

С. Й. Солодкий, Н. І. Топилко, Ю. В. Турба, О. Я. Гримак, Ю. Л. Новицький  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра автомобільних доріг та мостів

## ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ЦЕМЕНТОГРУНТУ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

© Солодкий С. Й., Топилко Н. І., Турба Ю. В., Гримак О. Я., Новицький Ю. Л., 2017

Для забезпечення довготривалої міцності та підвищення несучої здатності глинистих ґрунтів рекомендовано проводити їх зміцнення в'язучими матеріалами: вапном та цементом. Для забезпечення надійності основи пропонують виконувати ущільнення ґрунту до максимального значення щільності скелету ґрунту при вологості, яка відповідає максимальній кількості зв'язаної води. Основні показники якісного ущільнення ґрунту встановлювали шляхом лабораторних випробувань за тестом Проктора (ASTM D 698-91). Для подальшого вивчення впливу в'язучих матеріалів на фізико-механічні показники ґрунту, були проведені випробування визначення міцності на стиск зразків ґрунту у віці 14 та 28 діб. Доведено, що такий матеріал володіє вищою міцністю та здатний витримувати 14 циклів заморожування та відтавання без руйнування структури та деяким збереженням міцності. На основі цих даних підібрано оптимальний склад цементогрунту.

**Ключові слова:** цементогрунт, максимальна щільність сухого ґрунту, оптимальна вологість ґрунту, границя міцності на одноосьовий стиск.

S. Solodky, N. Topylko, Yu. Turba, O. Hrymak, Y. Novytskij  
Lviv Polytechnic National University,  
department of Highways and Bridges

## OPTIMIZATION OF THE CEMENT COMPOUNDS WITH THE AIM OF INCREASE OF ITS PHYSICAL-MECHANICAL INDICATORS

© Solodky S., Topylko N., Turba Yu., Hrymak O., Novytskij Y., 2017

In order to ensure long-term durability and increase the bearing capacity of clay soils, it is recommended to strengthen them with binder materials. For this purpose, lime and cement are used as binder materials. In order to ensure the reliability of the base, it is recommended to compact the soil to the maximum value of the soil skeleton density at humidity, which corresponds to the maximum number of bound water. The main indicators of good soil compaction (maximum soil particle density, which corresponds to the optimal soil moisture content) were determined by laboratory tests on Proctor's test (ASTM D698-91). For further study of the influence of binder materials on the physical and mechanical parameters of the soil, the tests for the determination of strength on the compression of soil samples at the age of 14 and 28 days were carried out. It is proved that such material has a higher strength and can withstand 14 cycles of freezing and thawing without destroying the structure and some preservation of the strength, due to the creation of high-alumina environment in which the strong water-resistant minerals are synthesized. On the basis of these data, the optimal composition of soil cement was selected.

**Key words:** soil cement, maximum density of dry soil, optimal soil moisture, ultimate tensile strength of the uniaxial compression.

**Вступ.** У дорожньому будівництві стали поширеними ґрунти, укріплені цементом – цементогрунт. Позитивною властивістю цементогрунту є утворення в основі земляного полотна

міцної монолітної плити, яка має достатню несучу здатність і жорсткість та здатна сприймати силові дії від рухомого навантаження. Науковими дослідженнями встановлено, що у ґрунти зі значним вмістом гумусу або (та) підвищеною вологістю доцільно вводити вапно, що дозволяє знизити вологість та підвищити міцність ґрунту-основи. Також, однією з умов довготривалої служби автомобільної дороги є якісне ущільнення ґрунту з метою покращення його будівельних властивостей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У випадку будівництва доріг на структурно-нестійких ґрунтах необхідно проводити низку заходів щодо їх зміцнення. Існує чимало методів зміцнення слабких ґрунтів. Так, для глинистих ґрунтів добре себе зарекомендував метод зміцнення в'язучими матеріалами. При введенні в ґрунт в'язучих матеріалів, останні активно вступають у хімічну і фізико-хімічну взаємодію з тонкодисперсними частками глинистого ґрунту, внаслідок чого утворюється штучний матеріал – цементоґрунт із покращеними фізико-механічними властивостями [1].

Повнота проходження хімічних реакцій між ґрунтом і цементом залежатиме від вологості, вмісту (%) в'язучої речовини, ступеня однорідності та ущільнення цементо-ґрунтової суміші, тривалості твердіння ущільненого матеріалу, температури та вологості навколишнього середовища [1, 2]. У випадку недостатньої вологості цементо-ґрунтової суміші вже у затверділому матеріалі можна спостерігати високий вміст непрореагованих зерен в'язучого, котрі виконують роль інертного заповнювача. За вмісту води понад норму, необхідну для проходження хімічної реакції між цементом та ґрунтом, в матеріалі формується висока кількість пор, а при його висушуванні розвиваються деформації усадки. В обох випадках виготовлений цементоґрунт буде характеризуватися низькою міцністю, високою водопроникністю і низькою морозостійкістю. Крім того, від вологості цементо-ґрунтової суміші залежить її здатність до ущільнення під навантаженням. Встановлено, що концентрація цементу є оптимальною до певної величини. За вищих значень значно зростають деформації усадки і утворення тріщин у цементоґрунті.

Ступінь однорідності суміші залежить від режиму перемішування її компонентів, технологічних характеристик техніки. При цьому, що вища дисперсність, то складніше отримати гомогенну (однорідну) структуру цементоґрунту через утворення флокул – пухких грудок-агрегатів з оболонкою із цементу і ядром із ґрунту. Це викликає анізотропію (неоднаковість) властивостей отриманого матеріалу і низьку його якість [1].

Ступінь ущільнення суміші істотно впливає на процеси структуроутворення в цементоґрунті, його пористість, водо- і морозостійкість, механічну міцність, і, в кінцевому результаті, на його довговічність. При максимальному ущільненні суміші з її об'єму витісняється надлишкове повітря, зменшується товщина водяних плівок, перерозподіляється рідка фаза і тверді частки, в результаті чого формується щільніша упаковка, зростає кількість і площа контактів між цементом і ґрунтом [3].

Головними хімічними, фізико-хімічними факторами, що впливають на якість цементоґрунту, є: мінеральний і гранулометричний склад ґрунту, його органічна складова, рН реакція середовища [1]. Глинисті ґрунти характеризуються полімінеральним складом, в який входять, головним чином, уламкові (піщані), пилуваті частки і тонкодисперсні глинисті мінерали. Особливий вплив на якість цементоґрунту мають глинисті мінерали [4].

Основними мінералами глини є каолініт, монтморилоніт, гідрослюда, рідше трапляються польові шпати і хлорити. При цьому характер взаємодії ґрунтів з в'язучими і міцність одержуваного матеріалу залежить і від виду переважаючого мінералу, і від його кількісного співвідношення в складі ґрунтів [1]. Серед глинистих мінералів переважає каолініт. Це доволі стійкий двошаровий мінерал, що має жорстку кристалічну решітку і характеризується низьким ступенем набухання при зволоженні водою, а також невисокою іонно-обмінною здатністю. [6].

