



УДК 621.24

• © В.П. Редченко, докт. техн. наук (Дніпропетровський відділ ДерждорНДІ)

# ПРО ОБМЕЖЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ НА АВТОДОРОЖНІХ МОСТАХ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТИЧНОГО ДИНАМІЧНОГО КОЕФІЦІЄНТА

**Анотація.** Практика створення умов безпечної експлуатації автодорожніх мостів показує, що в Україні назріла потреба розроблення нормативного документа, яким можна було б керуватися при встановленні обмеження швидкості руху мостами.

**Ключові слова:** автомобільна дорога, міст, швидкість руху, динамічний коефіцієнт.

**Аннотация.** Практика создания условий безопасной эксплуатации автодорожных мостов показывает, что в Украине назрела необходимость разработки нормативного документа, которым можно было бы руководствоваться при установлении ограничения скорости движения по мостам.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, мост, скорость движения, динамический коэффициент.

**Annotation.** The practice of creating conditions for safe operation of highway bridges shows that in Ukraine there is need for the development of the instrument, which can be guided in setting speed limits on bridges.

**Key words:** road, bridge, speed, dynamic coefficient.

## Вступ

Безпека дорожнього руху та безпечна експлуатація дорожніх споруд є дуже важливими як для держави загалом, так і для її окремих громадян. Одним із засобів попередження аварійних ситуацій на ділянках доріг, які не відповідають нормативним умовам безпечного руху, є обмеження максимальної швидкості руху автотранспорту. У цьому плані аварійна ситуація на мосту, умовно кажучи, є більш небезпечною, ніж на звичайній ділянці дороги, оскільки пов'язана з можливим падінням транспорту з мосту, а також пошкодженням конструкцій самого мосту. Разом з тим в Україні відсутні норми, які б регламентували порядок встановлення обмеження швидкості руху на автодорожніх мостах. Переважно такі обмеження необхідні при певних ситуаційних негараздах, як то: недостатність габариту проїзної частини, відсутність належного огороження проїзної частини, обмеження видимості тощо. Від зменшення швидкості руху автотранспорту в цих випадках напругу очікується зменшення енергії удару при аварійних ситуаціях, а отже і зменшення можливих пошкоджень як транспорту, так і конструкцій мосту (рис. 1). При цьому в кожному випадку оцінка

ситуації та величина обмеження швидкості залишаються суб'єктивними характеристиками, оскільки єдина методика щодо оцінки ситуації та відповідного обмеження швидкості руху автотранспорту відсутні.

Конструктивні особливості мостів, а саме їх робота на динамічне навантаження, також іноді вимагають прийняття рішення про обмеження швидкості руху. Так, в окремих випадках явно видно вплив динамічної роботи прогонової будови на руйнування конструкцій мостового полотна. Для прикладу наведемо залізобетонний шляхопровід на об'їзді м. Новомосковськ з нерозрізною балковою прогоною будовою за схемою 15+42+15 (м). На рис. 2 показано його фасад та проїзна частина. Добре видно, що рівно по межах споруди стан дорожнього покриття різко відрізняється в гіршу сторону від покриття на підходах – і це не вина експлуатаційників, які виконують сізифів труд із латання цих вибоїн. У центральному прогоні в асфальтобетоні наявні поздовжні тріщини, які розташовані над головними балками. Розрахунки показують, що подібна прогонова будова має перші власні форми коливань зі значними викривленнями поперечника, в окремих формах сусідні



Рис. 1. Пошкодження елементів форми мосту внаслідок ударів транспорту, ширина проїзної частини 7 м



Рис. 2. Залізобетонний шляхопровід з нерозрізною балковою прогоновою будовою за схемою 15+42+15 та його проїзна частина

балки при коливаннях перебувають у протифазі, коли одна рухається вниз, то сусідня рухається вгору. Звичайно при цьому в плиті прогонової будови, а отже і в дорожньому покритті виникають згинальні моменти, які при достатньо великій кількості циклів призводять до появи означених тріщин, спочатку в дорожньому покритті та гідро-

ізольації, а згодом і в залізобетонній плиті прогонової будови. Проведення ремонтних робіт за типовими технологіями не дає ефективного результату. Зрозуміло, що варто змінювати певні підходи при проектуванні таких "гнучких" прогонових будов, а одним із запобіжних заходів для мостів, що вже експлуатуються, може бути обмеження швидкості руху для вантажівок, що зменшить амплітуди коливань балок та кількість їх циклів.

