

УДК 624.21.625.046.5

д.т.н., професор Усаковський С.Б.,

Київський національний університет будівництва та архітектури,

Велічко М.М., ДП «Державний дорожній

науково-дослідний інститут ім. М.П. Шульгіна»

**ПРО НАДІЙНІСТЬ ФУНДАМЕНТІВ ІСНУЮЧИХ
АВТОДОРОЖНИХ МОСТІВ МАЛИХ ПРОЛЬОТІВ.
ОЦІНКА СТАТИСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДІЮЧИХ ФАКТОРІВ.**

Фундаменти існуючих мостів малих прольотів, які запроектовані в минулому віді за типовими проектами під застарілі навантаження. Мають запаси міцності, закладені методом граничних станів. Запропоновано використати ці запаси, а для їх оцінки використовувати підхід, об'єднуючи в собі ідеї теорії надійності споруд з ідеями методу граничних станів. Ця стаття присвячена обґрунтуванню статистичних характеристик діючих випадкових факторів, характерних данному підходу.

Предметом аналізу є надійність несучої здатності по ґрунту фундаментів існуючих мостів масового будівництва, які були запроектовані 30 - 50 років тому. Мости були розраховані на тимчасові рухомі навантаження від автотранспорту. Ці навантаження в даний час застаріли, сучасні рухомі нормативні навантаження істотно зросли. Довжина типових прогонових будов таких мостів від 6м до 22м.

Для оцінки надійності запропонований підхід, який об'єднує метод граничних станів з ідеями теорії надійності споруд. Метод граничних станів, втілений у відмінених і чинних нормах, дозволяє визначити коефіцієнти запасу при дії «старого» і «сучасного» навантажень. «Зібравши» розрахункові коефіцієнти методу граничних станів, можна обчислити шукані коефіцієнти запасу γ і γ' .

Для оцінки надійності використана узагальнена модель, запропонована професором О.Р. Ржаніциним [1].

$$\beta = \frac{\gamma-1}{\sqrt{\gamma^2 V_R^2 + V_Q^2}}. \quad (1)$$

Тут γ - коефіцієнт запасу, $\gamma = \frac{R}{Q}$, де R і Q - середні значення узагальненої міцності R і узагальненого зусилля Q , V_R і V_Q - коефіцієнти варіації величин R і Q .

Випадковими факторами тут є фізико-механічні властивості ґрунтів основи (они впливають на R) а також постійні і тимчасові навантаження (впливають на Q).

Ця стаття присвячена обґрунтуванню статистичних характеристик діючих випадкових факторів.

Математичним апаратом теорії надійності споруд є теорія ймовірностей і математична статистика. Без інформації про статистичні характеристики діючих випадкових факторів неможливо оцінити надійність конструкції.

Інженери-геологи отримують інформацію про властивості ґрунтів основи під час польових досліджень шляхом відбору проб і подальшої лабораторної обробки.

Відомо, що фізико-механічні властивості ґрунтів часто мають яскраво виражений мінливий характер. Тому для опису цих властивостей інженери-геологи традиційно використовують методи і прийоми математичної статистики [2, 3]. Перелічимо їх:

1. Мінімальна кількість відібраних проб ґрунту для інженерно-геологічного елемента має бути не менше шести: $n_{\min} = 6$. Іноді $n_{\min} = 10$ - для розрахунку фундаменту по першому граничному стану.

2. Виключають максимальні і мінімальні значення у вибірці за певними правилами.

3. Розчленовують інженерно-геологічний елемент, якщо коефіцієнт варіації механічних властивостей ґрунту перевищує 0,30 при закономірний зміні цих властивостей в плані або по глибині. Ясно, що число випробувань при цьому повинно бути більше шести, інакше про якусь закономірність або незакономірність судити важко.

4. Число проб n для обчислення характеристик ґрунтів залежить від ступеня неоднорідності властивостей ґрунтів, тобто від їх мінливості. При збільшенні мінливості збільшується і кількість відібраних проб.

