

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.042.8:624.872

Ю. М. ГОРБАТЮК<sup>1\*</sup>, К. І. СОЛДАТОВ<sup>2\*</sup>, В. Є. АРТЬОМОВ<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. Військової підготовки спеціалістів Держспецтрансслужби, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (093) 339 41 28, ел. пошта Yuri.Gorbatyuk@gmail.com

<sup>2\*</sup> Каф. «Мости», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (096) 527 26 01, ел. пошта kim-kim@ua

<sup>3\*</sup> Дослідна лабораторія «Dynamics & Structures, Lab.», Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (050) 457 68 19, ел. пошта v.artomov@gmail.com

### ДО ПИТАННЯ ДОПУСТИМОЇ ШВИДКОСТІ РУХУ ПОЇЗДІВ ПО НАПЛАВНИХ МОСТАХ

**Мета.** В публікації наведені результати розрахунків прогонових будов для наплавних мостів. Метою даного дослідження є визначення: максимально допустимої швидкості руху транспорту, яка не призводить до появи наднормативних напружень і деформацій в конструкціях моста. **Методика.** В роботі використовується порівняльний метод, аналітичні методи розрахунку мостів, розрахунки на міцність, витривалість, максимальні дотичні напруження. **Результати.** Збільшення довжини понтону навіть на 1м. (з 10,5 до 11,5 м) супроводжується зниженням переміщень (та інших похідних параметрів напружено-деформованого стану) прогонової будови у 4, 7, 9 разів; за певних розмірів понтонів система значно втрачає стабільність у водному середовищі; висота перерізу понтону не суттєво впливає на стан прогонової будови плавучої системи; швидкість течії водотоку суттєво впливає на напружено-деформований стан наплавного моста; аналіз фазових траєкторій свідчить, що коливання наплавного моста у водному середовищі мають періодичний, але не зовсім стабільний характер; **Наукова новизна.** Дослідження дозволяє зробити новий крок в детальному моделюванні роботи наплавного мосту з урахуванням швидкості руху тимчасового навантаження. **Практична значимість.** Враховуючи те, що єдиного нормативного документу, який регламентував би порядок визначення швидкісних режимів руху залізничного і автомобільного транспорту по наплавних мостах в Україні, наразі не існує, публікація дає змогу зробити ряд висновків, що є універсальними для розрахунку допустимої швидкості руху по наплавних мостах.

**Ключові слова:** залізничні мости; наплавні мости; рух поїздів; прогонові будови; допустима швидкість; прогрес мостобудівництва

#### Вступ

В абсолютній більшості випадків наведення плавучої системи обумовлене необхідністю пропуску тимчасового навантаження – залізничного, автомобільного, пішохідного. Ключовим у даному випадку є поняття «швидкий пропуск», адже швидкість руху транспорту є основним показником ефективності функціонування будь-якої транспортної магістралі. У зв'язку з цим постає актуальне питання дослідження і оптимізації конструкції наплавного мосту з точки зору забезпечення максимальної швидкості. З факторів, які до недавнього часу унеможлилювали детальне моделювання роботи наплавного мосту з урахуванням швидкості руху тимчасового навантаження, можна відмітити:

- складність задачі (існуючі аналітичні моделі побудовані для конкретних конструкцій і розрахункових умов і не дають можливості аналізувати параметри системи у широкому діапазоні значень);

- плоска постановка задачі (більшість аналітичних моделей пристосовані до розрахунку наплавного мосту як плоскої системи);

- відсутність ефективних методів аналізу (застосування модального аналізу конструкції має відомі обмеження);

- відсутність ефективного числового апарату (широкомасштабні числові експерименти стали можливими з появою сучасної комп'ютерної техніки і відповідних систем автоматизованого проектування).

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Крім того єдиного нормативного документу, який регламентував би порядок визначення швидкісних режимів руху залізничного і автомобільного транспорту по наплавних мостах в Україні, наразі не існує. Для організації руху транспорту по наплавних мостах і паромним переправам користуються, як правило, нормативними і методичними розробками радянських часів, в тому числі військового спрямування. Наприклад, вказівки [1] обмежують швидкість руху автомобільного транспорту на підходах до плавучих систем до 20 км/год, а згідно [2] швидкість руху поїздів по наплавних мостах не повинна перевищувати 10 км/год за умови подвійної тяги та 15 км/год – за умови одиночної тяги.

**Мета**

Отже, метою даного дослідження є визначення: максимально допустимої швидкості руху транспорту, яка не призводила б до появи наднормативних напружень і деформацій в конструкціях моста, а також відповідала критеріям безпеки; «критичної» швидкості руху транспорту, з якою пов'язані резонансні явища; уточнених динамічних коефіцієнтів для проектування наплавних мостів.

**Методика**

У зв'язку з цим до розрахункової моделі висуваються наступні вимоги:

- можливість урахувати швидкість руху тимчасового навантаження, а також зміну будь-якого параметру системи у часі;
- бути статико-динамічною (тобто одночасно урахувати умовно статичну роботу споруди як пружної деформованої системи та інерційні сили, які виникають внаслідок динамічних переміщень елементів конструкції мосту);
- бути просторовою (із урахуванням взаємного впливу різних видів коливань: лінійних, кутових) та дискретною, з можливістю її розрахунку у середовищі комп'ютерного моделювання.

Ефективною реалізацією перелічених вище вимог можна вважати математичну модель мостової конструкції, яка побудована за законами динаміки просторового руху твердого тіла у формі рівнянь Ньютон-Ейлера:

$$\begin{cases} ma_x = F_x; & J_x \varepsilon_x + (J_z - J_y) \omega_y \omega_z = M_x; \\ ma_y = F_y; & J_y \varepsilon_y + (J_x - J_z) \omega_z \omega_x = M_y; \\ ma_z = F_z; & J_z \varepsilon_z + (J_y - J_x) \omega_x \omega_y = M_z, \end{cases} \quad (1)$$

де  $m$  – маса, що зосереджена у вузлу конструкції;  $a_x, a_y, a_z$  – лінійні прискорення вузла конструкції у напрямку відповідних осей глобальної системи координат;  $F_x, F_y, F_z$  – компоненти головного вектора сил, прикладених до вузла;  $J_x, J_y, J_z$  – головні моменти інерції маси;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  – компоненти кутового прискорення вузла;  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – компоненти кутової швидкості вузла;  $M_x, M_y, M_z$  – компоненти головного моменту сил, прикладених до вузла.