Поки що досить рідко обмеження швидкості на автодорожніх мостах встановлюється за результатами натурних випробувань, а саме за фактичними значеннями вантажопідйомності та динамічного коефіцієнта. Нечисленність таких випадків пояснюється саме відсутністю нормативної методики, яка давала б "законні" права встановлювати відповідні обмеження збільшуючи при цьому вантажопідйомність споруди. Враховуючи, що нормативна динамічна добавка знаходиться в межах від 10 % до 35 %, то майже в такому ж діапазоні варто очікувати і збільшення вантажопідйомності мосту при обмеженні швидкості руху автотранспорту.

Практика обмеження швидкості руху транспорту при недостатній вантажопідйомності широко розповсюджена на залізничних мостах, де відпрацьовано єдиний підхід, який закріплено в ряді галузевих нормативних документів. Це дозволяє в багатьох випадках експлуатувати мости з недостатнім класом за вантажопідйомністю, пропускаючи по них потяги на малій швидкості. Закономірно постає запитання, чи можна використати подібний підхід і до автодорожніх мостів. Щоб відповісти на поставлене питання треба спочатку дати відповідь на запитання, як визначати фактичний динамічний коефіцієнт для автодорожніх мостів та порівнювати його

з нормативним, який приймався при проектуванні даного мосту. Натурне визначення динамічного коефіцієнта є одним із завдань, які покладені на динамічні випробування [1], але складність виконання цього завдання на практиці саме для автодорожніх мостів [2] до цього часу не дозволила розробити єдину обґрунтовану та працездатну



методику визначення фактичного динамічного коефіцієнта. На думку автора, щоб виправити ситуацію, необхідно змінити власне підхід щодо визначення фактичного динамічного коефіцієнта як певного числа (як це подано в нормах на проектування) та визначати його як функцію від швидкості руху транспорту, для чого запропонувати відповідну модель, яка б стала основою для розроблення відповідних методик та рекомендацій. Саме розгляду моделі визначення динамічного коефіцієнта і присвячена наступна частина статті.

#### Динамічний коефіцієнт, історичний огляд

Динамічну дію рухомого навантаження на мости, відповідно до чинних норм, враховують введенням в розрахунки “динамічного коефіцієнта”, який більший за одиницю. У сучасній нормативній термінології, яка стосується коливань та вібрацій, існує термін “коефіцієнт динамічного підсилення” – відношення амплітуди реакції при вимушених коливаннях чи вібрації до певної постійної реакції, яка характерна для даного виду збудження [3]. Саме цьому означенню і відповідає термін “динамічний коефіцієнт”, який традиційно застосовують у практиці мостового проектування. Сто років тому при проектуванні моста динамічний вплив рухомого навантаження кожен інженер враховував виходячи з власного досвіду. При цьому застосовували два типи підходи: зменшували допустимі напруження в матеріалах чи збільшували тимчасове навантаження (статично прикладене) на певний коефіцієнт більший від одиниці, який визначався на “...основаним общих соображений...” [4]. Саме останній підхід, який більш реально відображає фізичний процес динамічного навантаження, і ввійшов в подальшу практику. Теоретичні та практичні дослідження, які були виконані у більшості з розвинутих країн на початку минулого століття, дозволили прийти до визначення загального виразу динамічного коефіцієнта, як гіперболічної функції від довжини прогону:

$$1 + \mu = 1 + \frac{a}{b + cL}, \quad (1)$$

де  $L$  – довжина прогону;  
 $a, b, c$  – відповідні коефіцієнти.

У цій формулі динамічний коефіцієнт не залежить від швидкості руху навантаження. Пояснюється це тим, що він визначається для максимально можливої (допустимої) швидкості руху нормативного навантаження. Зрозуміло, що при зміні максимально можливих швидкостей, необхідно змінити значення постійних коефіцієнтів.

Складність проведення досліджень в ті часи, як теоретичних, так і практичних, призвела до дуже

значних відхилень у виразах для динамічних коефіцієнтів, що пропонувалися різними авторами. Відсутні пояснення чому певні формули врешті отримали “перемогу” та приблизно з 1930 років увійшли у вітчизняні норми. Проф. Н.С. Стрелецький прямо вказує на те, що встановлені вони на базі досліджень американських вчених [5]. Аналізуючи викладки [4, 5], які обґрунтовують формулу динамічного коефіцієнта (1), можна прийти до висновку, що вона найбільш відповідає тимчасовому навантаженню у вигляді потяга з локомотивом попереду. Саме наявність важкого локомотива з певним розбалансуванням коліс (паровоз) дає максимальні значення динамічного коефіцієнта для коротких прогонів. Отже, цілком ймовірним є факт, що для нормативного визначення динамічних коефіцієнтів при розрахунках автодорожніх мостів були взяті формули динамічних коефіцієнтів з практики розрахунку залізничних мостів з певним їх зменшенням.