Найменш сприятливим є монтморилоніт, оскільки він володіє високою поглинальною здатністю (може в 10–20 разів збільшувати свій об'єм при зволоженні), високою дисперсністю (його розміри, як правило, перебувають у межах до 1 мкм), дуже високою пластичністю [7]. При вмісті монтморилоніта більше ніж 50 % від загальної маси у ґрунт додають легкорозчинні солі,

поверхнево-активні речовини, кремнійорганічні сполуки та ін. Вони адсорбуються на поверхні глинистих часток і утворюють захисні плівки, що перешкоджають набухання монтморилонітових глинистих фракцій при їх зволоженні [1].

Домішки у глинистих породах поділяють за таким типом: карбонатні, загіпсовані, з рослинними залишками (з вмістом 5–10 %) і ін. Ступінь карбонатності ґрунтів, передусім, впливає на значення їх міцності, оскільки високодисперсні карбонати утворюють міцні слабозрозчинні кристалізаційні зв'язки між частками глинистих ґрунтів. Вміст лужних реагентів (цементу, вапна) позитивно впливає на перебіг хімічних реакцій між компонентами цементно-ґрунтової суміші та отримання міцних цементоґрунтів. А от кислі реагенти створюють протилежну дію [1].

Органічна складова ґрунту представлена гумусом та є небажаною у їх складі, особливо, при зміцненні ґрунтів лужними реагентами, бо гумус встановлює кисле середовище ( $pH < 6$ ) [8].

Багаторічні дослідження Держдор НДІ України показали, що міцність дорожніх одягів з прошарками із зміцненого ґрунту не нижча, а в багатьох випадках вища, міцності дорожніх одягів з основами із щебеню та гравію. При цьому, рівність покриття, як правило, набагато вища, ніж на основах із кам'яних зернистих матеріалів. Окрім того, технологічні операції із влаштування основ з зміцнених ґрунтів прості у виконанні та можуть бути повністю механізовані. В результаті взаємодії неорганічних в'язучих та колоїдно-глинистої складової ґрунту утворюються матеріали, що мають підвищену морозостійкість і довговічність. Особливо це стосується комплексно зміцнених ґрунтів. Усе це свідчить про практичну необхідність та економічну вигідність широкого застосування різноманітних видів зміцнених ґрунтів при будівництві транспортної мережі [9].

Для забезпечення довготривалої міцності ґрунтів у дорожнього будівництві пропонується виконувати ущільнення до максимального значення щільності скелета ґрунту при вологості, яка відповідає максимальній кількості зв'язаної води. Встановлено, що зміна вологості чи щільності скелета ґрунту суттєво змінює показники його міцності. Тому для досягнення тривалої міцності ущільненого ґрунту, що є необхідним для тривалої експлуатації автомобільної дороги, слід забезпечити вимогу збереження в часі стабільної щільності скелета ґрунту й вологості [10]. Такі умови виконуються при ущільненні ґрунту до максимально можливої щільності при вологості, близькій до максимального вмісту зв'язаної води. Ущільнений таким чином ґрунт зберігає стабільні в часі щільність скелета ґрунту й вологість, що забезпечує тривалу міцність земляного полотна [11].

При ущільненні ґрунту нормують значення оптимальної вологості ( $W_{opt}$ ), при якій досягається максимальна щільність скелета ґрунту  $\rho_d$ . Переважно, ці дві величини визначають для конкретного виду ґрунту в лабораторії за більш сучасним та менш трудомістким тестом Проктора (ASTM D 698-91), принцип якого аналогічний до нормативного ДСТУ Б В.2.1-12: 2009. Зміна № 1. Ґрунти. Метод лабораторного визначення максимальної щільності. Однак, оптимальні параметри (максимальну щільність скелета ґрунту  $\rho_{dmax}$  і його оптимальну вологість  $W_{opt}$ ) визначають на підставі з отриманих у лабораторних умовах значень для конкретного виду ґрунту й параметрів динамічного навантаження приладу без урахування параметрів фактичних механізмів. Автори [12, 13] довели, що оптимальна вологість залежить від тиску, що створює техніка при ущільненні масивів. Підвищення фактичного тиску від механізмів на ґрунт призводить до збільшення значення щільності скелета ґрунту при одночасному зменшенні значення оптимальної вологості.

**Мета і завдання досліджень.** Мета представлених досліджень – вивчити фізико-механічні показники глинистого ґрунту, зміцненого вапном та лужним цементом при ущільнюючому навантаженні близькому до фактичного. Тому завданням дослідження було встановити оптимальний склад цементоґрунту, який володіє підвищеною несучою здатністю для використання в основі конструкції дорожнього одягу.

**Матеріали і методи досліджень.** Основним компонентом цементоґрунту є глинистий ґрунт. Згідно з ДСТУ Б В.2.1-17:2009 “Ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей” встановлено, що глинистий ґрунт представлений суглинком легким піщаним з показниками вологості на границі розкочування  $W_p=22\%$  та на границі текучості  $W_p=29,2\%$ .

Гранулометричний склад суглинку визначали ареометричним способом (ДСТУ Б В.2.1-19:2009 “Грунти. Методи лабораторного визначення гранулометричного (зернового) та мікроагрегатного складу”. Гранулометричний склад суглинку складають частки таких розмірів: 0,1-0,05мм. – 10,33 %; 0,05-0,01 мм – 42,98 %; 0,01-0,005 мм – 32,29 %; менше 0,005 мм – 14,4 %. Вміст органічних речовин у сухій масі складає 9,2 мас.%( ДСТУ Б В.2.1-16:2009. Зміна № 1. ГРУНТИ. Методи лабораторного визначення вмісту органічних речовин), а РН ґрунту – 8,34 (ISO 10390:2005, IDT).

В якості зміцнюючих компонентів вводили портландцемент ПЦ П/А-Ш-400 (ДСТУ Б В.2.7-46-96) ВАТ “Миколаївцемент” та соду кальциновану (ГОСТ 5100-85). Максимальну щільність скелету ґрунту при оптимальній вологості визначали за тестом Проктора (ASTM D 698-91). Границю міцності на стиск укріплених зразків ґрунту визначали згідно ДСТУ Б В.2.1-309:2016 “Грунти, укріплені в’язучим. Методи випробувань”, ДСТУ Б В.2.1-4:96 “Грунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості”, ДСТУ Б В.2.7-214:2009 “Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками”.

