

4. Балака М. М., Пелевін Л. Є., Аржаєв Г. О. Застосування принципів мехатроніки при тягових випробуваннях позашляхових технологічних засобів. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Харків, 2012. Вип. 57. С. 55–58.

5. Пелевін Л. Є., Балака М. М., Аржаєв Г. О. Мехатронні системи гідропневмоавтоматики. К.: Аграр Медіа Груп, 2014. 192 с.

6. Lopes J. M., Trabanco Jorge. (2022). Automated control systems for civil construction machinery using RTK-GNSS: an implementation review. Engenharia Civil UM. 28–33.

7. Балака М. М., Кім А. О., Міщук Д. О., Ходневич М. М. Особливості робочого циклу і організації скреперних робіт. Сучасні проблеми та перспективи розвитку машинобудування України: тези доповідей Міжнар. наук.-практ. онлайн конф. (23–24 верес. 2021 р.). К.: НУБіП України, 2021. С. 16–18.

8. Balaka M., Gorbatyuk Ie., Mishchuk D., Prystailo M. (2021). Characteristic properties of support surfaces for self-propelled scrapers motion. Fundamental and applied research in the modern world: Abstracts of the 6th International scientific and practical conference (January 20–22, 2021). Boston, USA. P. 53–58.

9. Балака М., Тетерятник О., Санкін І. Комплексна оцінка застосування моторних палив. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування: матеріали 14-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (16–18 берез. 2023 р.). Херсон: ХДМА, 2023. С. 194–196.

УДК 624.21.033

АНАЛІЗ ВАНТАЖОПІДЙОМНОСТІ ТА НЕСНОЇ ЗДАТНОСТІ ТИМЧАСОВОГО МОСТУ ДЛЯ ПРОПУСКУ ВАЖКОВАГОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Бугаєвський Сергій Олександрович, докт. техн. наук,
професор кафедри МКіБМ,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: bugaevskiysa@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2861-0268

Смагло Ярослав Дмитрович, аспірант, кафедри МКіБМ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: smahlo91yaruslav@gmail.com, ORCID: 0009-0004-8806-7812

Тарасенко Тетяна Миколаївна, асистент кафедри МКіБМ
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: tanya_tarasenko_dm@ukr.net ORCID: 0009-0009-2996-4923

Корнілова Зінаїда Володимирівна, магістр кафедри МКіБМ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: zinaida.pro1999@gmail.com ORCID: 0009-0006-3061-0151

Актуальність теми роботи. Військова агресія Російської Федерації проти України привела до значної руйнації транспортної інфраструктури України. З'явилися необхідність відбудови в короткі терміни великої кількості

мостів. Технічно та організаційно виконати в сучасних умовах це завдання неможливо. Виникає необхідність більш широкого застосування тимчасових мостів різної конструкції та побудованих з різних матеріалів для забезпечення пропуску важковагового навантаження на автомобільних дорогах України, який здійснює перевезення цивільних та військових вантажів. Найбільш технічне та організаційно-технологічне рішення - це удосконалення тимчасових збірно-розбірних мостів для цих завдань.

Мета роботи полягає у аналізі вантажопідйомності та несної здатності тимчасових мостів з металевими головними балки та дерев'яною проїзною частиною для довжини прогонів від 9 м до 44 м. В задачі роботи входить:

- визначення еквівалентного навантаження на металеву балку від різних видів автомобільного та позанормативного навантаження;
- визначення значень згинальних моментів та поперечної сили для металеві балки від різних видів автомобільного та позанормативного навантаження;
- надати рекомендації по удосконаленню конструкції тимчасових мостів для умов України.

Об'єктом дослідження є металеві прогонові будови тимчасових мостів із дощатим настилом на дерев'яних поперечинах та конструкції мостів з використанням полімерних композиційних матеріалів (ПКМ).

Предмет дослідження. Вантажопідйомність та несна здатність металеві балки прогонової будови мосту з дощатим настилом на дерев'яних поперечинах, можливість переходу до застосування плити проїзної частини з полімерних композитних матеріалів (ПКМ).

Для основних несних конструкцій, допоміжних елементів, монтажних з'єднань та опорних частин тимчасових мостів найбільш частіше використовують сталь та частково залізобетон [1-5].

Проекти сталевих та залізобетонних конструкцій для тимчасових збірно-розбірних мостів розроблялися в часи Радянського Союзу [1-5] інвентарними та уніфікованими (табл. 1).

