

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 624.27

<https://doi.org/10.31713/vt420228>

Абрамов В. М., к.т.н., доцент, Оболонков Д. Ф., ст. викладач
(Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
м. Івано-Франківськ, vr09@i.ua ; d.f.obolonkov@donnaba.edu.ua)
(на період воєнного стану)

ПРО ВИЗНАЧЕННЯ ВАНТАЖОПІДЙОМНОСТІ ПРОГОНОВОЇ БУДОВИ АВТОДОРОЖНЬОГО МОСТУ

Розглянуто деякі питання методики визначення вантажопідйомності автодорожніх мостів, викладеної у чинному нормативному документі і у нових «Методичних рекомендаціях ...».

Нині розрахунок вантажопідйомності конструкцій автодорожніх мостів, в тому числі прогонОВОЇ будови, регламентовано чинним нормативним документом, за яким вантажопідйомність визначається порівнянням показників зусиль у перерізах елементів від характеристичних (нормативних) тимчасових рухомих навантажень з граничними значеннями. В Методичних рекомендаціях з визначення вантажопідйомності автодорожніх мостів, розроблених ДП ДерждорНДІ у 2021 році, викладено деякі нові положення.

Виконано теоретичний аналіз і розрахункову перевірку (апробацію) окремих положень Методичних рекомендацій ... на прикладі реального автодорожнього моста через невелику річку на одній із автомобільних доріг на Харківщині.

Ключові слова: автодорожній міст; прогонОВА будова; вантажопідйомність; розрахунок.

Вступ. Вантажопідйомність прогонОВОЇ будови мосту як головного несучого елемента – це один з основних параметрів, який характеризує експлуатаційний стан споруди в цілому. Від прийнятої методики значно залежить результат визначення вантажопідйомності мосту, що також впливає на планування режиму експлуатації споруди, на своєчасне проведення заходів щодо посилення і ремонту.

Аналіз публікацій. Нині визначення вантажопідйомності

конструкцій автодорожніх мостів, в тому числі прогонової будови, регламентовано нормативними документами [1; 2]. Вантажопідйомність згідно з [1] визначається порівнянням показників зусиль у перерізах елементів від характеристичних (нормативних) тимчасових рухомих навантажень з граничними значеннями, вираженими у відповідних еквівалентних навантаженнях.

Розрахунок зводиться до перевірки виконання умови

$$q_e \geq p_e, \quad (1)$$

де q_e – граничне значення еквівалентного навантаження з урахуванням фактичного технічного стану конструкцій на сьогодні;

p_e – еквівалентне навантаження від характеристичних (нормативних) сучасних тимчасових рухомих навантажень.

Для визначення p_e розглядають колони навантажень Н-30, автомобільне навантаження за схемою АК з навантаженням класу К, та одиничне навантаження у вигляді колісного транспортного засобу НК-80 або НК-100 згідно з чинними нормами [3], із використанням ліній впливу зусиль у прогонової будови, як це показано в нормах минулого [4], та з урахуванням поперечного розподілу таких навантажень [5].

Якщо нерівність (1) не задовольняється, тобто $p_e > q_e$, тоді обчислюють величину зниження вантажопідйомності δ (у відсотках), за якою класифікують експлуатаційний стан.

Величину δ визначають за формулою документа [1]

$$\delta = \left(1 - \frac{q_e}{p_e}\right) 100. \quad (2)$$

Далі в нормах [1] наведено методику розрахунку значення еквівалентного навантаження p_e шляхом використання ліній впливу зусиль з урахуванням коефіцієнта розподілення (K_{np}) рухомого навантаження поперек прогонової будови, наприклад за схемою позацентрового стиску, з посиланням на колишні норми проєктування мостів і труб, в яких викладено таку методику [4].

«Методичні рекомендації з визначення вантажопідйомності автодорожніх мостів», розроблені ДП ДерждорНДІ у 2021 році [6], містять деякі нові пропозиції, наприклад:

– виконувати визначення фактичних значень допустимого

тимчасового навантаження за першою групою граничних станів (а не за першою і другою, як раніше [1]), крім того, пропонується три схеми визначення вантажопідйомності;

- введено поняття коефіцієнта вантажопідйомності як співвідношення допустимого зусилля від тимчасового рухомого навантаження для цього елемента до зусилля від сучасного рухомого навантаження, що розглядається, при цьому вантажопідйомність є результат множення такого коефіцієнта на масу транспортного засобу, відносно якого оцінюється вантажопідйомність;

- при відомому проєктному тимчасовому рухомому навантаженні, відсутності негативних змін стану і умов експлуатації конструкцій, вантажопідйомність приймається просто з таблиці, яку наведено;

- надано чіткий перелік місць перевірочних перерізів для визначення зусиль при оцінюванні вантажопідйомності елементів різних статичних схем.