**Результати експериментальних досліджень.** На першому етапі дослідження було встановлено максимальну щільність скелету ґрунту при оптимальній вологості для неукріпленого суглинку легкого піщанистого. Визначення проводили за тестом Проктора (ASTM D 698-91). Внутрішній діаметр та висота прес-форми становить 101,6 мм та 116,4 мм, відповідно. Кількість шарів у прес-формі, що ущільнюються – 5, число ударів по кожному шарі ґрунту – 25. Маса ущільнювального вантажу – 4,5 кг, а висота падіння – 457,2 мм.

З метою підвищення максимальної щільності скелету ґрунту при одночасному зменшенні оптимальної вологості у ґрунт вводили різні співвідношення вапна та вапна і цементу. Склад цементогрунту та результати дослідження приведені в табл. 1 та на рис. 1 і 2.

Таблиця 1

**Результати лабораторних випробувань цементогрунту за методом Проктора, для встановлення максимальної щільності сухого ґрунту при оптимальній вологості**

Номер випробування		1	2	3	4	5
Суглинок легкий піщанистий	Вологість ґрунту W (ч.о.)	0,15	<b>0,18/ W<sub>opt</sub></b>	0,192		
	Щільність сухого ґрунту $\rho_d$ г/см <sup>3</sup>	1,803	<b>1,869/ <math>\rho_{dmax}</math></b>	1,816		
Суглинок легкий піщанистий + 4 % вапна	Вологість ґрунту W (ч.о.)	0,147	<b>0,149/ W<sub>opt</sub></b>	0,166		
	Щільність сухого ґрунту $\rho_d$ г/см <sup>3</sup>	1,861	<b>1,890/ <math>\rho_{dmax}</math></b>	1,840		
Суглинок легкий піщанистий + 7 % вапна	Вологість ґрунту W (ч.о.)	0,126	0,138	0,144	<b>0,157/ W<sub>opt</sub></b>	0,175
	Щільність сухого ґрунту $\rho_d$ г/см <sup>3</sup>	1,799	1,800	1,841	<b>1,844/ <math>\rho_{dmax}</math></b>	1,801
Суглинок легкий піщанистий + 10 % вапна	Вологість ґрунту W (ч.о.)	0,126	<b>0,140/ W<sub>opt</sub></b>	0,154		
	Щільність сухого ґрунту $\rho_d$ г/см <sup>3</sup>	1,770	<b>1,828/ <math>\rho_{dmax}</math></b>	1,805		
Суглинок легкий піщанистий + 7 % вапна + 4 % цементу	Вологість ґрунту W (ч.о.)	0,119	<b>0,142/ W<sub>opt</sub></b>	0,153		
	Щільність сухого ґрунту $\rho_d$ г/см <sup>3</sup>	1,824	<b>1,845/ <math>\rho_{dmax}</math></b>	1,799		
Суглинок легкий піщанистий + 7 % вапна + 7 % цементу	Вологість ґрунту W (ч.о.)	0,14	<b>0,156/ W<sub>opt</sub></b>	0,177	0,198	0,219
	Щільність сухого ґрунту $\rho_d$ г/см <sup>3</sup>	1,748	<b>1,757/ <math>\rho_{dmax}</math></b>	1,737	1,735	1,632
Суглинок легкий піщанистий + 7 % вапна + 10 % цементу	Вологість ґрунту W (ч.о.)	0,140	<b>0,147/ W<sub>opt</sub></b>	0,167	0,187	0,226
	Щільність сухого ґрунту $\rho_d$ г/см <sup>3</sup>	1,812	<b>1,821/ <math>\rho_{dmax}</math></b>	1,803	1,778	1,697

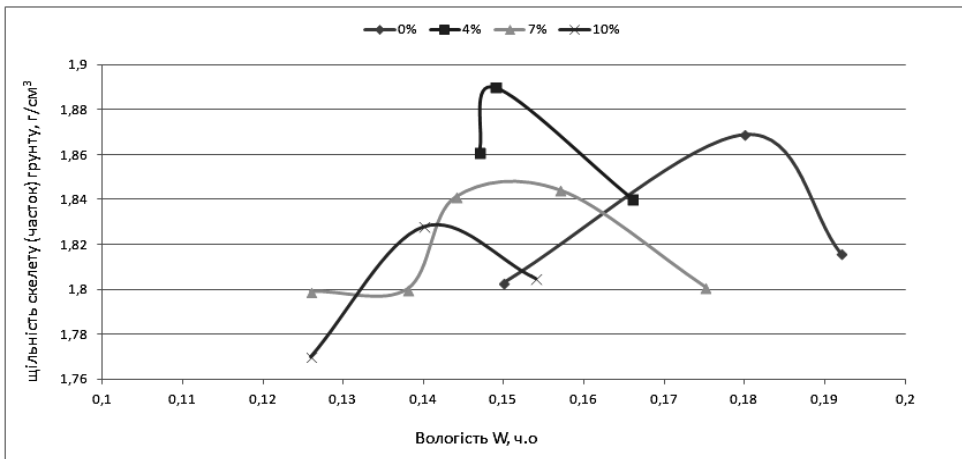


Рис. 1. Залежність щільності скелету ущільненого суглинку укріпленого вапном від вологості

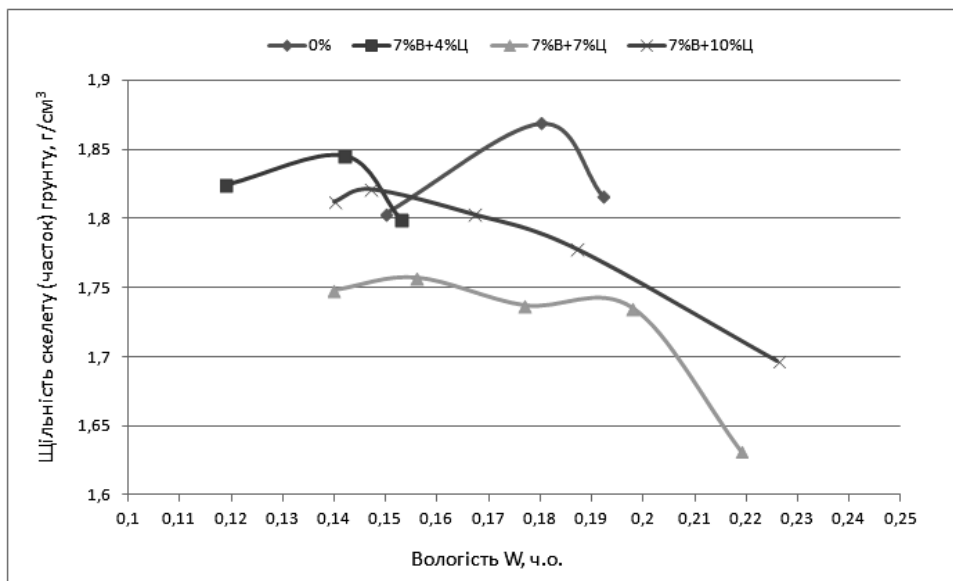


Рис. 2. Залежність щільності скелету ущільненого суглинку укріпленого вапном і цементом від вологості