Аналіз норм на проектування мостів за останні сто років, показує, що не зважаючи на суттєве зростання максимальних швидкостей руху автотранспорту за цей же період, визначення динамічного коефіцієнта залишається практично не змінним. У **табл. 1** наведені нормативні формули визначення динамічного коефіцієнта для металевих прогонових будов автодорожніх мостів за останні сто років.

Таблиця 1

#### Нормативні значення динамічного коефіцієнта для металевих прогонових будов автодорожніх мостів за останні сто років

Рік введення норм проектування	Динамічний коефіцієнт (для металевих прогонових будов)
1910	$1 + \frac{10}{20 + L}$
1928	$1 + \frac{26}{59 + 3L}$
1938	$1 + \frac{15}{37,5 + L}$
1984 (діяли до 2007 р.)	$1 + \frac{15}{37,5 + L}$

Так само, як для металевих мостів, практично незмінним є підхід до визначення нормативного динамічного коефіцієнта для залізобетонних мостів. У цьому випадку “довголіттям” відзначається формула, яка була введена ще на початку минулого століття (подавалася у вигляді формули або ж у вигляді таблиці):





$$1 + \mu = 1 + \frac{45 - L}{135}.$$

При цьому поява та розповсюдження поперечно напруженого бетону не відобразилася окремою формулою динамічного коефіцієнта для цих конструкцій, хоча їх динамічні характеристики, зовсім інші ніж для конструкцій із ненапруженого залізобетону. За минулі роки відбулися значні зміни в навантаженні на автодорожні мости, змінилися конструкції прогонових будов, змінилися принципи розрахунків, але незмінними залишилися формули для визначення динамічних коефіцієнтів. Цьому може бути лише два пояснення: перше – вони дуже вдало встановлені й відображають дійсність із значною перспективою або ж друге – вказані формули не відповідають дійсності, але внаслідок певної консервативності та складності в пропонуванні обґрунтованої альтернативи їх залишали незмінними. На мою думку, справедливим є друге пояснення. Так, в нормах 1984 року автори все ж внесли зміни в формули динамічних коефіцієнтів для навантаження АБ, які суттєво відрізняються від формул динамічного коефіцієнта для навантаження АК та більше відповідають результатам практичних досліджень.

У чинних нормах динамічний коефіцієнт визначається однаково як для залізобетонних мостів, так і для металевих та застосовується лише для тандемів навантаження АК і для несучих конструкцій має величину 1,3. Якщо розглянути сумісну дію розподіленого навантаження та тандема, то для довжин прогонів більше ніж 5 м, можна записати наближену формулу для “загального” динамічного коефіцієнта щодо навантаження АК:

$$1 + \mu = 1 + \frac{12}{40 + L}.$$

Динамічні коефіцієнти визначені за цією формулою мають величини середні між значеннями динамічних коефіцієнтів для металевих та залізобетонних мостів за нормами 1984 року.

У всіх розглянутих формулах динамічний коефіцієнт не залежить від швидкості руху транспорту, очевидно варто розуміти, що його значення необхідно відносити до максимальної швидкості руху, яка допускається діючими нормами та правилами. На дорогах України максимальною можливою швидкістю руху, яка встановлена правилами дорожнього руху становить 130 км/год. Чи відповідає нормативний динамічний коефіцієнт для мостів саме такій швидкості? У нормах про це не говориться (знову ж таки на відміну від залізничних мостів), а враховуючи практичну незмінність формул з 1928 року, виникають справедливі сумніви щодо такої максимальної швидкості. Спро-

буйте уявити, як по деяким з наших мостів проїжджає вантажівка зі швидкістю 130 км/год. Як бачимо, питань щодо динамічного коефіцієнта для автодорожніх мостів досить багато.

#### Аналітичні дослідження

При виконанні натурних випробувань насамперед намагаються отримати фактичні дані про конструкцію, які потім порівнюють з аналогічними розрахунковими величинами та на основі цього порівняння роблять певні висновки. У випадку з динамічним коефіцієнтом маємо проблему, яка пов'язана з тим, що ця величина не є характеристикою власне конструкції, а залежить ще й від параметрів навантаження. Нескладно визначити ряд натурних динамічних коефіцієнтів для якогось певного навантаження, наприклад, для певного типу автомобіля, який рухається по певній смузі проїзної частини з різними швидкостями. Далі слід оцінити зміни цього коефіцієнта при зміні смуги руху, при одночасному завантаженні декількох смуг, при русі колон автомобілів з певним інтервалом – це вже набагато складніше. Але найскладнішим буде алгоритм застосування отриманої інформації при визначенні динамічних коефіцієнтів для інших типів навантажень, у тому числі і нормативного навантаження.