5. За нормативне значення характеристик ґрунту приймається вибіркове середнє \bar{x} . Цей пункт дуже важливий, оскільки вибіркове середнє \bar{x} є випадковою величиною, стандарт якої дорівнює $s_x = \frac{s}{\sqrt{n}}$, а коефіцієнт варіації

$$C_{v,x} = \frac{s_x}{\bar{x}}.$$

Відомо, що властивості ґрунтів володіють значною мінливістю: до 30 - 40 - 50% на думку різних авторів [4, 5].

Застосування вибіркових характеристик для інженерних розрахунків істотно знижує цю мінливість. З'являється можливість оцінити граничні

значення коефіцієнта варіації властивостей ґрунтів і відповідних характеристик міцності підстав.

У табл. 1 показано, як залежить мінливість вибіркових середніх \bar{x} від значень C_{v_x} та обсягу вибірки n .

Табл. 1 Коефіцієнт варіації C_{v_x} вибіркового середнього \bar{x} в залежності від C_{v_x} і числа членів вибірки n .

№ п/п	C_{v_x}	n	$C_{v_{\bar{x}}} = \frac{C_{v_x}}{\sqrt{n}}$
1	0,12	6	0,049
2	0,20	6	0,0816
3	0,20	10	0,063
4	0,20	12	0,058
5	0,30	6	0,1224
6	0,30	10	0,095
7	0,30	12	0,087
8	0,50	16	0,125

$$V_R = 0,08$$

$$V_R = 0,12$$

Аналіз табл. 1 дозволяє зробити висновок: верхнє значення коефіцієнта варіації V_R в моделі надійності (1) можна прийняти рівним $V_R = 0,12$. Це досить значна величина вибіркового середнього. Повторимо, що для великих значень C_{v_x} : $0,30 \div 0,50$ повинно бути збільшено і кількість членів вибірки n , що утримає V_R в запропонованих межах.

Про закони розподілу фізико-механічних властивостей ґрунтів. Як пише О.С. Вентцель «Щоб знайти закон розподілу випадкової величини, потрібно володіти досить значним статистичним матеріалом, близько декількох сотень дослідів» [6]. На жаль, такої кількості даних про ґрунти у нас немає. Тому, наприклад, в ГОСТі 20522-96. «Грунти», розробленому Мінбудом Росії, «методи статистичної обробки використовують нормальний або логарифмічний нормальний закон розподілу ймовірностей» [3. п. 3.9.]. Для мостовиків важливо, що в розробці цього ГОСТу брав участь інститут «СоюздорНІ». У книзі «Прикладна статистика» [7] рекомендується використовувати «Нормальний закон в якості першого наближення, при цьому нерідко виявляється, що подібне допущення дає досить точні, з точки зору конкретних цілей дослідження, результати» [7, с. 170]. Цієї думки ми будемо дотримуватися, використовуючи модель О. Р. Ржаніцина.

Підіб'ємо підсумки сказаного вище. Фізико-механічні властивості ґрунтів володіють великим діапазоном мінливості. Коефіцієнт варіації C_v може перевищувати 30%. Проте в розрахунках фундаментів використовуються вибіркові середні, мінливість яких значно менше і залежить від числа членів вибірки n . Причому, при значній мінливості показників, рекомендації вимагають збільшення кількості проб ґрунту, що призводить до зменшення мінливості рекомендованих для розрахунку фундаментів величин. Цей підхід обмежує величину мінливості нормативних характеристик ґрунтів. Тому, для оцінки надійності несучої здатності фундаментів по ґрунту, тут запропоновано орієнтуватися на реальний діапазон значень коефіцієнтів варіації міцності ґрунтів: $0,08 < V_R < 0,12$.

Тут необхідний коментар. Якщо $V_R = 0,12$ пропонується прийняти як реально більше значення, то $V_R = 0,08$ - це значення V_R , що часто зустрічається. В оцінках надійності існуючих мостів ми будемо спиратися на величину $V_R = 0,12$ як забезпечує менше з можливих значення показника надійності P . Про використання величини $V_R = 0,08$ буде сказано далі.