Рис. 3. Прилади Проктора з ручними трамбівками для приготування зразків для визначення фізико-механічних показників



Як бачимо, згідно з даними табл. 1 та рис. 1, 2 оптимальним складом, за якого оптимальна вологість зменшується, а щільність сухого ґрунту зростає, є суглинок легкий піщанистий + 4 % вапна та Суглинок легкий піщанистий + 7 % вапна + 4 % цементу. Це можна пояснити тим, що вапно “забирає” вільно зв’язану воду. При цьому максимально можлива щільність досягається при вологості, максимального близькій до вмісту зв’язаної води. Ущільнений таким чином ґрунт зберігає стабільні у часі щільність скелета ґрунту й вологість, що забезпечує тривалу міцність земляного полотна. Проте, потрібно врахувати те, що у ґрунті укріпленого вапном та цементом будуть синтезуватись силікатні мінерали і із часом такий цементоґрунт буде характеризуватись набором міцності. Тому, для більш точного визначення оптимального складу цементоґрунту доцільним є встановити характеристики міцності.

Для подальшого вивчення впливу в’язучих матеріалів на фізико-механічні показники ґрунту, були проведені випробування для визначення міцності на стиск зразків ґрунту, у віці 14 та 28 діб. Зразки ґрунту готували згідно з ДСТУ Б В.2.1-309:2016 “Ґрунти, укріплені в’язучим. Методи випробувань”, з використанням приладів Проктора з ручними трамбівками (рис. 3). Результати випробувань наведено у табл. 2.

Таблиця 2

**Результати випробувань границі міцності на одноосьовий стиск цементоґрунту**

Склад цементоґрунту	Міцність на стиск, МПа, у віці, діб		
	14 діб, (Н.У.)	28 діб, (Н.У.)	14 діб, (Н.У.) + 14 циклів заморожування-відтавання
Суглинок легкий піщанистий + 4 % вапна	3,65	3,47	-
Суглинок легкий піщанистий + 7 % вапна	4,58	4,51	-
Суглинок легкий піщанистий + 10 % вапна	3,32	3,17	-
Суглинок легкий піщанистий + 7 % вапна + 4 % цементу	3,99	6,11	-
Суглинок легкий піщанистий + 7 % вапна + 7 % цементу	4,25	6,89	3,125
Суглинок легкий піщанистий + 7 % вапна + 10 % цементу	4,55	6,25	3,99

Згідно з даними табл. 2 найоптимальнішим складом цементоґрунту, котрий володіє підвищеними значеннями міцності та витримує 14 циклів заморожування та відтавання без руйнування та деяким збереженням міцності, є склад – суглинок легкий піщанистий + 7 % вапна + +10 % цементу. Це свідчить про те, що у такому цементоґрунті переважає високолувне середовище, яке створюється лужним цементом та підсилюється вапном. Як наслідок у такому середовищі активуються процеси синтезу силікатних мінералів, а ґрунт перетворюється у міцний водостійкий камінь.

**Висновок.** Встановлена висока ефективність зміцнення суглиноків вапном та цементом. Доведено, що такий матеріал володіє вищою міцністю та здатний витримувати 14 циклів заморожування та відтавання без руйнації структури та деяким збереженням міцності. На основі цих даних підібраний оптимальний склад ґрунтоцементу. В результаті проведених досліджень суглинок легкий піщанистий зміцнений вапном та цементом може бути рекомендованим в якості земляного полотна автомобільних доріг.

1. Савицкий Н. В. Факторы, влияющие на качество ґрунтобетонів / Н. В. Савицкий, М. А. Елисеєва, Н. В. Новиченко, Е. А. Бардах // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. – Д. : ГВУЗ ПГАСА, 2015. – Вып.81. – С. 177–184. 2. Укрепленные ґрунты. (Свойства и применение в дорожном и аэродромном строительстве) / [Безрук В. М., Гурычков И. Л., Луканина Т. М., Агапова Р. А.]. – М. : Транспорт, 1982. – 231 с. 3. Жигайлов А. А. Влияние степени уплотнения на основные характеристики цементоґрунта с полимерной добавкой / С. А. Куюков,

A. N. Shuvaev // *Научно-технический вестник Поволжья* : сбор. науч. ст. – Казань, 2011. – Вып. 5. – С. 131–134. 4. Щеглов А. Ф. *Грунтобетоны на основе глинистых пород КМА для дорожного строительства*: дис. ... кандидата техн. наук : 05.23.05 / Щеглов Александр Федорович. – Белгород, 2003. – 229 с. 6. Reddi L. N., *Soil materials for earth construction: properties, classification and suitability testing* / A. K. Jain, H.-B. Yun // *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications*.– Woodhead Publ. – 2012. – pp. 155–1715. 7. Минке Г. *Глинобетон и его применение*. – Калининград: Янтарный сказ, 2004. – 232 с. 8. Minke G. *The clay-containing concrete and its use*. – Kaliningrad: Yantarnyy skaz Publ., 2004. – 232 p. 9. Кожушко В. П. *Технологія та трудові витрати на будівництво дослідної ділянки із ґрунтів укріплених вапном з хімічною домішкою “Релаксол”* / В. П. Кожушко, Н. В. Грано, Д. М. Шпетний // *Будівництво* : зб.наук.пр. – Сумський аграрний університет, 2012 – Вип. 5 (16). – С. 32–35. 10. Винников Ю. Л. *Нові критерії оптимального ущільнення ґрунтів дорожнього насипу за умови забезпечення їх тривалої міцності* / Ю. Л. Винников, Т. В. Литвиненко // *Проблеми розвитку міського середовища* : зб. наук. пр. – Полтава:ПНТУ, 2014. – Вип.1 (11). – С. 424–433. 11. 1. Р В.2.3–218–02070915–757:2009. *Рекомендації з підвищення стійкості високих насипів автомобільних доріг*. – К.: Укравтодор, 2009. – 30 с. 12. Казарновский, В. Д. *Основы нормирования и обеспечения требуемой степени уплотнения земляного полотна автомобильных дорог* // В. Д. Казарновский, И. В. Лейтланд, В. К. Мирошкин. – М.: ФГУП “СоюздорНИИ”, 2002. – 33 с. 13. Біда, С. В. *Аналіз взаємозв'язку питомого об'єму скелета ґрунту та вологості з питомим опором статичної та динамічної penetрації* / С.В. Біда, Ю. Л. Винников, Т. В. Литвиненко // *Зб. наук. праць (галузеве машинобуд., буд-во)* / Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. Вип. – 3 (38). – Т.1. – Полтава: ПНТУ, 2013. – С. 57 – 63.