Аналітичний аналіз залежності динамічного коефіцієнта для великого різноманіття варіантів навантаження можливий лише при багатьох спрощеннях, які часто зовсім спотворюють кінцевий результат. Спробуємо виконати найпростіший аналіз, пам'ятаючи про можливі кінцеві погрішності для найпростішої моделі мосту – однопрогонувої балки. Нехтуючи силами опору та приймаючи лінію впливу прогину балки в середині прогону за синусоїду, маємо рівняння для прогину балки в середині її прогону при русі по ній сили  $P$  зі швидкістю  $v$  [6]:

$$y_{L/2}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{P\delta_{11}}{k^4(1-\beta_k^2)} \sin \frac{k\pi}{2} \left( \sin \frac{k\pi v}{L} t - \beta_k \sin k\omega_k t \right), \quad (2)$$

де  $L$  – довжина прогону балки;

$\delta_{11}$  – прогин від одиничної сили в середині прогону;

$\omega_k$  – циклічна частота власних коливань балки  $k$ -ї форми;

$$\theta_k = k\pi v / L;$$

$\beta_k = \theta_k / \omega_k = \pi v / L\omega_k = v / 2Lf_k$ , де  $f_k$  – лінійна частота  $k$ -ої форми власних коливань балки.

Враховуючи швидке сходження ряду (2), аналізувати функцію прогину середини балки зручніше за першим членом ряду:

$$y_{L/2}(t) = \frac{P\delta_{11}}{1-\beta^2} (\sin \theta t - \beta \sin \omega t), \quad (3)$$



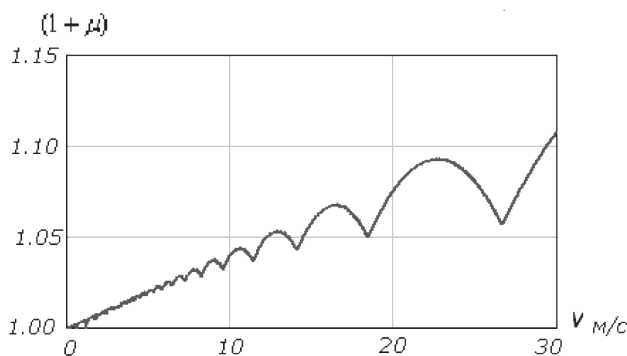
Перший доданок у виразі (3) описує лінію статичного прогину балки, ординати якої збільшені на коефіцієнт  $s = 1 / (1 - \beta^2)$ . Для малих  $\beta$  цей коефіцієнт майже не відрізняється від одиниці – так для швидкостей руху до 30 м/с (108 км/год) його величина для типових мостових прогонових будов не перевищує 1,03. Другий доданок описує динамічну добавку – коливання балки, які виникають внаслідок переміщення сили. З виразу (3) можна отримати значення динамічного коефіцієнта, поділивши його на максимальний статичний прогин ( $P\delta_{11}$ ):

$$(1 + \mu) = \frac{1}{1 - \beta^2} (\sin \theta t - \beta \sin \omega t). \quad (4)$$

Нехтуємо коефіцієнтом перед дужками, замінюємо аргумент часу  $t$  на аргумент шляху  $x$  ( $t = x / v$ ) та підставляємо значення  $\theta$ ,  $\beta$  та  $\omega = 2 \pi f_1$ :

$$(1 + \mu) = \sin(\pi x / L) - \frac{v \sin(2\pi f_1 x / v)}{2L f_1}. \quad (5)$$

Як видно з останнього виразу, динамічний коефіцієнт залежить від швидкості руху сили та від її положення на балці. При цьому його максимальне значення не завжди співпадає (частіше не співпадає) з положенням сили в середині прогону балки. Графік максимальних значень динамічного коефіцієнта в залежності від швидкості руху сили по балці з  $L = 20$  м та  $f_1 = 6$  Гц наведено на **рис. 3**.



**Рис. 3.** Графік зміни динамічного коефіцієнта для прогину середини прогону балки залежно від швидкості руху сили

Як бачимо, в залежності від швидкості руху сили значення динамічного коефіцієнта при загальному його зростанні має локальні максимуми та мінімуми. Пояснюється це тим, що максимум динамічного прогину змінюється в залежності від швидкості руху сили, а максимум статичного прогину залишається постійним.

Реальний автомобіль має як мінімум дві осі, тобто слід розглянути рух по балці двох сил з однаковою швидкістю та певною відстанню між ними (база автомобіля). Функція динамічного

прогину буде складатися з двох доданків за виразом (3), один з яких має затримку в часі  $T$ :

$$y_{L/2}(t) = \frac{P_1 \delta_{11}}{1 - \beta^2} (\sin \theta t - \beta \sin \omega t) + \frac{P_2 \delta_{11}}{1 - \beta^2} (\sin \theta (t - T) - \beta \sin \omega (t - T)), \quad (6)$$

де  $P_1$  та  $P_2$  – значення першої та другої сили відповідно;

$T = B / v$  – затримка в часі для другої сили;

$B$  – відстань між силами (осями авто).