Перше рівняння у кожному рядку системи (1) характеризує поступальний рух вузла конструкції у глобальній системі координат, друге – його обертання. Для випадку пружної стержневої системи, права частина кожного рівняння (1) характеризує пружну реакцію конструкції на зовнішній вплив, а також дисипативні властивості системи:

$$\begin{cases} \bar{F} = \bar{F}_R + \bar{F}_d; \\ \bar{M} = \bar{M}_R + \bar{M}_d, \end{cases} \quad (2)$$

де  $\bar{F}_R, \bar{M}_R$  – пружні реакції вузла стержневої системи на зовнішнє навантаження (сила й момент, відповідно);  $\bar{F}_d, \bar{M}_d$  – дисипативні сила й момент, які моделюють розсіювання енергії стержневої системи у зовнішнє середовище під час її руху у часі, відповідно.

Система рівнянь (1) характеризує просторовий рух вузла конструкції, який має шість ступенів вільності. За наявності зовнішніх в'язей, у цій системі рівнянь урахуємо відповідні граничні умови. Повна конфігурація усієї моделі в будь-який момент часу характеризується системою з  $6n$  диференціальних рівнянь другого порядку, або системою з  $12n$  диференціальних рівнянь першого порядку (3). Поняття «динамічне переміщення» тут застосовано у тому значенні, що воно є результатом не «статичного» розрахунку моделі методами будівельної механіки, а шляхом прямого інтегрування рівнянь руху конструкції як твердого тіла. Точ-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ка над параметром у рівняннях (3) означає диференціювання даного параметра за часом (на-

приклад,  $\dot{v}_x = dv_x / dt$ ).

$$12n \begin{cases} m\dot{v}_x = F_x; & v_x = \dot{x}; & J_x\dot{\omega}_x + (J_z - J_y)\omega_y\omega_z = M_x; & \omega_x = \varphi_x; \\ m\dot{v}_y = F_y; & v_y = \dot{y}; & J_y\dot{\omega}_y + (J_x - J_z)\omega_z\omega_x = M_y; & \omega_y = \varphi_y; \\ m\dot{v}_z = F_z; & v_z = \dot{z}; & J_z\dot{\omega}_z + (J_y - J_x)\omega_x\omega_y = M_z; & \omega_z = \varphi_z, \end{cases} \quad (3)$$

де  $x, y, z$  – динамічні лінійні переміщення вузла конструкції відносно відповідних осей глобальної системи координат;  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$  – те ж, кутові переміщення.

Рішення системи з  $12n$  диференціальних рівнянь (3) може бути отримано за допомогою методу чисельного інтегрування – наприклад, методу Рунге-Кутта четвертого порядку точності [3]. Результатом рішення системи рівнянь є кінематичні параметри: лінійні та кутові швидкості та переміщення всіх вузлів конструкції.

На рис. 1 наведено основні елементи конструкції наплавного мосту і відповідні їм елементи розрахункової моделі. Кожна прогонова будова та секція понтону моделюється стержневим скінченним елементом, який працює у складному напружено-деформованому стані: на згин у двох взаємно перпендикулярних площинах (вертикальній, горизонтальній), а також розтяг-стиск з крученням відносно власної поздовжньої осі. Точками показані місця зосере-

дження мас. Вузли розрахункової моделі утворено у місцях з'єднання скінченних елементів (прогонових будов, понтонів). Розглядається як лінійна просторова робота кожного вузла системи, так і його обертання. У вузлах з тросовими закріпленнями розміщено додаткові стержні еквівалентної поздовжньої жорсткості, робота яких на розтяг приймається лінійною. Кінцеві перерізи усіх елементів, які моделюють тросові закріплення, прийнято шарнірними. Стосовно поперечних (якірних) закріплень річкових секцій понтонів, у роботі розглядаються наступні варіанти:

- секції мають двобічні закріплення (нормальний режим експлуатації);
- секції мають односторонні закріплення (екстремний режим експлуатації, коли протилежна частина якорів або ще не встановлена, або зруйнована);
- секції не мають закріплень (повністю аварійний режим експлуатації).

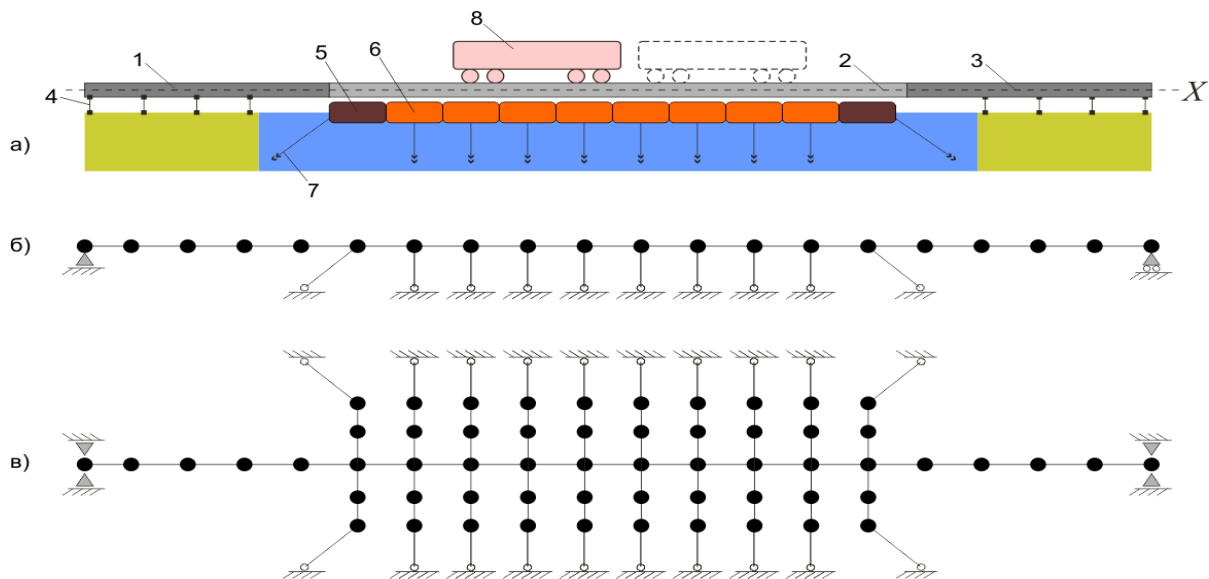


Рис. 1. Наплавний міст (а) і його розрахункова модель (б – фасад, в – план):