Видання цих Методичних рекомендації ..., особливо окремим документом, здається корисним і своєчасним. Водночас деякі рекомендаційні положення цього документа сприймаються як непереконливі, які потребують доповнення та доопрацювання. Зокрема це стосується того, що викладено у п. 5.5 документа, відносно обов'язкової перевірки розрахунків, які виконано з використанням метода скінченних елементів (МСЕ), розрахунками спрощеною аналітичною методикою при допустимості розбіжності результатів не більш ніж на 10%.

Мета і завдання роботи. Аналіз і розрахункова перевірка (апробація) окремих положень Методичних рекомендацій ... і надання деяких пропозицій щодо їх уточнення і корегування тексту документа складає основну мету і завдання статті.

Методика дослідження. Для реалізації мети і завдання роботи виконано розрахунково-теоретичні дослідження доцільності вище вказаної умови (щодо допустимої розбіжності результатів розрахунків до 10%) за аналітичними методами (два різні методи) і за МСЕ, а також загальна апробація методики [6] шляхом визначення коефіцієнта поперечного розподілення і зусиль в елементах прогонової будови на прикладі реальної споруди – автодорожнього моста через невелику річку на одній з автомобільних доріг Харківської області.

Результати дослідження. Міст (та його частина зі своєю прогоною будовою і опорами, що збудована пізніше при реконструкції з поширенням проїзної частини) виконано за схемою 3×12, габарит Г 8,3 м, є тротуар шириною 1,7 м з одного боку.

Прогонова будова за статичною схемою балкова, розрізна. Балки (плити з овальними отворами, 9 штук у прольоті) з'єднано за допомогою бетонних шпонок. Плити виконано з попередньо напруженого залізобетону за типовим проєктом 3.503 – 12, розробленим за часів СРСР у 1973 році «Союздорпроект» [7], з повною довжиною 12,0 м (розрахункова довжина $L = 11,4$ м), шириною 980 мм і висотою 600 мм. Опори берегові обсипні стійкові. Опори проміжні також стійкові. Ригелі монолітні залізобетонні.

На рис. 1 показано схему до аналітичного розрахунку K_{np} для сучасного типового навантаження НК-100 згідно з [3].

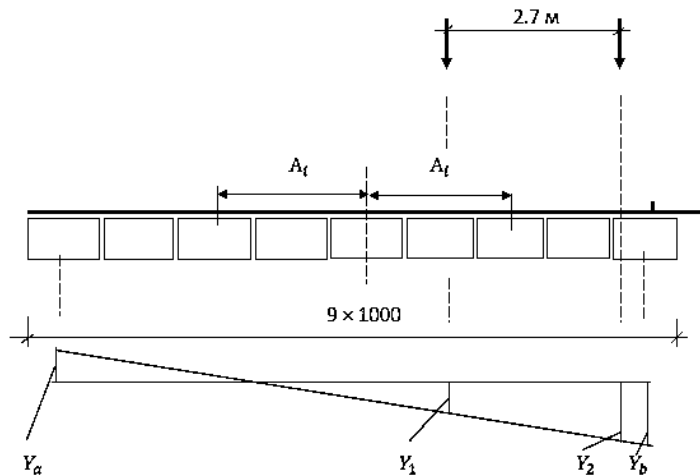


Рис. 1. Схема до розрахунку K_{np} для НК-100 (і НК-80) аналітичними методами (позацентрового стиску і з урахуванням крутіння)

Відстані « A_i » осей 9 балок (плит), позначених зліва направо від осі поперечного перерізу прогонової будови, дорівнюють: $A_1 = A_9 = 4$ м; $A_2 = A_8 = 3$ м; $A_3 = A_7 = 2$ м; $A_4 = A_6 = 1$ м.

Ординати Y_a і Y_b лінії впливу K_{np} визначаються за формулами:

$$Y_a = \frac{1}{9} - \frac{A_1^2}{2(A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + A_4^2)}; \quad (3)$$

$$Y_b = \frac{1}{9} + \frac{A_1^2}{2(A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + A_4^2)}. \quad (4)$$

За формулами (3) та (4) і за схемою на рис. 1, отримано: $Y_a = -0,16$; $Y_b = 0,38$; $Y_1 = 0,16$; $Y_2 = 0,33$.