З виразу (6) випливає, що при рівних значеннях сил при певних швидкостях заїзд другої сили може повністю погасити коливання, які виникли від дії першої сили. На практиці цього не відбувається, оскільки в даному аналізі ми розглядаємо лише першу форму власних коливань системи нехтуючи її іншими формами.

На відміну від виразу (3) статична складова за виразом (6) залежить від відстані між силами та від їх відношення. У цілому ж максимум динамічного коефіцієнта стає залежним від: швидкості руху, положення сил на балці, відстані між силами та відношення їх значень. На **рис. 4** наведені графіки максимального динамічного коефіцієнта при русі по балці двох сил ( $P_1 / P_2 = 0,3$ ) з відстанню між ними 3,5 м та 4,5 м, параметри балки взяті ті ж самі, що і для графіка на **рис. 3**.

Як бачимо, вид графіка на **рис. 3** суттєво змінився та й два графіки на **рис. 4** відрізняються між собою досить кардинально. Якщо на одному з них є максимуми динамічного коефіцієнта, то на другому є його мінімуми. Змінюючи відстань між силами та відношення їх значень, можна отримати результати, які щільно заповнюють весь сектор площини між похилими прямими, що з'єднують екстремуми динамічного коефіцієнта (прямі  $a$  та  $b$  на **рис. 4-б**). Завдяки відносному зменшенню значення максимального статичного прогину цей сектор приблизно на 10 % ширший порівняно з аналогічним сектором для випадку руху лише однієї сили.

На початку аналізу ми знехтували масою і розглядали рух безінерційної сили. За даними [7] наявність маси збільшує динамічний вплив рухомої сили. Так, при рухомій масі рівній масі балки та швидкості близько 36 м/с (130 км/год) значення динамічної добавки ( $\mu$ ), розрахованої для безінерційної рухомої сили, збільшується приблизно на 30 %. Отже, при врахуванні маси рухомого тіла, сектор утворений прямими  $a$  та  $b$  на **рис. 4-б** розшириться.

Розглянемо вплив на значення динамічного коефіцієнта нерівностей дорожнього покриття, що призводять до ударів коліс. Рекомендується дію коліс при наїзді на нерівність розглядати як дію

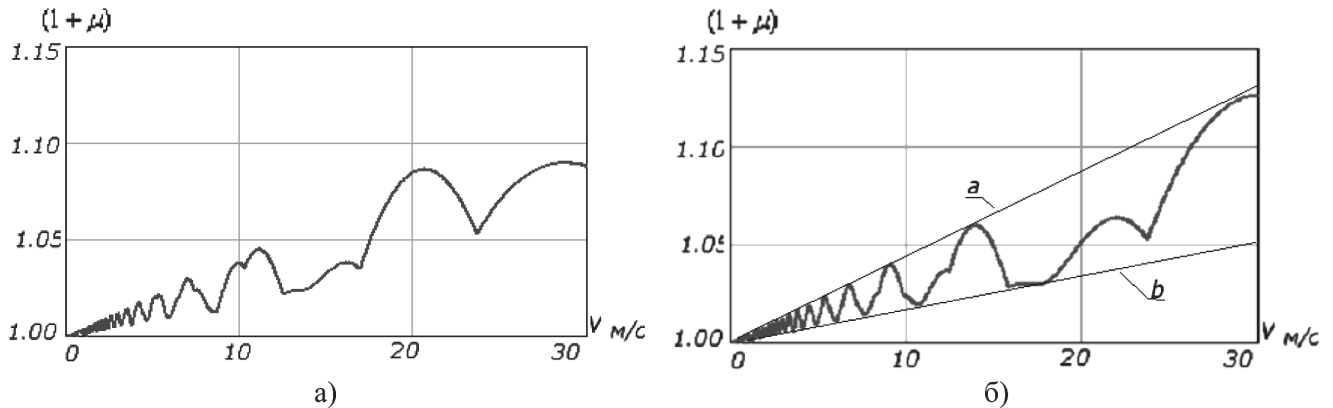


Рис. 4. Графіки зміни динамічного коефіцієнта при русі двох сил з відстанню між ними 3,5 м (а) та 4,5 м (б)

миттєвого імпульсу [7]. Реакція балки на імпульс  $p$  описується наступним виразом:

$$y_{L/2}(t) = \frac{P}{M\omega} \sin \omega t = p\omega\delta_{11} \cdot \sin(\pi X/L) \cdot \sin(\omega t), \quad (7)$$