Визначальним навантаженням для фундаментів більшості розглянутих мостів є власна вага прогонових будов і опор і тимчасове рухоме навантаження від автотранспорту. Нижче наведені короткі характеристики цих навантажень і міркування про величини їх мінливості.

До постійного навантаження відносять власну вагу блоків прогонової будови, вагу комплексу проїзної частини і вагу опор.

Вага прогонової будови є найбільш визначенім навантаженням, дані цього навантаження наведені в типових проектах прогонових будов. Коефіцієнт варіації власної ваги будівельних конструкцій зазвичай дорівнює 0,033. Це ж значення рекомендують і ДБН В.2.3-14: 2006 [8].

Вага комплексу проїзної частини є менш визначенім навантаженням, оскільки ремонт дорожнього покриття на мостах часто ведуть методом нашарування (що порушує чинні інструкції). З цієї причини вищеноизначені норми рекомендують коефіцієнт варіації $C_v = 0,17$ [8].

Навантаження від ваги опори з фундаментом і ґрунтом на обрізах фундаменту є досить невизначенім через дефіцит інформації про типи і розміри цих конструкцій. У розрахунку прийняті узагальнені середні розміри опори. Коефіцієнт варіації цього навантаження прийнятий, як і для власної ваги: $C_v = 0,033$.

Зроблені розрахунки для оцінки частки кожного з навантажень щодо сумарного навантаження на фундамент (постійного та тимчасового). Результати цих розрахунків зведені в таблиці 2 та таблиці 3, та дозволяють визначити

зважене значення коефіцієнта варіації V_Q для всього сумарного навантаження на фундамент.

Табл. 2 Постійні навантаження, що діють на фундамент, їх частка від дії інших навантажень.

№ п/ п	Найменування постійного навантаження	Частка даного навантаження		Коефіцієнт варіації навантаження C_v
		від усього постійног о	від постійного та тимчасового	
Постійне навантаження на фундаменти становить 70% від всього навантаження для мостів, що запроектовані згідно з вимогами СН 200-62, з урахуванням сучасних рухомих навантажень, що зросли цей відсоток дорівнює 65%				
1	Вага прогонової будови без урахування ваги комплексу проїзної частини	0,61	СН 200-62: $0,70 \cdot 0,61 = 0,4270$ ДБН В.1.2-15:2009 $0,65 \cdot 0,61 = 0,3965$	0,033 0,033
2	Конструкція комплексу проїзної частини	0,05	СН 200-62: $0,70 \cdot 0,05 = 0,0350$ ДБН В.1.2-15:2009 $0,65 \cdot 0,05 = 0,0325$	0,17 0,17
3	Вага опори з фундаментом і ґрунтом на обрізах фундаменту	0,34	СН 200-62: $0,70 \cdot 0,34 = 0,2385$ ДБН В.1.2-15:2009 $0,65 \cdot 0,34 = 0,221$	0,033 0,033

Нормативні тимчасові навантаження від автотранспорту, регламентовані відміненими СН 200-62 [9] та чинними нормами ДБН В.1.2-15: 2009 [10], відрізняються. Відповідно до СН 200-62 навантаження Н-30 – колона тридцятитонних автомобілів, яка може бути замінена розподіленим еквівалентним навантаженням. Діюче навантаження А-15 [10] являє собою поєднання розподіленого навантаження і одиночного тандема.

Відзначимо, що нормативні тимчасові навантаження від автотранспорту на мостах відрізняються в принципі від такого навантаження, як, наприклад, власна вага конструкцій, оскільки носять умовний характер. По-перше, за основу приймається не середнє, а якесь максимально можливе (в розумних межах) навантаження, і, по-друге, це навантаження прийняте з урахуванням віддаленої перспективи, як про це сказано в книзі - коментарі до норм [7, с. 39].