#### References

1. Savitskiy N. V. *Factory, vliyayushchiye na kachestvo gruntobetonov* / N. V. Savitskiy, M. A. Yeliseyeva, N. Novichenko, Ye.A. Bardakh // *Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye: Sb. nauch. tr.* – D.: GVUZ PGASA, 2015 – Vyp. 81. – S.177–184. 2. *Ukreplennyye grunty (Svoystva i primeneniye v dorozhnom i aerodromom stroitel'stve)* / [Bezruk V. M., Guryachkov I. L., Lukanin T. M., Agapova G. A.]. – М.: Transport, 1982. – 231 s. 3. Zhigaylovo A. A., *Vliyaniye stepeni uplotneniya na osnovnyye kharakteristiki tsementogrunta s polimernoy dobavkoy* / S. A. Kuyukov, A. N. Shuvayev // *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya: sbor. nauch. st.* – Kazan', 2011. – Vyp. 5. – S. 131–134. 4. Shcheglov A. F. *Gruntobeton na osnove glinistykh porod KMA dlya dorozhnogo stroitel'stva: Dis. ... kandidata tekhn. nauk: 05.23.05* / Shcheglov Aleksandr Fedorovich. – Belgorod, 2003. – 229 s. 6. Reddi L. N., *Soil materials for earth construction: properties, classification and suitability testing* / A. K. Jain, H.-B. Yun // *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications*.– Woodhead Publ. – 2012. – pp. 155–1715. 7. Minka G. *glinobeton i yego primeneniye*. – Kaliningrad: Yantarnyy beshenstvo, 2004. – 232 s. 8. Minke G. *The clay-containing concrete and its use*. – Kaliningrad: Yantarnyy skaz Publ., 2004. – 232 p. 9. Kozhushko V. P. *Tekhnologiya i trudovyye zatraty na stroitel'stvo opytnogo uchastka s pochv ukreplennykh izvest'yu s khimicheskoy primes'yu “Relaksol”* / V. P. Kozhushko, N. Grano, D. M. Shpetnyy // *Stroitel'stvo: Zb. nauk. pr.* – Sumskoy agrarnyy universitet, 2012 – Vyp. 5 (16). – S. 32–35. 10. Vinnikov YU.L. *Novyye kriterii optimal'nogo uplotneniya gruntov dorozhnoy nasypi pri uslovii obespecheniya ikh dlitel'noy prochnosti* / YU.L. Vinnikov, T. V. Litvinenko // *Problemy razvitiya gorodskoy sredy: Zb. nauk. pr.* – Poltava: PNTU, 2014. – Vyp.1 (11). – S. 424–433. 11. 1. R В.2.3-218-02070915-757: 2009. *Rekomendatsii po povysheniyu ustoychivosti vysokikh nasypov avtomobil'nykh dorog*. – М. : Ukravtodor, 2009. – 30 s. 12. Kazarnovskogo, V. D. *Osnovy normirovaniya i obespecheniya trebuyemoy stepeni uplotneniya zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog* / V. D. Kazarnovskogo, I. V. Leytland, V. K. Miroshkin. – М. : FGUP “Soyuzdornii”, 2002. – 33 s. 13. Beda S. *Analiz vzaimosvyazi udel'nogo ob'yema skeleta grunta i vlazhnosti s udel'nym soprotivleniyem staticheskoy i dinamicheskoy penetratsii* / S. V. Beda, YU.L. Vinnikov, T. V. Litvinenko // *Sb. nauk. rabot (otraslevoye mashinostroyeniya., str-vo)* / Polt. nats. tekhn. un-t im. Yuriya Kondratyuka. Vyp. – 3 (38). – Т. 1. – Poltava: PNTU, 2013. – S. 57–63.

## ОСНОВНІ СТОХАСТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ПРИ ОЦІНЮВАННІ НАДІЙНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК, ПІДСИЛЕНИХ ДОДАТКОВИМ АРМУВАННЯМ

© Титаренко Р. Ю., Хміль Р. Є., 2017

Сьогодні існує велика кількість наукових і технічних знань, завдяки яким будівництво стало надійним, швидким та економічним. Удосконалення методів розрахунку дає можливість науковцям і проєктантам створювати ефективні конструкції із заданим (доцільним) рівнем надійності, який безпосередньо впливає на кількість необхідних матеріалів і, відповідно, вартість майбутніх будівельних об'єктів загалом. У цій статті запропоновано аналітичну методику розрахунку показників оцінки надійності залізобетонних балок, підсиленних способом нарощування основного перерізу додатковою арматурою. Розроблена методика дозволяє враховувати з достатньо високою точністю ряд стохастичних параметрів (факторів), які ґрунтовані на експериментальних даних попередніх досліджень і тією чи іншою мірою впливають на фактичну роботу залізобетонних конструкцій в процесі їх експлуатації.

**Ключові слова:** надійність, безпека, ймовірність відмови, стохастичний параметр, підсилення, залізобетонна балка, методика.

R. Tytarenko, R. Khmil

Lviv Polytechnic National University,  
Department of building construction and bridges

## THE BASIC STOCHASTIC PARAMETERS IN ASSESSING OF THE RELIABILITY OF REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED BY ADDITIONAL REINFORCEMENT BARS

© Tytarenko R., Khmil R., 2017

Today there are many scientific and technical knowledge that make construction a reliable, fast and economical. To provides a safe and durable (the fundamental components of reliability) of buildings and structures are developed the methods of reliability theory. Improving the methods of calculation is enables researchers and designers to create effective structures with a preset (expedient) level of reliability, which directly affects to an amount of required materials and, appropriately, a cost of future building objects in general. In this paper the simple analytical method of calculation of indexes for assessing of reliability of reinforced concrete (RC) beams, strengthened with additional reinforcement bars is proposed. The developed method takes into account with a sufficiently high accuracy the number of the stochastic parameters (factors), based on the experimental data of previous investigations, and in any case affects on the actual work of RC structures during their operation. In addition, the list of scientific publications and normative literature, used in writing this article, is posted.

**Key words:** reliability, safety, probability of failure, stochastic parametr, strengthening, reinforced concrete beam, methodology

**Постановка проблеми.** На теперішній час підсилення різноманітних будівельних конструкцій є дуже актуальною науковою проблемою, насамперед, через економічну складову. Зростання темпів будівництва по всьому світу, зокрема й в Україні, а також активне впровадження



в практику підсилення конструкцій нових ефективних і, головне, швидкокомпонуючих матеріалів веде за собою раціональне використання існуючих будівель, елементи яких після переоснащення, відновлення чи реконструкції повністю б відповідали нинішнім стандартам і нормам проектування.