Таблиця 1 - Характеристики тимчасових збірно-розбірних мостів

Розробник проєкту, рік розробки	Тип головних балок / довжина основних монтажних марок	Конструкція проїзної частини
1. Спеціальні мостові металоконструкції багатоцільового призначення		
Проект 6-Ф7310 ЦНДІПБК, 1982 р.	- прокатні двотаври №100Б1 / 6, 9 та 12 м; - зварні двотаврові балки висотою 1,8 м / 9 і 12 м	1) дерев'яна; 2) збірні з/б плити; 3) інвентарні ортотропні сталеві плити
2. Конструкції інвентарні балкові (КІБ-82) з прокатних двотаврових балок		
ТУ 14-2-24-72 проект 5856 СКБ Головмостобуду, 1982 р.	прокатні двотаври №100Б1 / 6, 9 та 12 м	1) дерев'яна; 2) збірні з/б плити; 3) інвентарні ортотропні сталеві плити
3. Сталеві прогонові будови з ортотропною плитою ПЧ для а/д мостів Західного Сибіру		
Проект 378 КМ інституту Ленгіпро- трансімст, 1981 р.	зварні двотаврові балки висотою 2,48, 3,16 та 3,6 м / кінцеві – 5,55 м, основні – 10,5 м, збільшені – 21 м	1) а/б покриття; 2) збірні з/б плити, укладені на розчин.

Одними із сучасних прикладів збірно-розбірних мостів є системи Unibridge компанії Matiere (Франція) [6]. Ця інноваційна концепція промислового сталевих мосту, що масштабується та швидко монтується, спроектована, розроблена та запатентована для будівництва естакад, військових, автомобільних, залізничних або тимчасових мостів. Конструкція прогонової будови складається із сталевих коробчастих балок, з'єднаних сталевими штифтами. Для проїзду по мосту застосовують 3 типи настилу: металевий, збірний чи монолітний залізобетонний та дерев'яний. Елементи мосту легко транспортуються, швидко збираються та мають велику вантажопідйомність, здатні витримувати навантаження до 300 т. Міст захищений від корозії фарбуванням і гальванізацією. Пішохідні тротуари можна додати до одного або обох боків мосту, не впливаючи на несну здатність. Компанія Matiere передасть Україні 36 мостів довжиною від 23 до 46 м для відновлення зруйнованої транспортної інфраструктури України від війни з Російською Федерацією [2].

Все більшого розповсюдження у світі знаходять тимчасові мости із застосуванням композиційних матеріалів. На 2011 р. у світі експлуатувалося понад 360 мостів з основними несними елементами з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) [7]. Серед них близько 53 мостів з цільними композитними прогоновими будовами, решта гібридних за матеріалом конструкції.

Особливістю гібридних конструкцій є те, що для несних елементів застосовуються різні матеріали. У гібридних конструкціях полімерні композиційні матеріали застосовуються в основному при виготовленні головних балок прогонових будов, плит проїзної частини або арматурних стержнів [7-12].

Побудовані мости із застосуванням ПКМ експлуатуються в найрізноманітніших умовах та витримують перепади температур, ураганні вітри, інтенсивне ультрафіолетове випромінювання без додаткового захисту елементів та успішно експлуатуються в даний час [14-16].

Накопичений світовий досвід будівництва та експлуатації мостів із застосуванням ПКМ дає можливість закордонним мостобудівельним компаніям пропонувати їх застосування в Україні в якості постійних та тимчасових мостів. Виділяють два основні напрямки (методи) проектування мостових конструкцій із застосуванням ПКМ – заміна та адаптація. Перший метод полягає в заміні традиційних будівельних матеріалів на композитні без модернізації конструкції. Другий метод застосовує модернізацією конструкції для врахування властивостей ПКМ.

Композитні матеріали мають тривалий термін служби, який значно довший, ніж у залізобетону, а оскільки плита проїзної частини стійка до води і солі, водонепроникна мембрана не потрібна. Періодичного обслуговування потребують поверхня полотна, що зношується та стики конструкції [13, 17].

Аналіз конструкцій тимчасових мостів із застосуванням різних матеріалів показує, що всі вони поряд з перевагами не позбавлені недоліків. Пошук конструктивних рішень ведеться завжди з урахуванням особливостей

конкретних матеріалів. За кордоном цей пошук все більше спрямований на перспективні гібридні конструкції, запроєктовані методом адаптації. Ці конструкції мають великий потенціал і можуть знаходити застосування для тимчасових пішохідних та автодорожніх мостів у нашій країні. Ефективна реалізація даного потенціалу можлива тільки при створенні адаптованих до властивостей матеріалу конструкцій. Для забезпечення достатньої вантажопідйомності тимчасових мостів та пропуску важковагового навантаження в умовах військової агресії Російської Федерації проти України найбільш раціонально застосувати металеві головні балки та дерев'яну проїзну частину, що полегшить власну вагу прогонової будови тимчасового мосту.