1, 3 – берегові частини; 2 – річкова частина; 4 – берегові опори; 5, 6 – понтонні секції; 7 – тросові закріплення; 8 – рухомий склад

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

На елементи конструкції наплавного мосту під час експлуатації діють наступні зовнішні навантаження: тимчасове навантаження від транспортних засобів, аеродинамічне навантаження (тиск вітру) та навантаження з боку водного середовища (опір рідини). На рис. 2 показані зусилля, які діють на секцію понтону і мають бути прикладені до відповідних вузлів розрахункової моделі.

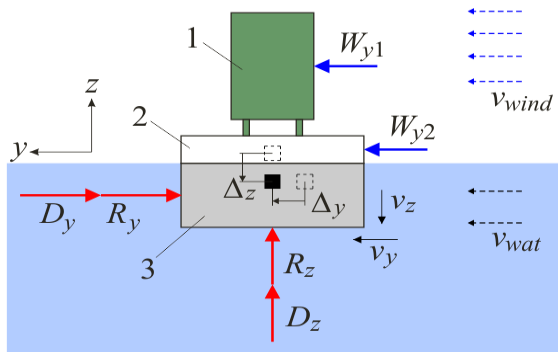


Рис. 2. Схема навантажень на секцію понтона:  
1 – транспорт; 2 – незатоплена частина понтону;  
3 – затоплена частина понтону

Водне середовище спричиняє опір коливанням зануреного у воду понтона; загальна величина цього опору  $R_y$  визначається сумою хвильового опору рідини та опору за рахунок тертя за формулою (4):

$$R_y(t) = \frac{\gamma}{g} A_y(t) (v_{wat} + v_y(t))^2 (C_1 + C_2), \quad (4)$$

де  $\gamma = 10000$  – питома вага прісної води,  $\text{Н/м}^3$ ;  $g = 9,81$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ ;  $A_y$  – площа поверхні понтону, яка безпосередньо контактує з водним середовищем (по нормалі до течії);  $v_{wat}$  – швидкість течії водотоку,  $\text{м/с}$ ;  $v_y$  – швидкість переміщення понтону поперек мосту у процесі вимушених коливань;  $t$  – час;  $C_1$  – коефіцієнт, який залежить від безрозмірного числа Фруда, швидкості течії води і геометричних розмірів судна.

За прийнятою у суднобудуванні практикою проектування тихохідних суден  $C_1 \leq 0,23 \dots 0,25$  [4];  $C_2$  – коефіцієнт лобового опору, який залежить від критерію Рейнольдса і визначається в залежності від форми понтона (див. рис. 2 і 3).

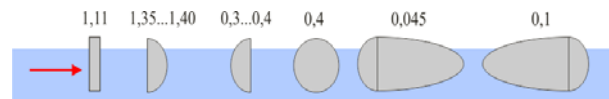


Рис. 3. Коефіцієнти лобового опору для різних геометричних форм

Сила гідростатичного тиску  $R_z$  залежить від ваги конструкції понтону і змінюється у часі за виразом (5):

$$R_z(t) = \gamma h_w(t) A_z, \quad (5)$$

де  $h_w$  – висота зануреної у воду частини понтону, м (осадка);  $A_z$  – площа поверхні понтону, яка безпосередньо контактує з водним середовищем (горизонтальна). Якщо початкову осадку понтону позначити через  $h_{w0}$ , то осадка  $h_w$ , а також площа бічної контактної поверхні  $A_y$  у будь-який момент часу  $t$  визначаються формулами:

$$\begin{aligned} h_w(t) &= h_{w0} + \Delta_z(t); \\ A_y(t) &= b h_w(t), \end{aligned} \quad (6)$$

де  $b$  – ширина секції понтону, м.

Середня осадка порожніх понтонів з майна НЖМ-56 складає 18 см, з вантажем у 56 т – 100 см (при габаритних розмірах  $2,6 \times 9 \times 1,4$  м). Для прямокутних у плані понтонів коефіцієнт лобового опору складає 1,11, в той час як є форми для яких даний коефіцієнт значно менший. Можливо з цих міркувань можна проектувати іншу форму понтонів.

Дисипація енергії коливань плавучої системи відбувається не тільки за рахунок внутрішнього тертя у матеріалі конструкції, а й за рахунок дисипативних властивостей водного середовища. Далі будемо вважати, що напрямок течії водотоку співпадає з додатнім напрямком осі у глобальній системі координат. Окрім сил опору  $R_y$  та  $R_z$ , на кожен вузол розрахункової моделі з боку водного середовища також впливають дисипативні сили  $D_y$  і  $D_z$ :

$$\begin{aligned} D_y(t) &= \frac{\beta_w A_y(t)}{\Delta_y(t)} v_y(t); \\ D_z(t) &= \frac{\beta_w A_z(t)}{\Delta_z(t)} v_z(t), \end{aligned} \quad (7)$$

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

де  $\beta_w$  – динамічна в'язкість води;  $A_y, A_z$  – площі контактних «змочених» поверхонь, які перпендикулярні осям  $y, z$  глобальної системи координат, відповідно;  $\Delta_y, \Delta_z$  – горизонтальне (поперечне) і вертикальне переміщення вузла системи, відповідно;  $v_y, v_z$  – лінійні швидкості руху вузла системи у горизонтальному (попе-

речному) і вертикальному напрямках, відповідно.