За формулами:

$$K_{np} = 0,5(Y_1 + Y_2); \quad (5)$$

$$M = K_{np} P(h_1 + h_2 + h_3 + h_4), \quad (6)$$

для НК-100 (навантаження на одну вісь $P = 245$ кН) значення K_{np} і M у найбільш навантаженій плиті (крайній справа) при $h_1 = 2,25$; $h_2 = 2,85$; $h_3 = 2,25$; $h_4 = 1,65$ (рис. 2) складають відповідно 0,245 і 540,23 кНм.

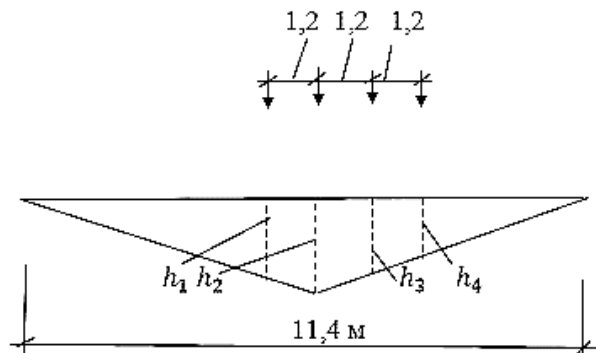


Рис. 2. Схема для визначення найбільших зусиль (M) від НК-100 і НК-80 у найбільш навантаженої плити по лінії впливу M

Еквівалентне навантаження p_e від Н-100, яке використовується в методиці [1], визначається за формулою

$$p_e = \frac{8M}{L^2}. \quad (7)$$

Згідно з формулою (7), $p_e = 33,26$ кН/м. Граничне значення згинального моменту M і еквівалентного навантаження q_e з урахуванням навантаження НК-80 (осьове навантаження $P = 196$ кН), яке було використано під час проєктування мосту (приблизно 1975 р.), за тією ж методикою дорівнюють $M = 432,18$ кНм і $q_e = 26,60$ кН/м. При цьому зниження вантажопідйомності прогонової будови δ за формулою (2) складе

20%. Відповідно до п. 5.2.6 документа [1], технічний стан прогонової будови мосту на теперішній час – «обмежено працездатний».

Розрахунок виконано також другим методом визначення K_{np} , результати якого найбільш відрізняються від першого (узагальнений метод М. Е. Гібшмана з урахування крутіння [8]). За цим методом ординати Y_i лінії впливу K_{np} визначаються за формулою:

$$Y_i = \frac{1}{n} \pm \frac{2A_i^2}{2\sum A_i^2 + 4n\frac{K}{\Pi}}, \quad (8)$$

де n – число плит (9 шт., див. рис. 1, $i = 4$);

K – прогин плити від одиничної сили;

Π – кут крутіння плити від одиничного крутного моменту.

Для середини плити, згідно з [8], виконується умова:

$$\frac{K}{\Pi} = \frac{1GJ_k}{12EJ} L^2, \quad (9)$$

де GJ_k – жорсткість плити на крутіння;

EJ – жорсткість плити на вигин.

Момент інерції J перерізу плити визначається для перерізу, приведеного до прямокутного з прямокутними отворами, згідно з [8]. Момент інерції приведеного перерізу отримано рівним $J = 17,8 \times 10^{-3} \text{ м}^4$.

Момент інерції крутний J_k приведеного перерізу [8] знаходиться за формулою

$$J_k = \frac{4a_1^2 a_2^2}{\frac{a_2}{c_2} + \frac{a_2}{c_3} + \frac{2a_1}{c_1}}, \quad (10)$$

де a_1 і a_2 – висота і ширина приведеного перерізу по осях стінок;

c_1, c_2, c_3 – відповідно товщина бічних, нижньої і верхньої стінок приведеного перерізу.

Момент інерції крутний плити за формулою (10) дорівнює $J_k = 32,05 \times 10^{-3} \text{ м}^4$.

Поправка на крутіння, згідно з [8], із рівняння

$$4\frac{K}{\Pi} = \frac{1}{3}n\frac{GJ_k}{EJ}L^2, \quad (11)$$

дорівнює 294,84.

Нові ординати Y_i лінії впливу K_{np} (тієї ж форми, як і на рис. 1), отримані за формулою (9) з урахуванням знайденого за формулою

(11), складають $Y_a = -0,01$; $Y_b = 0,24$; $Y_1 = 0,15$; $Y_2 = 0,23$.