де  $X$  – координата точки прикладання імпульсу по довжині балки;

$\delta_{11} \sin(\pi X/L)$  – коефіцієнт впливу для прогину в середині прогону балки від дії одиничної сили в точці  $X$ ;

$M$  – маса балки;

$$\omega^2 = 1/M\delta_{11}.$$

Значення динамічної добавки від дії імпульсу отримуємо поділивши вираз (7) на максимальний статичний прогин ( $P\delta_{11}$ ):

$$\mu_{imp} = \frac{P}{P} \omega \cdot \sin(\pi X/L) \cdot \sin(\omega t). \quad (8)$$

Існує низка причин для прояву імпульсного збудження при проїзді автомобіля по мосту, наприклад: падіння колеса у вибоїну, удар колеса в поріг (бугор), дія автомобіля після проїзду “трампліна” і т.п. Падіння колеса у вибоїну викличе коливання прогонової будови навіть на незначній швидкості руху автомобіля, на більшій швидкості руху колесо може просто “перелетіти” вибоїну без суттєвого удару. Сила удару колеса об поріг збільшується зі збільшенням швидкості руху автомобіля. З врахуванням конструкції підвіски сучасних автомобілів, можна говорити, що лише певна частина загальної маси автомобіля приймає участь у створенні імпульсу. Прийmemo узагальнено, що величина імпульсу пропорційна швидкості руху автомобіля та його масі, тоді маємо:

$$\begin{aligned} \mu_{imp} &= \frac{kmv}{mg} \omega \cdot \sin(\pi X/L) \cdot \sin(\omega t) \\ &= \frac{kv}{g} \omega \cdot \sin(\pi X/L) \cdot \sin(\omega t), \end{aligned} \quad (9)$$

де  $m$  – маса автомобіля,

$P = mg$  – вага автомобіля;

$k$  – коефіцієнт пропорційності, що визначає величину імпульсу від добутку маси та швидкості руху автомобіля.

Як видно з виразу (9) імпульсна добавка змінює значення динамічного коефіцієнта, а графік максимальних його значень змінюється з розширенням сектора між прямими  $a$  та  $b$  на рис. 4-б. Величина розширення сектора значень динамічного коефіцієнта від дії імпульсу залежить від багатьох факторів, як то: власних форм та частот прогонової будови, конструкції автомобіля та його підвіски, профілю проїзної частини, наявності нерівностей та їх положення на прогоновій будові тощо.

Окрім розглянутих вище факторів, які впливають на величину динамічного коефіцієнта, варто врахувати ще особливості конструкції більшості прогонових будов автодорожніх мостів. Насамперед це стосується балкових конструкцій, де в поперечнику встановлено ряд балок однакової жорсткості. При заїзді на таку прогонову будову збуджується коливання всіх балок за рядом форм коливань з близькими значеннями частот. Під час руху автомобіля енергія коливань передається між балками, амплітуди коливань одних балок збільшуються, інших зменшуються – виникає явище відоме під терміном “биття”. На момент максимального квазістатичного прогину динамічна добавка через “биття” може бути збільшена або ж зменшена. Подібне збільшення динамічної добавки викличе і нерівномірний розподіл мас в поперечнику прогонової будови та інші структурні особливості прогонової будови, які призводять до утворення низки власних форм коливань з викривленням поперечника прогонової будови (чим ми знехтували при переході від виразу (2) до виразу (3)).

Таким чином, динамічний коефіцієнт можна подати у вигляді, де динамічна добавка складається з декількох доданків:



$$(1 + \mu) = 1 + (\mu_p + \mu_b + \mu_m + \mu_{imp} + \mu_s) + \\ = 1 + (1,4\mu_p + \mu_{imp} + \mu_s), \quad (10)$$

де  $\mu_p$  – динамічна добавка від руху одиничної сили;

$\mu_b \approx 0,1 \mu_p$  – динамічна добавка за рахунок наявності декількох осей;

$\mu_m \approx 0,3 \mu_p$  – динамічна добавка за рахунок наявності маси автомобіля;

$\mu_{imp}$  – динамічна добавка від ударів коліс;

$\mu_s$  – динамічна добавка за рахунок структурних особливостей прогонової будови.

За розглянутою нами моделлю область значень динамічного коефіцієнта в залежності від швидкості руху буде лежати нижче певної лінії, яку наближено приймаємо у вигляді похилої прямої, рівняння якої має такий вигляд:

$$(1 + \mu) = 1 + a + \frac{(1,4+s) \cdot v}{2L f_1}, \quad (11)$$

де  $a$  – константа, що враховує удари коліс не залежно від швидкості руху;

$s$  – коефіцієнт, який враховує загальну динамічну добавку від ударів коліс та структурних особливостей прогонової будови.