Опір водного середовища коливанням понтонів вздовж моста не урахуємо. Залежність динамічної в'язкості води  $\beta_w$  від температури наведена у табл. 1 [5].

Таблиця 1

Залежність динамічної в'язкості води від температури

Температура, °C	0	5	10	20	30	40	50
Динамічна в'язкість води, МПа·с	1,787	1,519	1,308	1,002	0,798	0,653	0,547

Згідно [6], динамічний аналіз з урахуванням аеропружних явищ є окремим розрахунком мостової конструкції, при цьому граничне значення вітрового навантаження використовується для розрахунків стійкості положення, міцності та стійкості форми, а експлуатаційне значення – у перевірках конструкції за другою групою граничних станів. Вітрове навантаження вводимо у розрахункову модель для випадку, коли воно діє поперек мосту (вздовж течії водотоку). Рівнодіюча  $W_y$  у такому разі спрямована у напрямку осі  $y$  глобальної системи координат та прикладена до центру ваги відповідної контактної поверхні [6].

$$W_y(t, v_w) = \gamma_f W_0(v_w) C(t), \quad (8)$$

де  $\gamma_f = 1,15$  – коефіцієнт надійності для граничного значення вітрового навантаження [6];  $W_0$  – характеристичне значення вітрового тиску, яке залежить від вітрового району, у якому розташовано міст, та швидкості вітру [6];  $C$  – коефіцієнт, який залежить від положення споруди над рівнем води, пульсації вітру, просторової кореляції вітрового тиску та ін. [6];  $t$  – час;  $v_w$  – швидкість вітру (у місцевості для наведення наплавних мостів не повинна перевищувати 12 м/с [2]).

Слід відзначити, що на відміну від нормативної методики [6], у запропонованій моделі вітрове навантаження  $W_y$  (8) змінює своє значення у часі. Це обумовлено тим, що плавуча система у процесі коливань постійно переміщується у вертикальному напрямку, а отже затоплювана і незатоплювана частини понтонів пропорційно змінюють свої розміри і координати центрів ваги. На рис. 2 зображено дві

складові вітрового навантаження. Зусилля  $W_{y1}$  прикладається до центру ваги бічної поверхні рухомого складу, а зусилля  $W_{y2}$  – до центру ваги незатопленої частини понтону.

Тимчасове навантаження у запропонованій розрахунковій моделі приймаємо у вигляді системи зосереджених силових факторів, які рухаються на заданій швидкості вздовж лінії, що поєднує центри ваги перерізів відповідних скінченних елементів. Кожна зосереджена сила характеризує осьовий тиск колісної пари відповідного транспортного засобу (вагону, локомотиву тощо), без урахування зміни положення підресорених частин. Перелік транспортних засобів для моделювання наведено у таблиці 2. Кожна модель залізничного навантаження формується у вигляді системи зосереджених силових факторів, які рухаються вздовж відповідних скінченних елементів на заданій швидкості. Розглядаємо одну з двох принципово різних моделей: рухомий склад звичайних залізничних магістралей СНД [7] зі швидкістю руху до 144 км/год (табл. 2) та друга модель, що передбачає рухомий склад швидкісних і високошвидкісних магістралей Європи [8] зі швидкістю руху до 400 км/год і у даній публікації не розглядається. Моделі поїздів для звичайного руху складаються з одного локомотиву (електровозу або тепловозу) та певної кількості однакових вантажних вагонів.

У рамках розробленої динамічної моделі проведено серію числових експериментів, на меті яких є виявлення характерних особливостей моделі, дослідження її реакцій на зміну основних параметрів у часі, визначення «проблемних» місць конструкції, розробка рекомендацій з удосконалення її елементів тощо (табл. 3).

Таблиця 2

## Характеристики моделей звичайних поїздів

№ моделі	Тип рухомого складу	Кількість осей	Навантаження на вісь, кН	Швидкість руху, км/год	Кількість одиниць
1	Електровоз ЧС2	6	205,8	10...144	1
2	Електровоз ЧС7	8	210,7	10...144	1
3	Електровоз ВЛ8	8	225,4	10...144	1
4	Тепловоз ТЭП60	6	209,0	10...144	1
6	Цистерна 15-011	4	204,2	10...144	50
7	Цистерна 15-871	8	206,9	10...144	50
8	Вагон УКВ 11-066	4	217,2	10...144	50
9	Платформа 13-401	4	222,9	10...144	50
10	Платформа 13-435	6	199,4	10...144	50
11	Вагон-самоскид 31-638	4	213,3	10...144	50
12	Вагон-самоскид 31-634	6	250,9	10...144	50
13	Піввагон 12-508	8	208,6	10...144	50
14	Піввагон 12-127	4	230,2	10...144	50
15	Транспортер 3902	4	245,2	10...144	50
16	Транспортер 3911	8	219,5	10...144	50

Таблиця 3

## Змінні параметри розрахункової моделі

№ п/п	Параметр, що змінюється	Умовне позначення	Одиниці виміру	Досліджуваний діапазон значень	Значення за замовченням
1	Довжина понтону (розмір поперек мосту)	$l_{py}$	м	10,5... 11,5	11,0
2	Ширина понтону (розмір вздовж мосту)	$b_{px}$	м	2,2...2,8	2,60
3	Висота понтону	$h_{pz}$	м	0,9...1,5	1,20
4	Швидкість течії водотоку	$v_{wat}$	м/с	0...2	1
5	Коефіцієнт	$C_1$	–	0,2...0,25	0,23
6	Коефіцієнт лобового опору	$C_2$	–	0,1...1,5	1,11
7	Початкова осадка понтону	$h_{w0}$	м	0,1...1,2	0,30
8	Температура води (для визначення динамічної в'язкості)	$t_{wat}$	°С	0...5	20
9	Вітровий район	–	–	1...5	3
10	Швидкість вітру	$v_{wind}$	м/с	0...12	1
11	Швидкість руху поїзда	$v_{tr}$	км/ГОД	5...144	10

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Числові розрахунки проведено у два етапи. На першому етапі по чергово змінювали кожен з параметрів табл. 3 та визначались динамічна поведінка системи у часі (які параметри напружено-деформованого стану системи і як відхиляються від початкових значень). На другому етапі динамічна поведінка конструкції моделювалась у нових станах (комбінація окремих екстремальних станів першого етапу).