Результати дослідження

1. *Конструкція прогонової будови тимчасового мосту.* Настил на поперечинах із дошок товщиною від 40 до 100 мм. На тимчасових мостах він може бути одношаровим. У цьому випадку поперечини із бруса прямокутного перерізу розміщують на відстані 0,5 м одна від одної із забезпеченням просвіту між ними 30-50 мм для провітрювання (рис. 1).

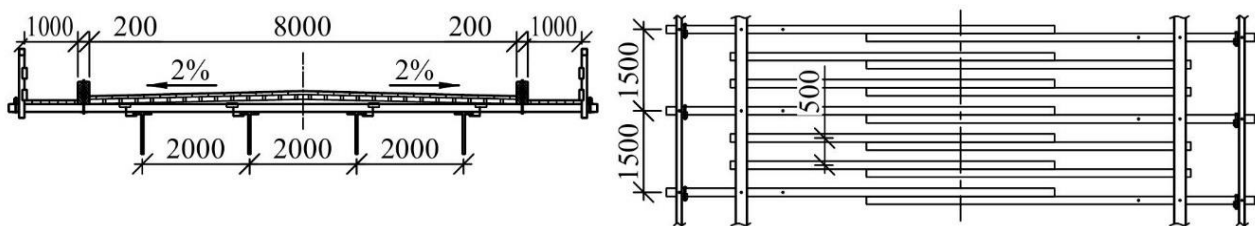


Рисунок 1 – Конструкція дерев'яної проїзної частини на поперечинах

2. *Визначення вантажопідйомності тимчасового мосту.* Визначення вантажопідйомності та несної здатності металеві балки прогонової будови мосту виконують з метою встановлення фактичних значень згинального моменту та поперечної сили від різних автомобільних навантажень та порівняння зі значеннями отриманими для автомобільного навантаження А15 та НК-100.

Для зручності розрахунку головних балок прогонової будови часто користуються еквівалентними навантаженнями ($q_{екв}$). Еквівалентним навантаженням називається рівномірно розподілене навантаження, зусилля від якого рівне зусиллю від зосереджених вантажів.

Перевірка міцності головної балки виконувалася за нормальними, дотичними і наведеними напруженнями від дії найбільших зусиль навантаження А15 та НК-100 для прогону 15 м. Для розрахунку приймалася металева балка двотаврового перерізу висотою 100 см виготовлена зі сталі марки 15ХСНД. Пояси балки мали переріз 21×320 мм та послаблення двома рядами отворів діаметром 25 мм. Вертикальна стінка балки товщиною 15,5 мм у перерізі по стику має 6 отворів діаметром 25 мм.

Визначення значень згинального моменту та поперечної сили від різних

автомобільних навантажень виконувалися за чинними нормами на проєктування мостів із застосуванням коефіцієнтів надійності, умов роботи та динамічного [18].

Визначення коефіцієнта поперечного розподілу виконувалось за методом важеля для головної балки №2, як найбільш завантаженої. Були розглянуті сучасні та старі [19] тимчасові навантаження Н-30, НГ-30, НГ-60, НК-80, НК-100, А15 (тандем + розподілене навантаження), а також позанормативні навантаження [18] ЧМЗАП-5523, ЧМЗАП-5208, ЧМЗАП-5212, ЧМЗАП-5530, ЧМЗАП-5247Г та візок Мінмонтажспецбуд (рис. 2).

Визначення значень згинального моменту (M) та поперечної сили (Q) виконано для всіх перерахованих тимчасових навантажень для балок довжиною 15, 18, 24, 32, та 44 м (табл. 2, 3).