За формулами (5), (6), (7) і (2) отримано нові значення параметрів: $K_{np} = 0,19$; $M = 418,95$ кНм (від НК-100); $M = 335,16$ кНм (від НК-80); $q_e = 20,63$ кН/м; $p_e = 25,79$ кН/м; $\delta = 20$ %.

За методикою, рекомендованою в [6], розрахунок вантажопідйомності тієї ж прогонової будови виконано також з використанням МСЕ і ПК Liga. Прогонову будову змодельовано плитними і стрижневими елементами. Лінію впливу K_{np} побудовано за ординатами Y_i^0 , які отримано з результатів розрахунку прогонової будови за МСЕ при навантаженні середини довжини крайньої плити одиничною силою за формулою, наведеною в [9]:

$$Y_i^0 = \frac{M_i}{\sum M_i}, \quad (12)$$

де M_i – згинальний момент в середині i -тої плити прогонової будови;

$\sum M_i$ – сума моментів в середині всіх плит прогонової будови.

На рис. 3 показано схеми до розрахунку за МСЕ, на рис. 4 – лінію впливу K_{np} , яку розраховано за МСЕ.

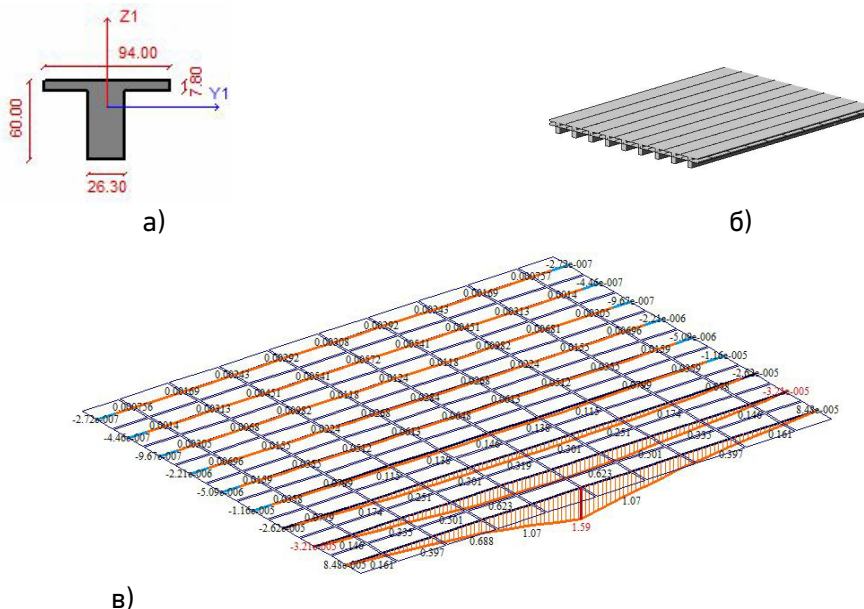


Рис. 3. Розрахункова схема перерізу плити (а), схема прогонової будови за МСЕ (б), результат розрахунку за МСЕ зусиль (M) в елементах прогонової будови від одиничної сили в середині крайньої правої плити (в)

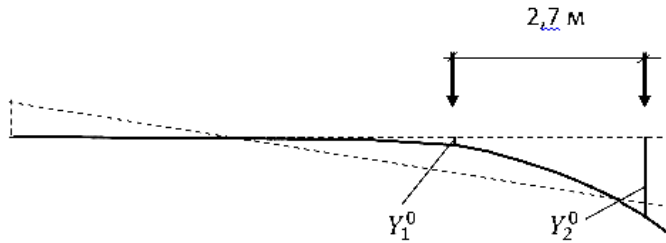


Рис. 4. Схеми лінії впливу K_{np} за розрахунком за МСЕ (крива лінія) і, для порівняння, аналітичної лінії впливу (пряма пунктирна лінія)

З розрахунків за МСЕ (див. рис. 4) і за формулою (8) отримано: $Y_1^0 = 0,03$; $Y_2^0 = 0,40$. Отримані значення за формулою (5) і лінією впливу K_{np} за МСЕ (рис. 4), а також значення зусиль M від НК-100 і НК-80 за формулою (6) і лінією впливу на рис. 2, дорівнюють: $K_{np} = 0,215$; згинальний момент від НК-100, $M = 474,08$ кНм; згинальний момент від НК-80 (навантаження на вісь $P = 196$ кН), $M = 379,26$ кНм.