Крок зміни параметрів у табл. 3 приймаємо таким чином, щоб у результаті отримати достатньо достовірний ряд значень (у кожному випадку – не менше п'яти числових експериментів). Напружено-деформований стан прогонової будови однозначно характеризується переміщеннями окремих вузлів конструкції. Так, на

рис. 4 показано діаграми переміщень у 1/6, 1/3, 1/2 довжини наплавного моста (загальний час коливань – 10 с). На даному етапі загалом проаналізовано шість станів системи. Основні висновки є наступними.

1. Збільшення довжини понтону навіть на 1 м. (з 10,5 до 11,5 м) супроводжується зниженням переміщень (та інших похідних параметрів напружено-деформованого стану) прогонової будови у 4, 7, 9 разів, відповідно до місцеположення вузла (див. рис. 4). Це свідчить про суттєве збільшення реакції з боку водного середовища, яка протидіє силі тяжіння. Найбільший вертикальний прогин у середній частині моста в даній серії експериментів складає 9 см.

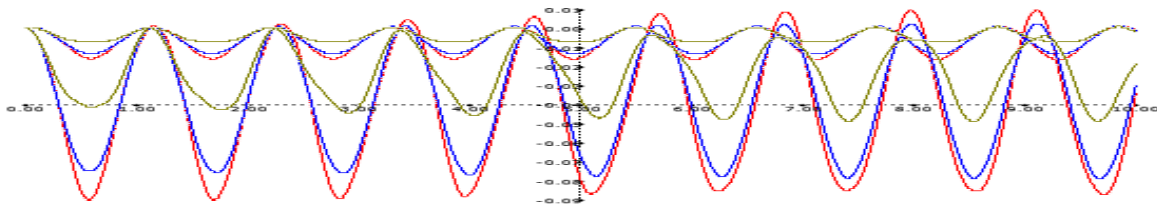


Рис. 4. Вертикальні переміщення прогонової будови у 1/6 (бежевий колір), 1/3 (синій колір), 1/2 (червоний колір) довжини моста у часі

На рис. 5 показано одне з положень, яке займає прогонова будова під час коливань у вод-

ному середовищі. Масштаб вертикальних прогинів збільшено у 5000 разів.

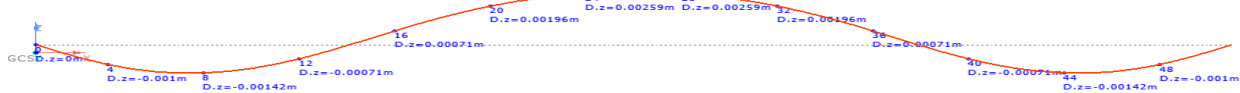


Рис. 5. «Миттєва» траєкторія переміщень наплавного моста

2. Напружено-деформований стан наплавного мосту з різною шириною понтонних елементів (від 2,2 до 2,8 м) відображають діаграми рис. 6. Ширині понтону  $b_{px} = 2,8$  м відповідає

прогин прогонової будови  $\Delta_z = 3$  см, а ширині  $b_{px} = 2,2$  м – прогин  $\Delta_z = 5$  см.

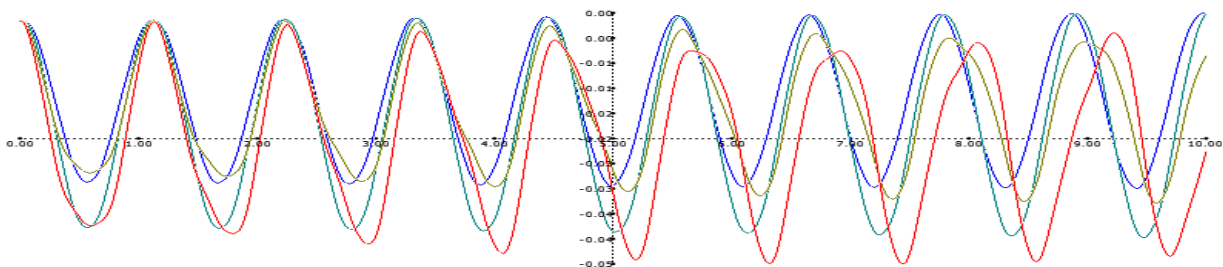


Рис. 6. Вертикальні переміщення конструкції у часі за умови змінної ширини понтона

3. За певних розмірів понтонів ( $l_{py} \leq 10,5$  м;  $b_{px} \leq 2,3$  м) система значно втрачає стабіль-

ність у водному середовищі. Ця особливість характеризується зростанням амплітуд переміщень, швидкостей та прискорень у вузлах про-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

гонової будови наплавного моста під час його вимушених коливань, а також незначною зміною траєкторії переміщень у часі (див. рис. 5 і 6). На рис. 7 наведено діаграми переміщень вузлів прогонової будови у часі. Кожна крива характеризує окремий вузол системи: криві з ма-

лими амплітудами переміщень відповідають вузлам, наближеним до опорних перерізів конструкції (див. рис. 1), криві з максимальними амплітудами переміщень – вузлам в середині прогонової будови.