У даній роботі використані рекомендації діючих норм ДБН В.2.3-14: 2006 [8] за значеннями коефіцієнтів варіації навантажень: для тандему $C_v = 0,17$, для рівнорозподіленого навантаження $C_v = 0,24$.

До тимчасового навантаження відноситься і навантаження від натовпу на тротуарах, яке становить приблизно 3 - 4% від навантаження автотранспорту. Розрахункові значення цього навантаження в нових нормах зменшені, зменшені і відповідні коефіцієнти варіації. Тому при оцінці V_Q було прийнято рішення долю мінливості цього навантаження не враховувати. Це трохи збільшує V_Q .

У табл. 3 наведені дані, що показують «вагу» тимчасових вертикальних навантажень при визначенні V_Q .

Табл. 3 Тимчасові вертикальні навантаження, що діють на фундамент, їх частка від дії інших навантажень.

№ п/ п	Найменування навантаження	Частка даного навантаження		Коефіцієнт варіації навантаження C_v
		від усього тимчасово го	від постійного та тимчасового	
Тимчасове навантаження на фундамент складає 30% від всього навантаження для мостів, що запроектовані згідно з вимогами СН 200-62, з урахуванням сучасних рухомих навантажень, що зросли цей відсоток дорівнює 35%				
1	Колона автомобілів Н-30 згідно СН 200-62	1,0	0,30	0,24
2	Розподілене навантаження А-15 ($K = 15$) згідно з ДБН В.1.2-15: 2009	0,375	$0,35 \cdot 0,375 = 0,13$	0,24
3	Тандем А-15 ($K = 15$) згідно з ДБН В.1.2-15: 2009	0,625	$0,35 \cdot 0,625 = 0,22$	0,17

Використовуючи дані табл. 2 і 3, обчислимо коефіцієнт варіації «узагальненої навантаження» V_Q .

$$V_Q = \sum C_v \cdot K_2, \quad (2)$$

де C_v - коефіцієнт варіації навантаження, K_2 - частка типу навантаження в сумарному навантаженні.

Діють навантаження, передбачені СН 200-62. Послідовно визначаються «внески» постійних навантажень № 1, 2, 3 і «вклад» тимчасового навантаження Н-30.

$$\begin{aligned} V_Q &= 0,033 \cdot 0,427 + 0,17 \cdot 0,035 + 0,033 \cdot 0,238 + 0,24 \cdot 0,30 = \\ &= 0,01409 + 0,006 + 0,00785 + 0,072 = 0,10 \end{aligned}$$

Діють навантаження, передбачені ДБН В.1.2-15: 2009. Послідовно визначаються «внески» постійних навантажень № 1, 2, 3 і «внески» тимчасових навантажень № 2 і 3.

$$\begin{aligned} V_Q &= 0,033 \cdot 0,3965 + 0,17 \cdot 0,0325 + 0,033 \cdot 0,221 + 0,24 \cdot 0,13 + \\ &+ 0,17 \cdot 0,22 = 0,0131 + 0,006 + 0,0073 + 0,0312 + 0,0372 = 0,095 \approx 0,10 \end{aligned}$$

Беручи до уваги неточність вихідних даних, а також умовність тимчасового навантаження, будемо вважати, що при дії застарілих навантажень і при дії сучасних навантажень коефіцієнт варіації $V_Q = 0,10$.

Використовуючи модель О.Р. Ржаніцина (1) і, знайдені раніше, коефіцієнти запасу γ і γ' проведемо чисельний експеримент, підставляючи в (1) рекомендовані значення V_R і V_Q , а також інші значення V_R і V_Q , що виходять за межі рекомендацій, проте можливі. Перевірмо при цьому чутливість функції надійності P і P' до варіації вихідних параметрів.

Табл. 4 Вплив факторів V_R і V_Q на надійність фундаменту.

