistic Model Code, Zurich: Joint Committee on Structural Safety, 2001. URL: www.jcss.byg.dtu.dk.
4. Гвоздев А.А. Расчет несущей способности конструкции по методу предельного равновесия. М.: Стройиздат, 1949. 132 с.
5. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1971. 255 с.
6. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. М.: Изд-во АСВ, 2007. 185 с.
7. Складнев Н.Н. О методических принципах вероятностного расчета строительных конструкций. М.: Строительная механика и расчет сооружений. 1986. Вып. № 3. С. 12-16.
8. Тимашев С.А. Надежность больших механических систем. М.: Наука, 1982. 184 с.
9. Авиром Л.С. Надежность конструкций сборных зданий и сооружений. М.: Стройиздат, 1971. 216 с.
10. Краковский М.Б. Надежность конструкций, проектируемых по советским и зарубежным нормам. Бетон и железобетон. 1986. вып. №6. С. 38-41.
11. Лычев А.С. Надежность строительных конструкций: учебное пособие. М.: Изд-во АСВ, 2008. 184 с.
12. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании: монография. М.: Изд-во АСВ, 1998. 304 с.
13. Чирков В.П. Прикладные методы теории надежности в расчетах строительных конструкций: учебное пособие. М.: Маршрут, 2006. 620 с.
14. Барашиков А. Я., Сирота М.Д. Надійність будівель і споруд: навчальний посібник. К.: ІСДО, 1993. 204 с.
15. Вайнберг А.И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений. Избранные проблемы: монография. Харьков, 2008. 304 с.
16. Винников Ю.Л., Харченко М.О. Імовірнісні методи в геотехніці. Збірник наукових праць

REFERENCES:

1. DBN V.1.2–14:2018. Zagalni principi zabezpechennya nadijnosti ta konstruktivnoyi bezpeki budivel, sporud, budivelnih konstrukcij ta osnov. K.: Ministerstvo regionalnogo rozvitku ta budivnictva Ukrayini, 2018. 36 s.
2. ISO 2394-1998. General principles on reliability for structures, Geneva: International Organization for Standardization, 1998. 73 p.
3. JCSS Probabilistic Model Code, Zurich: Joint Committee on Structural Safety, 2001. URL: www.jcss.byg.dtu.dk.
4. Gvozdev A.A. Raschet nesushej sposobnosti konstrukcii po metodu predelnogo ravnovesiya. M.: Strojizdat, 1949. 132 s.
5. Bolotin V.V. Primenenie metodov teorii veroyatnostej i teorii nadezhnosti v raschetah sooruzhenij. M.: Strojizdat, 1971. 255 s.
6. Perelmutter A.V. Izbrannye problemy nadezhnosti i bezopasnosti stroitelnyh konstrukcij. M.: Izd-vo ASV, 2007. 185 s.
7. Skladnev N.N. O metodicheskikh principah veroyatnostnogo rascheta stroitelnyh konstrukcij. M.: Stroitel'naya mehanika i raschet sooruzhenij. Vip. № 3. 1986. S. 12-16.
8. Timashev S.A. Nadezhnost bolshih mehanicheskikh sistem. M.: Nauka, 1982. 184 s.
9. Avirom L.S. Nadezhnost konstrukcij sbornyh zdaniy i sooruzhenij. M.: Strojizdat, 1971. 216 s.
10. Krakovskij M.B. Nadezhnost konstrukcij, proektiruemyh po sovetskim i zarubezhnym normam. Beton i zhelezobeton. 1986. vip. №6, S. 38-41.
11. Lychev A.S. Nadezhnost stroitelnyh konstrukcij: uchebnoe posobie. M.: Izd-vo ASV, 2008. 184 s.
12. Rajzer V.D. Teoriya nadezhnosti v stroitel'nom proektirovanii: monografiya. M.: Izd-vo ASV, 1998. 304 s.
13. Chirkov V.P. Prikladnye metody teorii nadezhnosti v raschetah stroitelnyh konstrukcij: uchebnoe posobie. M.: Marshrut, 2006. 620 s.
14. Barashikov A. Ya., Sirota M.D. Nadijnist budivel i sporud: navchalnij posibnik. K.: ISDO, 1993. 204 s.
15. Vajnberg A.I. Nadezhnost i bezopasnost gidrotehnicheskikh sooruzhenij. Izbrannye problemy: monografiya. Kharkov, 2008. 304 s.
16. Vinnikov Yu.L., Harchenko M.O. Imovirnisni metodi v geotehnici. Zbirnik naukovih prac PNTU. Poltava: PNTU, 2015. Vip. №1(43). S. 93- 111.

- ПНТУ. Полтава: ПНТУ, 2015. Вип. №1 (43). С. 93-111.
17. Лантух-Лященко А.І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: збірник наукових праць. Київ: Український транспортний університет, 1999. Вип. 57. С. 183-188.
 18. Пашинський В.А. Атмосферні навантаження на будівельні конструкції для території України. К. «Сталь», 1999. 185 с.
 19. Усаковский С.Б. Прикладные задачи теории сооружений. О новой парадигме теории расчета сооружений: монография. К.: КНУБА, 2014. 145 с.
 20. Халифе Р. та ін. Експериментальне дослідження тиску ґрунту на криволінійну бічну поверхню. XX міжнародний науково-практичний форум «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій». Львів. 2019. с. 34.
 17. Lantuh-Lyashenko, A.I. Ocinka nadijnosti sporudi za modellyu markovskogo vipadkovogo procesu z diskretnimi stanami. Avtomobilni dorogi i dorozhnye budivnictvo: zbirnik naukovih prac. Kiyiv: Ukrayinskij transportnij universitet, 1999. Vip. 57. S. 183-188.
 18. Pashinskij V.A. Atmosferni navantazhennya na budivelni konstrukciyi dlya teritoriyi Ukrayini. K. «Stal», 1999. 185 s.
 19. Usakovskij S.B. Prikladnye zadachi teorii sooruzhenij. O novej paradigme teorii rascheta sooruzhenij: monografiya. K.: KNUBA, 2014. 145 s.
 20. Halife R. ta in. Eksperimentalne doslidzhennya tisku gruntu na krivoliniynu bichnu poverhnyu. XX mizhnarodnij naukovo-praktichnij forum «Teoriya i praktika rozvitku agropromislovogo kompleksu ta silskih teritorij». Lviv. 2019. s. 34.

Kalmykov O.O., Khalife Rabie RELIABILITY OF THE SYSTEM "BULK MATERIAL - STRUCTURE" IN THE CASE OF RECTLINE AND CURVED WALL. This article considers the issue of determining the reliability of the system "loose body - structure" in the case of a straight and curved wall. Taking into account the results of previous experimental studies of the stress-strain state of two such systems, the values of the generalized stock coefficients of such systems are obtained and the reliability of the systems against shear is determined. The general stability of the system was previously determined by the method of round cylindrical surfaces. It was found that the level of reliability for both proposed calculation schemes is high, but still higher in the case of a curved outline of the retaining wall, and the generalized stock factor is also higher. The results of these studies can be used to solve reliability problems associated with the operation of systems "bulk body - structure".

Key words: reliability, system "loose body - structure", shear, method of circular cylindrical surfaces, coefficient of variation, safety characteristic, stock coefficient.