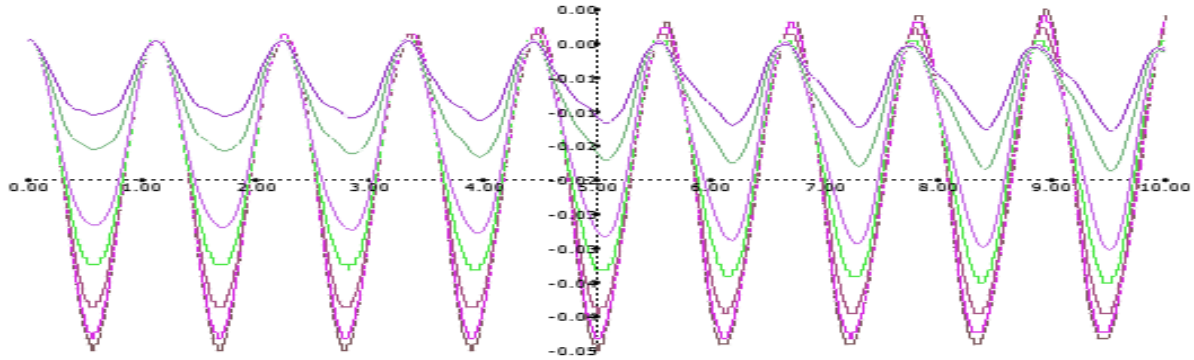


Рис. 7. Вертикальні переміщення конструкції у часі за умови змінної висоти перерізу понтона

4. В цілому, висота перерізу понтону не суттєво впливає на стан прогонової будови плавучої системи: у діапазоні досліджуваних значень  $h_{pz} = 0,9 \dots 1,5$  м вузлові переміщення і взаємо-

пов'язані параметри напружено-деформованого стану (внутрішні зусилля, напруження) практично співпадають.

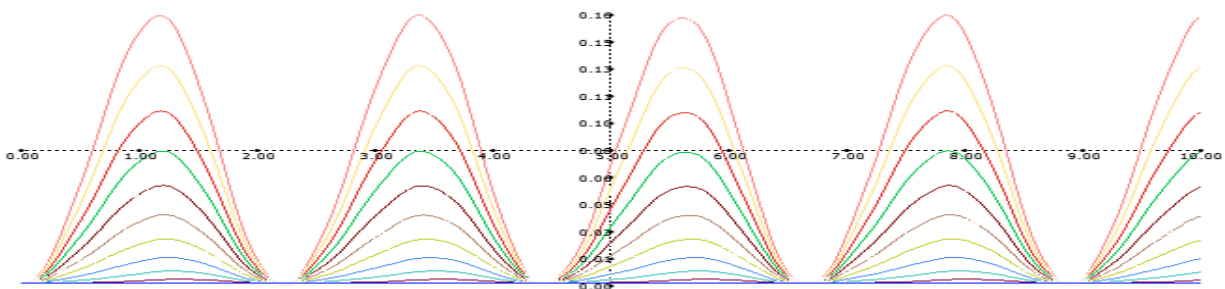


Рис. 8. Горизонтальні (поперечні) переміщення конструкції у часі за умови змінної швидкості течії водотоку

5. У результаті моделювання виявлено, що швидкість течії водотоку суттєво впливає на напружено-деформований стан наплавного моста. На рисунку 8 показано максимальні амплітуди горизонтальних коливань прогонової будови, які тривали на протязі 10 с. Швидкість

течії  $v_{wat}$  змінювали від 0 м/с (повний штиль) до 2 м/с з кроком 0,2 м/с, при цьому опір системи у горизонтальному поперечному напрямку зменшується за нелінійним законом (рис. 9).

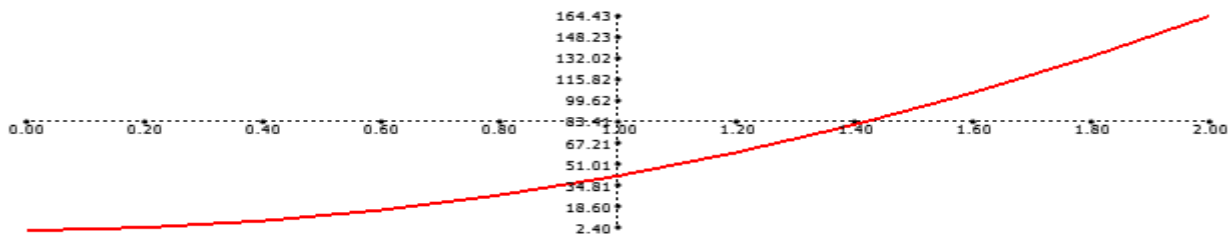


Рис. 9. Абсолютні максимальні переміщення конструкції (вісь Y, мм) в залежності від швидкості течії водотоку (вісь X, м/с)



## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

6. Аналіз фазових траєкторій свідчить, що коливання наплавного моста у водному середовищі мають періодичний, але не зовсім стабі-

льний характер. Максимальна швидкість коливань, за якою переміщення сягають 16 см, складає 0,23 м/с (рис. 10).

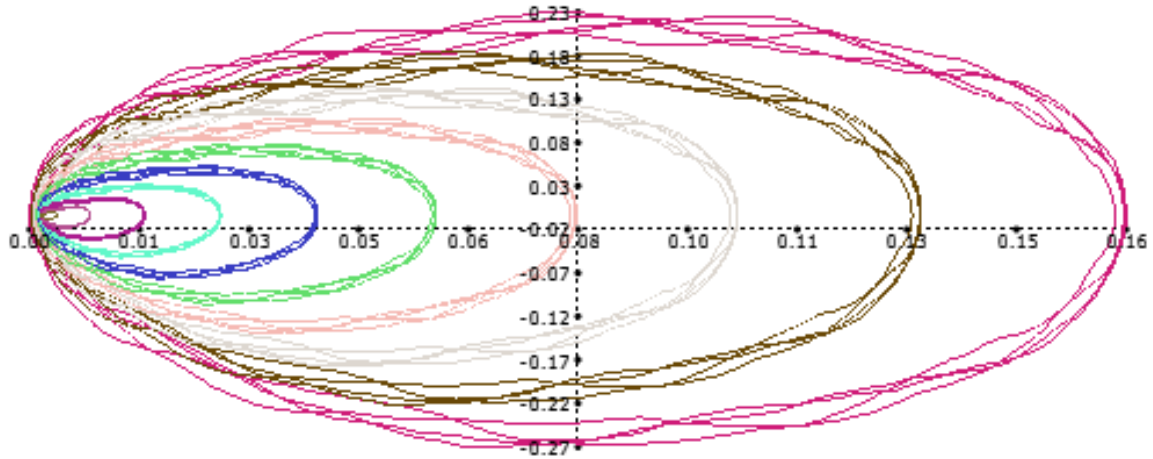


Рис. 10. Фазові траєкторії (вісь X – горизонтальне поперечне переміщення, м; вісь Y – швидкість горизонтального поперечного переміщення, м/с)