Діють норми	$\gamma; \gamma'$	V_R	V_Q	$\beta; \beta'$	$P; P'$
СН 200-62 ДБН В.1.2-15:2009	$\gamma = 1,70$ $\gamma' = 1,48$	0,12	0,08	$\beta = 3,191$ $\beta' = 2,46$	$P = 0,9993$ $P' = 0,9931$
СН 200-62 ДБН В.1.2-15:2009	$\gamma = 1,70$ $\gamma' = 1,48$	0,12	0,10	$\beta = 3,080$ $\beta' = 2,35$	$P = 0,9990$ $P' = 0,9906$
При значенні V_R , яке виходить за межі рекомендованих в сторону зменшення надійності					
СН 200-62 ДБН В.1.2-15:2009	$\gamma = 1,70$ $\gamma' = 1,48$	0,14	0,10	$\beta = 2,71$ $\beta' = 2,087$	$P = 0,9966$ $P' = 0,9816$
При реальних значеннях V_R , V_Q , які визначають більше значення надійності					
СН 200-62 ДБН В.1.2-15:2009	$\gamma = 1,70$ $\gamma' = 1,48$	0,08	0,08	$\beta = 4,14$ $\beta' = 3,36$	$P = 1,0000$ $P' = 0,9996$

Табл. 5 Вплив факторів V_R і V_Q на надійність існуючого фундаменту P' при невеликому значенні коефіцієнта запасу γ' .

Діють норми	γ'	V_R	V_Q	β'	P'
ДБН В.1.2-15:2009	1,30	0,08	0,10	2,08	0,9812
	1,30	0,12	0,10	1,62	0,9474
	1,30	0,12	0,12	1,52	0,9357
	Нереально великі значення V_R и V_Q				
	1,30	0,20	0,20	0,91	0,8186
	1,36	0,12	0,20	1,385	0,9170
	1,36	0,16	0,20	1,22	0,8888
	Мале значення $\gamma' = 1,10$				
	1,10	0,12	0,10	0,602	0,7264
	1,10	0,08	0,10	0,75	0,7734

Табл. 6 При однорідних ґрунтах основи можливе значення $V_R = 0,05$.

Діють норми	γ'	V_R	V_Q	β'	P'
ДБН В.1.2-15:2009	1,48	0,05	0,10	3,87	0,9999
	1,36	0,05	0,10	2,975	0,9985

Проведені розрахунки показали: надійність несучої здатності фундаментів по ґрунту, що досліджуються має певний розкид. Це пояснюється значною неоднорідністю властивостей ґрунтів основи, яка впливає на V_R .

Відомо, що методи обробки даних про ґрунти та визначення їх нормативних характеристик спрямовані на зменшення мінливості останніх за рахунок збільшення числа відібраних зразків. Однак, точного регулювання тут немає. Тому значення V_R можуть варіювати в діапазоні $0,05 \div 0,12$ і, навіть, в деяких випадках виходити за ці межі.

Однак, надійність фундаментів при цьому залишається значною і при дії сучасних збільшених рухомих навантажень. Це пояснюється досить високим рівнем коефіцієнта запасу, закладеним нормами при проектуванні, і дозволяє стверджувати: «Більшість фундаментів, що розглядаються здатні успішно сприймати і сучасне навантаження».

В оцінках надійності фундаментів мостів, реконструкція яких не передбачена, рекомендуємо застосовувати значення $V_R = 0,12$. Це значення V_R забезпечує оцінку надійності знизу.

Якщо ж передбачається реконструкція мосту з розширенням проїзної частини, то при оцінці надійності рекомендується, врахувавши в коефіцієнті запасу нове навантаження реконструкції, використовувати значення $V_R = 0,08$.

При цьому обов'язкове виконання наступної умови: ґрунти основи або сам фундамент повинні бути випробувані натурними методами. В більшості випадків при коефіцієнті запасу більше $1,2 \div 1,3$ посилення фундаментів не потрібно. Таким чином витрати натурних випробувань істотно окупляться.