Результати порівняння розрахунків (згинального моменту M в елементах прогонової будови) за аналітичними методами визначення K_{np} (позацентрального стиску, у чисельнику, та з урахуванням крутіння, у знаменнику) і за чисельним методом (МСЕ), надано в таблиці.

Таблиця

Результати розрахунків

Схема навантаження	Максимальні зусилля, М, кНм		Розбіжність результатів, %
	За аналітичним методом	За МСЕ	
НК-100	540,23/418,95	474,08	14,0/11,6
НК-80	432,18/335,16	379,26	14,0/11,6

Отримані дані показують, що розбіжність результатів може бути і вище ніж 10%. Тому пропонується надати обґрунтування щодо цієї умови при розробці наступної редакції.

Водночас отримана величина зниження вантажопідйомності δ при визначення зусиль в елементах прогонової будови за МСЕ така ж, як і при розрахунку аналітичним методом – (20%): за формулою (7) отримано $q_e = 23,35$ кН/м і $p_e = 29,18$ кН/м; за формулою (2) маємо $\delta = 20\%$.

Пропонується також виконати коригування тексту Методичних рекомендацій ... при складанні наступної редакції документа, надати уточнення з урахуванням наступного:

– в п. 1, абз. 1, замість «...за результатами обстеження ...» доцільно надати: « ...за результатами розрахунків з урахуванням даних обстеження ...», тому що допустиме навантаження і зусилля в елементах визначають розрахунками, а не обстеженням, що також вказано в п. 5.2 документа;

– вантажопідйомність «у долях» (п. 5.1, рядок 5) визначають від характеристик (нормативних) тимчасових рухомих навантажень, значить коефіцієнти, вказані у п. 5.2 (надійності і інші), в цьому випадку не потрібні;

– з п. 6.1.3 доцільно прибрати слово «виконавчої», виконавча документація – це зовсім інше ніж проєктна документація, виконавча – це документація виконувачів робіт, тобто будівельників, а не проєктувальників.

Висновки. Результати аналізу і апробація нових «Методичних рекомендацій ...» надають підстави для наступних висновків:

– розглянута методика («Методичних рекомендацій ...») розрахунку вантажопідйомності елементів автодорожніх мостів потребує подальшого удосконалення, зокрема обґрунтування величини допустимої розбіжності результатів розрахунків різними методами;

– для коригування тексту «Методичних рекомендації ...» при розробці наступної редакції документа можуть бути корисними уточнення, які надано у статті.

1. ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. [Чинний від 2013-12-01]. К. : Мінрегіонбуд України, 2012. 21 с. (Національний стандарт України). **2.** ДБН В.2.3-6-2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження і випробування. Державні будівельні норми України. К. : Мінрегіонбуд України, 2009. 63 с. **3.** ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Навантаження та впливи. Мости та труби. Державні будівельні норми України. К. : Мінрегіонбуд України, 2009. 84 с. **4.** Технические условия проектирования железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб (СН 200 – 62). М. : Трансжелдориздат, 1962. 328 с. **5.** ДБН В.2.3-22:2009. Мости та труби. Основні вимоги проектування. Державні будівельні норми України. К. : Мінрегіонбуд України, 2009. 73 с. **6.** Методичні рекомендації з визначення вантажопідйомності автодорожніх мостів МР В.2.3-37641918-921:2021, Укравтодор. ДП ДерждорНДІ. Київ, 2021. 48 с. **7.** Типовой проект 3.503 – 12. Вып. 16. Пролетные строения из

пустотных плит длиной от 6 до 18 м. Инв. № 384/43. М. : Минтрансстрой СССР. Главтранспроект. Ин-т Союздорпроект, 1973. **8.** Лившиц Я. Д., Онищенко М. М., Шкуратовский А. А. Примеры расчета железобетонных мостов. К. : Вища школа, Главное изд-во, 1986. 263 с. **9.** Козлов А. В. Расчет мостовых конструкций с использованием ПК LIRA-SAPR для начинающих пользователей : учеб. пособие. Воронеж, 2017. URL: [https:// Book. Bridge-structures-analysis-using. LIRA - SAPR - Kozlov-A-V-pdf](https://Book.Bridge-structures-analysis-using.LIRA-SAPR-Kozlov-A-V-pdf) (дата звернення: 15.11.2022).