Своєю чергою, згадані чинні українські та європейські норми проектування [1, 2], які регламентують вимоги до розрахунку і проектування залізобетонних конструкцій будівель та споруд, формально не розглядають можливості виникнення аварій внаслідок стохастичних властивостей параметрів несучої здатності, діючих навантажень, а також геометричних розмірів конструктивних елементів. Крім того, метод граничних станів, концепція якого покладена в основу норм, не дозволяє провести кількісну оцінку надійності конструкцій і, тим більше, проектувати їх із заданим рівнем надійності. При цьому, коли безпосередній розрахунок показників надійності відсутній, можливе неврахування повною мірою сполучень розрахункових навантажень, що веде до проектування конструкцій з завищеною надійністю. Також, що значно гірше, існують випадки, коли застосування нормативної системи часткових коефіцієнтів надійності може призвести до того, що надійність елементів відповідальних будівель та споруд виявиться нижчою за надійність конструкцій будівель та споруд класу наслідків СС3 [5].

На основі цього можна констатувати, що розрахунок конструкцій як систем, що містять випадкові параметри, слід вести в ймовірнісній постановці на основі методів теорій ймовірностей та випадкових функцій. При цьому, гарантія ненастання граничного стану певного елемента будівлі чи споруди може бути забезпечена з визначеною ймовірністю – ймовірністю безвідмовної роботи.

Основними ж недоліками і перешкодами впровадження теорії надійності в практику проектування є складність математичного апарату, який використовується для вирішення задач, а також достатньо високий рівень суб'єктивності в трактуванні і введенні в ймовірнісний розрахунок тих чи інших стохастичних параметрів. Тому розроблення та впровадження в практику проектування і реконструкції методики, яка б максимально об'єктивно оцінювала фактичний рівень надійності залізобетонних балок після підсилення є дуже важливою і актуальною задачею для науковців.

В основу поданих нижче теоретичних досліджень покладена існуюча методика теорії надійності непідсилених будівельних конструкцій [3], [4], [5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженням питання надійності підсилених залізобетонних конструкцій розпочали активно займатися від початку ХХІ століття, насамперед беручи до уваги ефективність самих методів підсилення, а також збільшення обсягів робіт з відновлення та реконструкції несучих елементів будівель та споруд по всьому світу. Серед науковців, які працюють над розробленням та вдосконаленням методів оцінки надійності підсилених сталевих, залізобетонних і сталезалізобетонних конструкцій виокремимо С. Г. Альсаєда, Х. А. Барроса, Б. Р. Еллінгвуда, А.-Х. Цюрейка, В. М. Кербхері, Дж.Р. Касас, Е. Фер'єра, Дж. Веселека, С.Ф. Пічугіна, О. П. Семка, О. В. Воскобійник та ін. Але сьогодні дуже мало досліджень, які б стосувалися оцінки надійності залізобетонних згинаних елементів, підсилених при дії навантаження (тобто на рівні визначення фактичної несучої здатності конструкції в момент виконання підсилення), а також не розроблено методик, які б дозволяли враховувати рівень навантаження, при якому виконуватиметься підсилення, як випадковий параметр.

На нашу думку, найцікавіше і найповніше дослідження, проведене сьогодні (з погляду врахування включення в роботу окремих елементів підсиленої залізобетонної конструкції, а також підходу до оцінки її надійності) описане в праці [6] професорів Б.Р. Еллінгвуда та А.-Х. Цюрейка з Технологічного Інституту Джорджії (Атланта, США). Ці вчені запропонували методику оцінки надійності згинаних залізобетонних елементів, підсилених за допомогою FRP-композитів. Найважливішою цінністю цієї методики є те, що застосована вона до підсилених залізобетонних елементів, які мають недостатню міцність на згин (дослідження стосувалися міцності нормальних перетинів). Цей фактор надає роботі [6] виняткову актуальність для застосування її результатів у реальних умовах реконструкції згинаних залізобетонних елементів. Більше того, для оцінки надійності підсилених конструкцій тут попередньо були проведені дослідження не тільки залізобетонних балок, як згинаних елементів, а й плит (рис. 1).



Рис. 1. Характер типових порушень зчеплення FRP-композитів і залізобетонних плит після досягнення граничного стану комплексної підсиленої конструкції [6]

Тези публікації [6] наочно продемонстрували можливість розроблення методики оцінки надійності підсиленних згинаних залізобетонних елементів на основі досягнення граничного стану комплексного перерізу відповідно до американських норм проектування [7]. Своєю чергою, закріплені при дії навантаження до нижніх граней великопролітних балок та плит FRP-пластини включаються в роботу конструкції на певному етапі та збільшують її міцність та деформативність. Оцінювання надійності автори проводили для наступних попередньо встановлених можливих відмов: текучості поздовжньої робочої арматури, роздроблення стиснутої зони бетону або ж порушенні зчеплення вуглепластикової пластини.

Припустивши, що внаслідок зміни умов експлуатації конструкції номінальне змінне навантаження збільшиться на 50 %, до нижньої грані експериментальних залізобетонних балок додавались FRP-пластини (див. рис. 2), щоб забезпечити необхідну несучу здатність. При цьому було також припущено, що в момент підсилення на балку діятиме тільки постійне навантаження. Необхідна міцність комплексного перерізу при згині досягалась склеюванням двох шарів FRP-пластин до нижньої грані залізобетонної балки. Аналіз надійності, що проводився після випробувань згідно ймовірнісного методу Монте-Карло як для непідсиленних, так і для підсиленних згинаних елементів, базувався на вибірці статистичних даних (які відображали стохастичні параметри матеріалів) попередніх досліджень, що стосувалися визначення ймовірностей відмов конструкцій. Надійність підсиленних конструкцій (як балок, так і плит), передусім, залежала від якості монтажу FRP-пластин та виражалася через критерій – показник (індекс) надійності  $\beta$ .

Загалом, роботу [6] можна назвати дуже цінною у сфері дослідження надійності згинаних залізобетонних елементів, підсиленних при дії навантаження за допомогою FRP-пластин, оскільки вона дає методику визначення основного критерію оцінки надійності – індексу надійності  $\beta$ . Недоліки тут можна виокремити такі: розроблена методика адаптована до американських норм проектування; геометричні розміри згинаних елементів і рівень навантаження на момент підсилення тут не розглядали як змінні параметри. До того ж, в запропонованій теорії розглянуто один (близький до граничного) рівень навантаження, при якому здійснювали підсилення.