7. Суттєвого впливу коефіцієнта  $C_1$  на напружено-деформований стан прогонової будови моста не виявлено. У всій серії числових експериментів з практично рекомендованими значеннями коефіцієнта 0,23...0,25 спостерігались однакові співвідношення точок на фазовій площині «переміщення-швидкість» (рис. 11).

8. Судячи з отриманих результатів, геометрична форма понтону суттєво впливає на напружено-деформований стан прогонової будови під час її коливань у горизонтальному напрямку поперек осі моста (рис. 12). Так, фазові траєкторії демонструють майже однакове співвідношення між горизонтальними переміщеннями і відповідними швидкостями вузлів про-

гонової будови. Формі понтону, максимально видовженій вздовж напрямку течії (рис. 3.3, коефіцієнт лобового опору  $C_2 = 0,1$ ), відповідають амплітуди переміщень  $y_{\max} = 1$  см та амплітуди швидкостей  $v_{y,\max} = 1,8$  см/с. Геометричній формі у вигляді півкола з коефіцієнтом лобового опору  $C_2 = 1,4$  відповідають амплітуди переміщень  $y_{\max} = 5,4$  см та амплітуди швидкостей  $v_{y,\max} = 9,4$  см/с. Отримані результати доцільно урахувати під час проектування усіх основних елементів конструкції наплавного моста, включаючи понтони, прогонову будову, якірні закріплення.

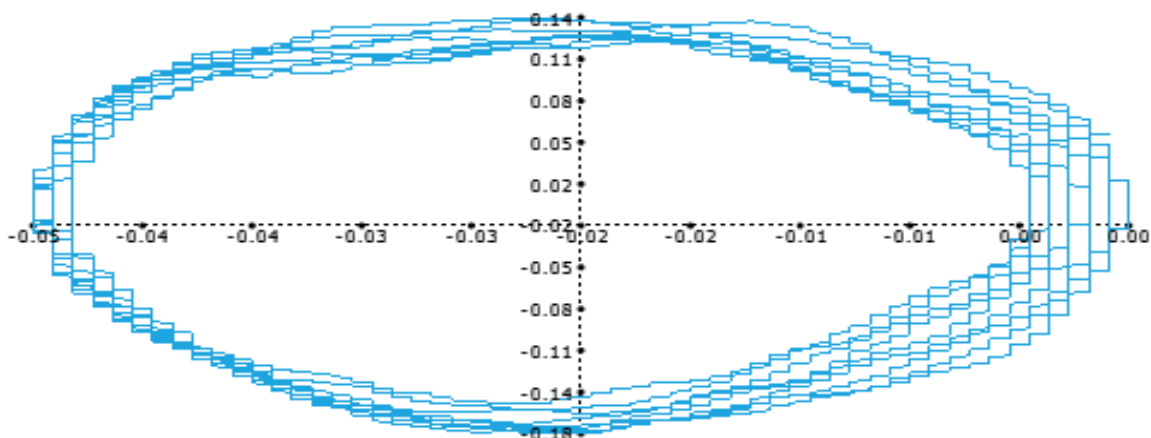


Рис. 11. Фазові траєкторії (вісь X – вертикальне переміщення, м; вісь Y – швидкість вертикального переміщення, м/с)

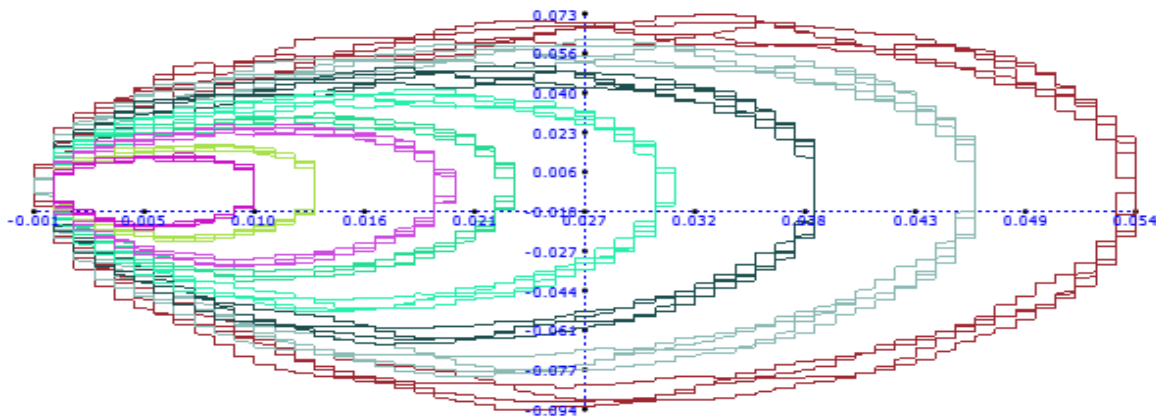


Рис. 12. Фазові траєкторії (вісь X – горизонтальне поперечне переміщення, м; вісь Y – швидкість горизонтального поперечного переміщення, м/с)

### Наукова новизна та практична значимість

Дослідження дозволяє зробити новий крок в детальному моделюванні роботи наплавного мосту з урахуванням швидкості руху тимчасового навантаження.