REFERENCES:

1. DSTU-N B.V.2.3-23:2012. Nastanova z otsiniuvannia i prohnozuvannia tekhnichnoho stanu avtodorozhnikh mostiv. [Chynnyi vid 2013-12-01]. K. : Minrehionbud Ukrainy, 2012. 21 s. (Natsionalnyi standart Ukrainy).
2. DBN V.2.3-6-2009. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Obstezhennia i vyprobuvannia. Derzhavni budivelni normy Ukrainy. K. : Minrehionbud Ukrainy, 2009. 63 s.
3. DBN V.1.2-15:2009. Sporudy transportu. Navantazhennia ta vplyvy. Mosty ta truby. Derzhavni budivelni normy Ukrainy. K. : Minrehionbud Ukrainy, 2009. 84 s.
4. Tehnicheskie usloviya proektirovaniya jeleznodorojnyih, avtodorojnyih i gorodskih mostov i trub (SN 200 – 62). M. : Transjeldorizdat, 1962. 328 s.
5. DBN V.2.3-22:2009. Mosty ta truby. Osnovni vymohy proektuvannia. Derzhavni budivelni normy Ukrainy. K. : Minrehionbud Ukrainy, 2009. 73 s.
6. Metodychni rekomendatsii z vyznachennia vantazhopididomnosti avtodorozhnikh mostiv MR V.2.3-37641918-921:2021, Ukravtodor. DP DerzhdorNDI. Kyiv, 2021. 48 s.
7. Tipovoy proekt 3.503 – 12. Vyip. 16. Proletnyie stroeniya iz pustotnyih плит длиной от 6 до 18 м. Инв. № 384/43. М. : Минтрансстрой СССР. Главтранспроект. Ин-т Союздорпроект, 1973.
8. Livshits YA. D., Onischenko M. M., Shkuratovskiy A. A. Primeryi rascheta jelezobetonnyih mostov. K. : Vischa shkola, Glavnoe izd-vo, 1986. 263 s.
9. Kozlov A. V. Raschet mostovyih konstruksiy s ispolzovaniem PK LIRA-SAPR dlya nachinayuschih polzovateley : ucheb. posobie. Voronej, 2017. URL: [https:// Book. Bridge-structures-analysis-using. LIRA - SAPR - Kozlov-A-V-pdf](https://Book.Bridge-structures-analysis-using.LIRA-SAPR-Kozlov-A-V-pdf) (data zvernennia: 15.11.2022).

Abramov V. M., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor,
Obolonkov D. F., Senior Lecturer (Donbas National Academy of Construction and Architecture, Ivano-Frankivsk (for the period of martial law)

ON DETERMINING THE LOAD CAPACITY OF THE SPAN STRUCTURE OF ROAD BRIDGE

Some issues of the methodology for determining the carrying capacity of road bridges, which are outlined in the current normative

document and in the new "Methodological recommendations ...", are considered.

Currently, the calculation of the load capacity of road bridge structures, including the span structure, is regulated by the current normative document, according to which the load capacity is determined by comparing the force indicators in the sections of the elements from the characteristic (normative) temporary moving loads p_e with the limit values q_e , expressed in the corresponding equivalent loads. Based on the results of the comparison of p_e and q_e , the magnitude of the possible decrease in carrying capacity is determined, by which the operating condition is classified.

In the "Methodical recommendations for determining the carrying capacity of road bridges" developed by the institute DerzhdorNDI in 2021, some new proposals are outlined. The publication of these "Methodological recommendations ...", especially as a separate document, seems useful and timely. However, at the same time, some of the recommended provisions of this document are perceived as unconvincing and need to be supplemented.

The analysis and calculated verification (approbation) of individual provisions of the "Methodical Recommendations..." and the provision of some proposals for their clarification and correction of the text of the document constitute the main goal and task of this article.

In order to verify the expediency of the conditions specified in the Methodical Recommendations... regarding the permissible discrepancy of the results of calculations using the analytical method and the finite element method (FEM) up to 10%, and for the purpose of general approbation of the method, in this work calculations of the carrying capacity of the span structure were performed using the traditional method determining the coefficient of transverse placement (Kpr) analytically, and by calculating Kpr using FEM, on the example of a real structure – a highway bridge across a small river on one of the highways of the Kharkiv region.

Based on the results of the work, the expediency of clarifying some of the provisions of the Methodical recommendations ... was shown, and suggestions for correcting their text were given.

Keywords: road bridge; span structure; carrying capacity; calculation.