Таким чином, для визначення фактичного динамічного коефіцієнта, за результатами натурних випробувань варто намагатися отримати функцію прямої за виразом (11).

#### Результати натурних експериментів

Аналіз графіків на **рис. 4** дозволяє попередньо сформулювати основні моменти методики проведення натурних випробувань для визначення функції динамічного коефіцієнта:

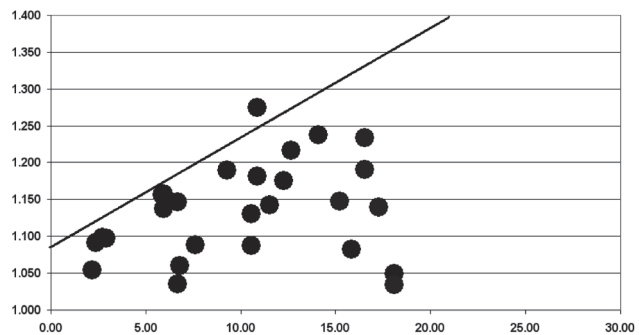
- варто отримати низку значень динамічного коефіцієнта, обов'язково починаючи з малих швидкостей руху (від 5 км/год);

- низка значень динамічного коефіцієнта повинна бути визначена для різних швидкостей (до максимально можливих за ситуацією), та повинен бути якомога більша (хоча б 15 значень на інтервалі 5 – 60 км/год);

- важливим є також точно визначити швидкість руху навантаження.

Спеціальні натурні дослідження за темою даної статті не проводилися, нижче представлені дані випробувань, з результатів яких можна виділити інформацію і про динамічний коефіцієнт. Випробування полягали в реєстрації динамічних прогинів балок прогонової будови мосту при проїзді випробувального навантаження з різними швидкостями та опрацюванні отриманих даних за затвердженою “Укравтодором” методикою [8].

На **рис. 5** наведені фактичні значення динамічного коефіцієнта для прогонової будови мосту через Ташлицьке водоймище. Міст збудовано у 1980 році під тимчасові навантаження Н-30, НК-80 за нормами СН 200-62. Залізобетонна прогонова будова довжиною 33 м має в поперечнику 8 балок з напруженого залізобетону за типовим проектом “Союздорпроекта” інв. № 384/27.



**Рис. 5.** Натурні значення динамічного коефіцієнта для залізобетонної прогонової будови довжиною 33 м залежно від швидкості руху автомобіля (м/с)

Під час випробувань було виконано з різними швидкостями руху 25 проїздів вантажівок КрАЗ масою близько 25 т. Для даного випадку функція динамічного коефіцієнта (пряма на графіку) запишеться як:

$$(1 + \mu) = 1 + 0,08 + 0,0145v . \quad (12)$$

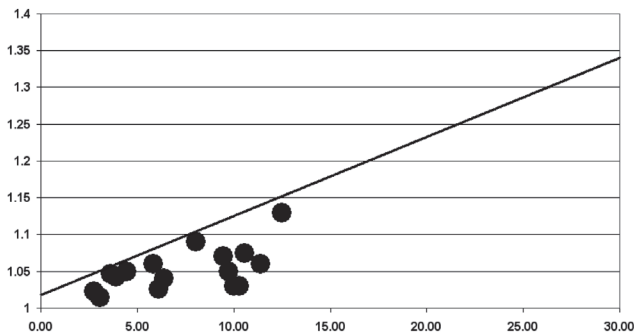
Для даної прогонової будови добуток  $L f_1 = 92,5$  мГц, а отже коефіцієнт, який характеризує загальну динамічну добавку від ударів коліс та структурних особливостей прогонової будови (11) має значення  $s = 1,28$ . Варто зазначити, що проїзна частина мосту на час випробувань мала вибоїни, а коливання прогонової будови при проїзді навантаження відзначаються збудженням 4–5 власних форм з викривленням поперечника.

За нормами проектування СН 200-62 для навантаження Н-30 динамічний коефіцієнт має значення 1,09 – саме таке значення динамічного коефіцієнта враховувалося при проектуванні даної споруди. За результатами випробувань таке значення динамічного коефіцієнта спостерігається вже на швидкості в 10 км/год. Для нормативного тимчасового навантаження АБ за діючими нормами розрахунковий динамічний коефіцієнт має значення 1,36 – це значення вже більш точно відображає фактичний динамічний вплив тимчасового навантаження на прогонову будову, і якби при проектуванні мосту було враховано саме його, то за результатами випробувань допустима швидкість мала б значення близько 70 км/год.