### Висновки

Враховуючи те, що єдиного нормативного документу, який регламентував би порядок визначення швидкісних режимів руху залізничного і автомобільного транспорту по наплавних мостах в Україні, наразі не існує, публікація дає змогу зробити ряд висновків, що є універсальними для розрахунку допустимої швидкості руху по наплавних мостах.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Инструкция по ремонту, содержанию и эксплуатации паромных переправ и наплавных мостов. ВСН 50-87 Мин. автомоб. дор. РСФСР [Текст]. – Москва : Транспорт, 1988. – 133 с.
2. Наплавной железнодорожный мост НЖМ-56 [Текст] / Военное изд-во. – Москва, 1977. – 343 с.
3. Бахвалов, Н. С. Численные методы [Текст] / Н. С. Бахвалов. – Москва : Бином, 2004. – 636 с.
4. Справочник по гидравлическим расчетам [Текст] / Под ред. П. Г. Киселева. – Москва : Энергия, 1972. – 312 с.
5. Гурвич, Я. А. Справочник молодого аппаратчика-химика [Текст] / Я. А. Гурвич. – Москва : Химия, 1991. – 256 с.
6. ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи [Текст]. – Чинні від 2010-03-01. – Київ : Мін регіон буд. України, 2009. – 66 с.
7. Інструкція з визначення умов пропуску рухомого складу по металевих та залізобетонних залізничних мостах: ЦП-0093 [Текст] / Гол. упр. кол. госп-ва Укрзалізниці. – Київ, 2002. – 301 с.
8. Національний стандарт України ДСТУ-НБ EN 1991-2:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 2. Рухомі навантаження на мости (EN 1991-2:2003) [Текст]. – Надано чинності 2013-07-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2003. – 217 с.

Ю. М. ГОРБАТЮК<sup>1\*</sup>, К. І. СОЛДАТОВ<sup>2\*</sup>, В. Е. АРТЕМОВ<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. Военной подготовки специалистов Госспецтрансслужбы, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (093) 339 41 28, эл. почта Yuri.Gorbatyuk@gmail.com

<sup>2\*</sup> Каф. «Мосты», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (096) 527 26 01, эл. почта kim-kim@ua

<sup>3\*</sup> Исследовательская лаборатория «Dynamics & Structures, Lab.», Днепропетровск, Украина, тел. +38 (050) 457 68 19, ел. почта v.artemov@gmail.com

## К ВОПРОСУ ДОПУСТИМОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ ПО НАПЛАВНЫМ МОСТАМ

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

**Цель.** В публикации приведены результаты расчетов пролетных строений для наплавных мостов. Целью данного исследования является определение: максимально допустимой скорости движения транспорта, которая не приводила бы к появлению сверхнормативных напряжений и деформаций в конструкциях моста. **Методика.** В работе используется сравнительный метод, аналитические методы расчета мостов, расчеты на прочность, выносливость, максимальные касательные напряжения. **Результаты.** Увеличение длины понтона даже на 1 м (с 10,5 до 11,5 м) сопровождается снижением перемещений (и других производных параметров напряженно-деформированного состояния) пролетного строения в 4, 7, 9 раз; при определенных размерах понтонов система значительно теряет стабильность в водной среде; высота сечения понтона не существенно влияет на состояние пролетного строения плавучей системы; скорость течения водотока существенно влияет на напряженно-деформированное состояние наплавного моста; анализ фазовых траекторий свидетельствует, что колебания наплавного моста в водной среде имеют периодический, но не совсем стабильный характер. **Научная новизна.** Исследование позволяет сделать новый шаг в детальном моделировании работы наплавного моста с учетом скорости движения временной нагрузки. **Практическая значимость.** Учитывая то, что единого нормативного документа, регламентирующего порядок определения скоростных режимов движения железнодорожного и автомобильного транспорта по наплавным мостам в Украине, пока не существует, публикация позволяет сделать ряд выводов, которые являются универсальными для расчета допустимой скорости движения по наплавным мостам.

*Ключевые слова:* железнодорожные мосты; наплавные мосты; движение поездов; пролетные строения; допустимая скорость; прогресс мостостроения

Y. M. GORBATYK<sup>1\*</sup>, K. I. SOLDATOV<sup>2\*</sup>, V. E. ARTYOMOV<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup> Department of Military Training of specialists of State Special of Transport Service, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (093) 339 41 28, e-mail Yuri Gorbatyk@gmail.com

<sup>2\*</sup> Dep. «Bridges», Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 527 26 01, e-mail kim-kim@ua

<sup>3\*</sup> Virtual research laboratory «Dynamics & Structures, Lab.», Dnepropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (050) 457 68 19, e-mail v.artomov@gmail.com

## TO SUPPLY OF ALLOWABLE TRAINS MOVEMENT SPEED ON A FLOATING BRIDGE

**Purpose.** This publication presents the results of calculations spans for floating bridges. Aim of this study is to determine the maximum speed of the vehicle, which did not lead to abnormal appearance to stresses and strains in the construction of the bridge. **Methodology.** This paper uses the comparative method, analytical methods for calculating bridges calculations of strength, endurance, maximum shear stress. **Findings.** Increasing the length of pontoon even at 1m. (from 10,5 to 11,5 m) is accompanied by a decrease in displacement (and other derived parameters of the stress-strain state) span 4, 7, 9 times; for a certain size pontoons system loses much stability in the aquatic environment; section height pontoon not significantly affect the state span floating system; watercourse flow velocity significantly affects the stress-strain state of the floating bridge; The analysis of phase trajectories shows that fluctuations floating bridge in the aquatic environment are periodic, but not quite stable nature. **Originality.** Research allows you to make a new step in the detailed modeling of the floating bridge considering the velocity of temporary load. **Practical value.** Given that a single regulatory document that would regulate the procedure for determining Movement speed rail and road transport on floating bridges in Ukraine does not exist, the publication allows you to draw some conclusions that are universal to calculate allowable speed on floating bridges.

*Keywords:* railway bridges; floating bridges; movement of trains; the beam structure; permissible speed; progress of bridge building

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А. В. Радкевичем (Україна), д.т.н., проф. Й. Й. Лучко (Україна).*

Надійшла до редколегії 25.08.2014.

Прийнята до друку 20.09.2014.