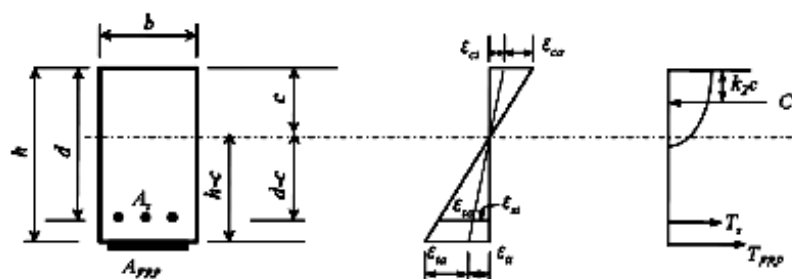


Рис. 2. Пружні деформації, напруження і результуючі сили в залізобетонній балці, підсиленій FRP-пластиною [6]

Окремі дослідження в галузі надійнісного проектування підсиленних конструкцій стосувались розроблення методик аналізу надійності згинаних конструкцій залізобетонних мостів (у вигляді

знаходження розрахункових факторів безпеки) [8]; оцінки надійності самих матеріалів підсилення (зволожених вуглецю та епоксидного клею) щодо довготривалого погіршення багатьох їхніх характеристик (так званий статистичний метод прогнозування) [9]; спрощеного аналізу надійності підсиленних залізобетонних балок з недостатньою міцністю на зсув [10]; дослідження проектного й фактичного рівня безвідмовності різних типів сталезалізобетонних конструкцій (СЗБК) на всіх етапах їхнього життєвого циклу [11].

Отже, в усіх згаданих вище наукових публікаціях якісно описано побудову алгоритмів оцінок надійності різноманітних непідсиленних і підсиленних конструкцій, проте не враховано випадкової природи фактичного рівня навантаження при виконанні підсилень, а також геометричних параметрів досліджуваних конструктивних елементів.

**Метою та завданням дослідження** є розроблення методики оцінки надійності залізобетонних балок, підсиленних нарощуванням перерізу додатковою стрижневою арматурою.

**Теоретичні обґрунтування.** Для вирішення поставлених мети і завдання дослідження необхідно встановити числові характеристики прийнятих випадкових параметрів: математичні очікування, дисперсії тощо. Крім того, встановлюючи згадані вище числові характеристики, існує можливість використання експериментальних даних інших дослідників.

При цьому, враховуємо той факт, що переважна більшість випадкових параметрів резерву несучої здатності залізобетонних балок описується нормальним законом їх розподілу (розподілом Гауса). До таких стохастичних параметрів можна віднести міцність бетону, сталеві та композитної арматури, певну частину діючих навантажень (наприклад, постійних) і т.д. У чинних нормах проектування залізобетонних конструкцій [1] випадкова природа міцності бетону і арматури враховується введенням в розрахунок “характеристичної міцності” з гарантованою 95 %-ю забезпеченістю (довірчою ймовірністю).

Нормальний закон розподілу відіграє дуже важливу роль у теорії ймовірностей і займає серед інших законів розподілу особливе положення. Головною особливістю цього закону, яка виділяє його серед інших, є та, що він є граничним законом, тобто таким, до якого наближаються інші закони розподілу. Суму достатньо великої кількості незалежних (або малозалежних) стохастичних величин, які підлягають будь-яким законам розподілу, наближено можна описати нормальним законом, і це виконується то точніше, що більша кількість стохастичних величин сумується [5].

Міцність окремих матеріалів конструкцій, яка визначається експериментальним шляхом за стандартною методикою, має значний розкид і, відповідно, є випадковим параметром (статистичний характер міцності). Звідси випливає, що крива розподілу міцності є асиметричною, а також обмежена знизу нульовим значенням. Наближено приймаємо, що міцність матеріалів (бетону і сталеві арматури) розподілена згідно із нормальним законом.

Оцінку надійності проводили методом статистичної лінеаризації. В практиці проектування часто трапляються випадки, коли функція випадкових величин, яка досліджується, не є строго лінійною, проте майже не відрізняється від такої і при вирішенні задачі може наближено розглядатися як лінійна. Таке припущення має місце в тому випадку, коли випадкові зміни параметрів є незначними (до 25 %). Величина статистичної мінливості стохастичних параметрів будівельних конструкцій відповідає цим вимогам [5].

Для обчислення статистичних характеристик таких функцій здійснюється їх лінеаризація шляхом розкладу в ряд Тейлора в околиці центру розподілу випадкових аргументів (в точці математичного очікування випадкової функції) [5].

**Теоретичні дослідження.** Отже, на основі наведених вище припущень запропоновано методику оцінки надійності підсиленних залізобетонних згинаних елементів. Для розробки алгоритму оцінки надійності балок, підсиленних нарощуванням основного перерізу додатковою стрижневою арматурою, прийнято такі основні випадкові параметри системи:

- міцність бетону  $\tilde{f}_{ck,prism}$ ; – міцність арматурної сталі  $\tilde{f}_{yk}$ ; – корисна висота перерізу  $\tilde{d}$ ;
- ширина перерізу  $\tilde{b}$ .

Випадкове значення граничного згинального моменту, що сприймається балкою з одиночним армуванням, підсиленою додатковою арматурою:

$$\tilde{M}_{ult} = f(s_b, s_s, s_{s,add}, \tilde{d}, \tilde{d}', \tilde{b}) = s_{s,add} \cdot A_{s,add} \cdot (\tilde{d}' - 0,5 \cdot \tilde{x}) + s_s \cdot A_s \cdot (\tilde{d} - 0,5 \cdot \tilde{x}), \quad (1)$$

де  $s_b, s_s, s_{s,add}, \tilde{d}, \tilde{d}', \tilde{b}$  – випадкові значення розрахункових параметрів системи;  $A_{s,add}$  – площа перерізу додаткової арматури;  $\tilde{d}'$  – відстань від верхньої грані балки до центру ваги додаткової арматури;  $\tilde{x}$  – висота стиснутої зони бетону, яка в даному випадку рівна

$$\tilde{x} = \frac{s_{s,add} \cdot A_{s,add} + s_s \cdot A_s}{s_b \cdot \tilde{b}}. \quad (2)$$

Підставляємо вираз для  $\tilde{x}$  в формулу згинального моменту:

$$\begin{aligned} \tilde{M}_{ult} &= s_{s,add} \cdot A_{s,add} \cdot \left( \tilde{d}' - 0,5 \cdot \frac{s_{s,add} \cdot A_{s,add} + s_s \cdot A_s}{s_b \cdot \tilde{b}} \right) + \\ &+ s_s \cdot A_s \cdot \left( \tilde{d} - 0,5 \cdot \frac{s_{s,add} \cdot A_{s,add} + s_s \cdot A_s}{s_b \cdot \tilde{b}} \right) = \\ &= s_{s,add} \cdot A_{s,add} \cdot \tilde{d}' + s_s \cdot A_s \cdot \tilde{d} - \frac{0,5}{s_b \cdot \tilde{b}} \cdot (s_{s,add} \cdot A_{s,add} + s_s \cdot A_s)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Математичне очікування граничного згинального моменту  $\bar{M}_{ult}$  одержимо, підставивши в отриманий вище спрощений вираз математичні очікування прийнятих випадкових аргументів.