На **рис. 6** представлені фактичні значення динамічного коефіцієнта для прогонової будови шляхопроводу біля с. Балки. Споруда збудована у 2007 році, під тимчасові нормативні навантаження А-11 та НК-80 за СНиП 2.05.03-84\*. Металева прогонова будова індивідуального проектування з розрахунковою довжиною 51 м має в поперечнику 4 головні балки, які між собою об'єднані поперечними балками та ортотропною плитою проїзної частини.



**Рис. 6.** **Натурні значення динамічного коефіцієнта для металевої прогонової будови довжиною 51 м залежно від швидкості руху автомобіля (м/с)**

Під час випробувань було виконано з різними швидкостями руху 16 проїздів вантажівок КрАЗ масою близько 23 т. Для нашого випадку функція динамічного коефіцієнта запишеться як:

$$(1 + \mu) = 1 + 0,02 + 0,0105v. \quad (13)$$

Для даної прогонової будови добуток  $Lf_1 = 79$  мГц, а отже коефіцієнт, який характеризує загальну динамічну добавку від ударів коліс та структурних особливостей прогонової будови (11) має значення  $s = 0,26$ . У цьому випадку випробування проводилися перед здачею споруди в експлуатацію – вибоїн в покритті проїзної частини не було. При проїзді навантаження збуджувалися лише перші дві форми коливаль: без викривлення поперечника та крутильна, при якій викривлення поперечника є мінімальним (жорсткі поперечні балки).

Динамічний коефіцієнт, що врахований проектом, має значення 1,17. За результатами випробувань таке значення динамічного коефіцієнта маємо на швидкості близькій до 55 км/год. Для нормативного тимчасового навантаження АБ розрахунковий динамічний коефіцієнт має значення 1,26 – як і в попередньому випадку, це значення також точніше відображає фактичний динамічний вплив тимчасового навантаження на прогонову будову, а допустима швидкість при цьому становила б близько 80 км/год.

## Висновки

Практика створення умов безпечної експлуатації автодорожніх мостів показує, що в Україні назріла потреба розробки нормативного документа, яким можна було б керуватися при встановленні обмеження швидкості руху мостами. Причинами обмеження швидкості можуть бути різні ситуаційні випадки, наприклад, недостатній габарит проїзної частини чи недоліки огороження, а також особливості динамічної роботи прогонових будов мосту, які можна виразити через їх фактичний динамічний коефіцієнт. Розглянута модель дає змогу за результатами натурних випробувань визначити фактичний динамічний коефіцієнт як функцію від швидкості руху транспортного засобу, що дає можливість більш точно визначити вантажопідйомність мосту, а в певних випадках і збільшувати її шляхом обмеження швидкості руху. Звичайно, необхідно провести набагато більше натурних досліджень, які дозволили б перевірити, удосконалити та розвинути модель для різних типів прогонових будов за статичною схемою та матеріалом. Цікавим буде встановлення залежності постійних параметрів  $a$  та  $s$  у виразі (11) від типу конструкції та стану покриття – це дасть змогу закладати в проектах більш ефективні конструкції дорожнього покриття. Загалом тема статті є важливою та актуальною і може бути предметом досліджень для низки науково-дослідних, зокрема дисертаційних, робіт.

## ЛІТЕРАТУРА

- 1. Споруди транспорту.** Мости та труби. Обстеження і випробування: ДБН В.2.3-6-2009. – [Чинні з 2009-11-11]. – К.: Мінрегіонбуд, 2009. – 43 с. – (Державні будівельні норми).
- 2. Редченко В.П.** Динамічний коефіцієнт автодорожніх мостів. Проблеми натурального визначення / В.П. Редченко // Дороги та мости. – К.: ДерждорНДІ, 2006. – Вип.6. – С. 122 – 133.
- 3. Вибрація.** Термины и определения: ГОСТ 24346-80. – [Действительный от 1981-01-01]. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 32 с..
- 4. Передерий Г.П.** Курс мостов, ч.1. / Г.П. Передерий. – М., 1931. – 738 с.
- 5. Стрелецкий Н.С.** Курс металлических конструкций / Н.С. Стрелецкий. – М.: Стройиздат, 1944. – Ч.3. – 499 с.
- 6. Вибрации** в технике: справочник в 6-ти томах / [В.В. Болотин, И.И. Блехман, Ф.М. Диментберг и др.]. – М.: Машиностроение, 1978. – 1981 с.
- 7. Динамика** железнодорожных мостов / [Под ред. Н.Г. Бондаря]. – М.: Транспорт, 1965. – 412 с.
- 8. Рекомендації** з проведення діагностики стану прогонових будов мостів за динамічною дією рухомого навантаження: РВ.2.3-218-03450778-711:2007. – [Чинні від 2008-01-01]. – К.: ДерждорНДІ, 2007. – 27 с.