Запропонований у роботі підхід до оцінки надійності фундаментів спрямований на подолання істотної неповноти вихідної інформації, однак він не знімає невизначеності повністю. Якщо коефіцієнти запасу в моделі О.Р. Ржаніцина можна визначити, спираючись на відповідні норми, то коефіцієнти варіації мінливих факторів виглядають менш визначеними. Традиційний збір статистичних даних тут практично неможливий, і доводиться приймати за основу узагальнені дані технічних джерел, у тому числі норм і рекомендацій. Тобто елементи невизначеності все ж зберігаються. Назвемо використані тут прийоми, які направлені на те щоб, якщо не зняти, то пом'якшити цю невизначеність:

1. Оцінка надійності фундаментів при дії сучасного навантаження P^t зіставлена з «проектною» оцінкою P . Нагадаємо, що основна частина навантаження - постійне, залишається незмінним. Таке зіставлення згладжує неточність вихідних даних.
2. Для найбільш невизначеного фактора - мінливості властивостей ґрунтів в розрахунках надійності використаний діапазон значень мінливості V_R : $0,08 \div 0,12$.
3. В оцінці надійності фундаментів існуючих мостів прийнято верхнє значення $V_R = 0,12$, це визначає менше з можливих значення показника надійності.

Значення $V_R = 0,08$, яке можна вважати середнім, для даної сукупності, показником мінливості, рекомендуємо використовувати при розгляді задач реконструкції моста.

Здійснено оцінки надійності фундаментів при величинах y' , V_R , V_Q , які виходять за межі рекомендованих, зменшуючи надійність. Однак і в таких ситуаціях показник надійності залишається значним, і зберігаються попередні висновки:

Фундаменти більшості розглянутих мостів володіють достатніми резервами для пропуску сучасних збільшених рухомих навантажень. Зрозуміло, цей висновок вірний, якщо проектування, будівництво та експлуатація моста проводилася належним чином.

При реконструкції таких мостів є доцільним використання резервів міцності фундаментів, встановивши ці резерви імовірнісним розрахунком надійності, підкріпленим натурними методами досліджень ґрунтів чи фундаментів.

Література:

1. Ржаніцин О.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
2. Руководство по проектированию оснований зданий и сооружений. М.: Стройиздат, 1977. – 376 с.
3. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. ГОСТ 20522-96. Межгосударственный стандарт. М.: Минстрой России, 1996. – 76 с
4. Ермолаев М. М., Михеев В. В. Надежность оснований сооружений. — Л.: Стройиздат, 1976 — 152 с.
5. Кудзіс О. П. Оценка надежности железобетонных конструкций. — Вільнюс: Мокслас, 1985 — 156 с.
6. Вентцель О.С. Теория вероятностей. – М.: Наука. 1964. – 576 с.
7. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкін Л.Д., Прикладная статистика. – М.: Финансы и статистика, 1983 – 470 с.
8. ДБН В.2.3-14.2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проєктування. К.: Мінрегіонбуд України, 2006. – 359 с.
9. СН 200-62. Технические условия проектирования мостов и труб. М.: Трансжелдориздат, 1962. – 327 с.
10. ДБН В.1.2-5.2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи. К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 66 с.
11. Євграфов Г.К., Лялін М.Б. Расчеты мостов по предельным состояниям. М.: Трансжелдориздат, 1962. – 336 с.

Аннотация.

Фундаменты существующих мостов малых пролетов, запроектированных в прошлом веке по типовым проектам под устаревшие нагрузки, имеют запасы прочности, заложенные методом предельных состояний. Предложено использовать эти запасы, а для их оценки применять подход, объединяющий в себе идеи теории надежности сооружений с идеями метода предельных состояний. Эта статья посвящена обоснованию статистических характеристик действующих случайных факторов, присущих данному подходу.

Annotation.

The foundations of existing bridges of small spans, projected in the last century on the basis of the standard projects under the old load, have reserves of strength that has been laid down by the limit state method. It was proposed to use these resources, and to evaluate them to apply the approach that combines the ideas of reliability theory with the ideas of the method of limit states. This article is devoted to the justification of the statistical characteristics of random factors inherent in this approach.