Далі визначаємо коефіцієнти для знаходження стандарту граничного згинального моменту підсиленої балки  $\bar{M}_{ult}$  – у вигляді часткових похідних функції  $\bar{M}_{ult} = f(x_1, \dots, x_n)$  за змінними  $x_1 \dots x_n$ :

$$D_b = \frac{\partial \bar{M}_{ult}}{\partial s_b}; \quad D_s = \frac{\partial \bar{M}_{ult}}{\partial s_s}; \quad D_{s,add} = \frac{\partial \bar{M}_{ult}}{\partial s_{s,add}}; \quad D_d = \frac{\partial \bar{M}_{ult}}{\partial d}; \quad D_{d'} = \frac{\partial \bar{M}_{ult}}{\partial d'}; \quad D_b = \frac{\partial \bar{M}_{ult}}{\partial b}. \quad (4)$$

Числові ж значення коефіцієнтів отримуємо, підставляючи в отримані вище вирази математичні очікування випадкових аргументів.

Стандарт граничного згинального моменту тут визначається як

$$\hat{M}_{ult} = \sqrt{(D_b \cdot s_b)^2 + (D_s \cdot s_s)^2 + (D_{s,add} \cdot s_{s,add})^2 + (D_d \cdot d)^2 + (D_{d'} \cdot d')^2 + (D_b \cdot b)^2}. \quad (5)$$

Для оцінки надійності балки попередньо обчислюємо характеристику безпеки (індекс надійності), яка в цьому випадку має такий вигляд:

$$b = \frac{\bar{M}_{ult} - M_{cal}}{\hat{M}_{ult}}, \quad (6)$$

де  $M_{cal}$  – розрахункове значення зовнішнього згинального моменту в балці.

Насамкінець, встановлення оцінки надійності балки (у вигляді ймовірності її відмови) проведемо за допомогою функції Лапласа  $\Phi(b)$ :

$$Q(Y \leq 0) = 0,5 - \Phi(b). \quad (7)$$

Значення ж функції Лапласа від значення аргументу  $\beta$  можна визначити за допомогою формули "=НОРМСТРАСП( $\beta$ )–0,5" програми "Microsoft Excel".

**Висновки.** На цьому етапі досліджень розроблено відносно просту аналітичну методику обчислення ряду показників для оцінки надійності залізобетонних балок (у вигляді ймовірностей їх відмов), підсиленних додатковою стрижневою арматурою. Ця методика розрахунку надійності дозволяє враховувати такі стохастичні параметри:

- 1) міцність бетону й арматурної сталі (мінливість параметрів міцності);
- 2) ширина та корисна висота перерізу (мінливість геометричних параметрів).

Наступним завданням даного дослідження є врахування в розробленій методиці оцінювання надійності стохастичного параметра рівня навантаження при якому виконують підсилення.

1. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6-98:2009. – [Чинний від 2011-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с. – (Національний стандарт України). 2. Eurocode: Basis of structural design. EN 1990:2002. – Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2002. – 87 p. 3. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: ДБН В.1.2-14-2009 – [Чинний від 2009-12-01] – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 43 с. – (Національний стандарт України). 4. Пичугин С. Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий: Монография. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 456 с. 5. Пшеничкина В. А. Надежность строительных систем: учебное пособие / В. А. Пшеничкина, А. Н. Богомолов, А. А. Чураков. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2010. – 40 с. 6. Wang N. Y. Reliability-Based Evaluation of Flexural Members Strengthened with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Composites / N. Y. Wang, B. R. Ellingwood, A. H. Zureick // Journal of Structural Engineering-ASCE. – 2010. – Vol. 136. – P. 1151–1160. 7. American Concrete Institute (ACI) ACI 318-05: Building code requirements for reinforced concrete. – ACI, Farmington Hills, MI, 2005. – 369 p. 8. Trentin C. Safety factors for CFRP strengthening in bending of reinforced concrete bridges / C. Trentin, J. R. Casas // Composite Structures. – 2015. – Vol. 128. – P. 188–198. 9. Karbhari V. M. Design factors, reliability, and durability prediction of wet layup carbon/epoxy used in external strengthening / V. M. Karbhari, M. A. Abanilla // Composites Part B: Engineering. – 2007. – No. 1, Vol. 38. – P. 10–23. 10. Alsayed S. H. Reliability of shear-deficient RC beams strengthened with CFRP-strips / S. H. Alsayed, N. A. Siddiqui // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 42. – P. 238–247.

#### References

1. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia [Construction of houses and buildings. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions]. (2011). DBN V.2.6-98:2009 from 1<sup>st</sup> July 2011. Kyiv: Building norms of Ukraine [in Ukraine]. 2. Eurocode: Basis of structural design. EN 1990:2002. – Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2002. – 87 p. 3. Systema zabezpechennia nadiynosti ta bezpeky budivelnykh ob'ektiv. Zakhalni pryncypy zabezpechennia nadiynosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel, sporud, budivelnykh konstruktsiy ta osnov [System of providing of reliability and safety of structural objects. General principles of providing of reliability and constructive safety of buildings, structures, building constructions and foundations]. (2009). DBN V.1.2-14-2009 from 1<sup>st</sup> December 2009. Kyiv: Building norms of Ukraine [in Ukraine]. 4. Pichugin S. F. Nadozhnost stalnykh konstruktsyyi proizvodstvennykh zdaniy: Monographia [Reliability of Steel Structures of Industrial Buildings: Monograph]. – М.: Publishing house ASV, 2011. – 456 p. 5. Pshenichkina V. A. Nadozhnost sroitelnykh sistem: uchebnoe posobie [Reliability of building systems: tutorial] / V. A. Pshenichkina, A. N. Bogomolov, A. A. Churakov. – Volgograd: VolgGASU, 2010. – 40 p. 6. Wang N. Y. Reliability-Based Evaluation of Flexural Members Strengthened with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Composites / N. Y. Wang, B. R. Ellingwood, A. H. Zureick // Journal of Structural Engineering-ASCE. – 2010. – Vol. 136. – P. 1151–1160. 7. American Concrete Institute (ACI) ACI 318-05: Building code requirements for reinforced concrete. – ACI, Farmington Hills, MI, 2005. – 369 p. 8. Trentin C. Safety factors for CFRP strengthening in bending of reinforced concrete bridges / C. Trentin, J. R. Casas // Composite Structures. – 2015. – Vol. 128. – P. 188–198. 9. Karbhari V. M. Design factors, reliability, and durability prediction of wet layup carbon/epoxy used in external strengthening / V. M. Karbhari, M. A. Abanilla // Composites Part B: Engineering. – 2007. – No. 1, Vol. 38. – P. 10–23. 10. Alsayed S. H. Reliability of shear-deficient RC beams strengthened with CFRP-strips / S. H. Alsayed, N. A. Siddiqui // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 42. – P. 238–247.