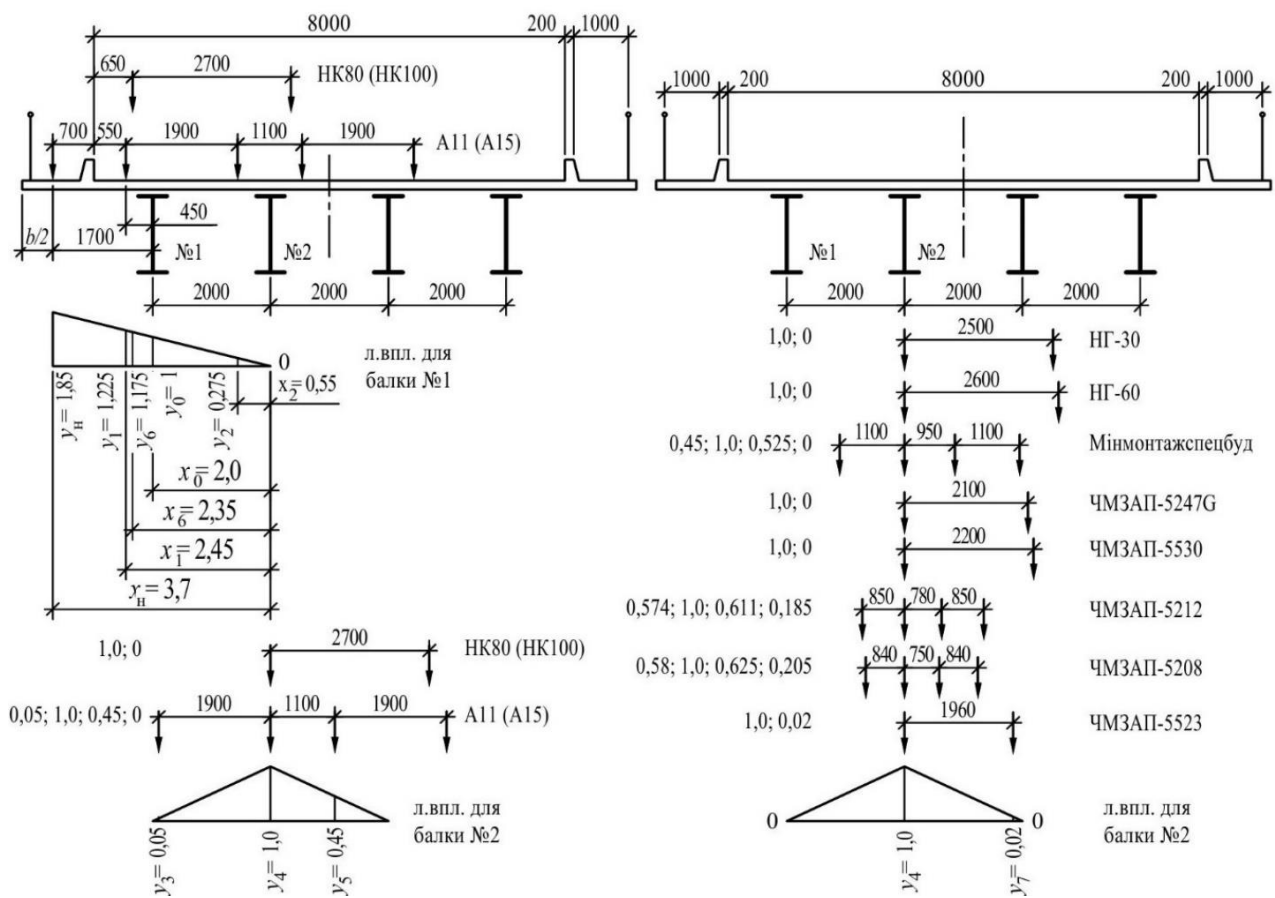


Рисунок 2 – Схеми та лінії впливу для визначення коефіцієнта поперечного розподілу (КПР) для різних навантажень

Таблиця 2 - Результати визначення M від тимчасових навантажень для прогону 15, 18, 24, 32 та 44 м

Навантаження*	15 м			18 м			24 м			32 м			44 м		
	$\omega, \text{м}^2$	$q, \text{кН/м}$	$M, \text{кНм}$	$\omega, \text{м}^2$	$q, \text{кН/м}$	$M, \text{кНм}$	$\omega, \text{м}^2$	$q, \text{кН/м}$	$M, \text{кНм}$	$\omega, \text{м}^2$	$q, \text{кН/м}$	$M, \text{кНм}$	$\omega, \text{м}^2$	$q, \text{кН/м}$	$M, \text{кНм}$
1	26,65	30,2	1020	38,72	26,6	1305	69,62	21,3	1880	123,25	17,6	2749	235,45	17,6	5252
2	26,65	34,7	462	38,72	29,6	573	69,62	22,9	797	123,25	17,6	1085	235,45	13,7	1613
3	26,65	66,7	888	38,72	57,4	1111	69,62	44,8	1559	123,25	34,6	2132	235,45	26,1	3073
4	26,65	89,6	1194	38,72	77,0	1491	69,62	60,0	2089	123,25	46,2	2847	235,45	34,8	4097
5	26,65	112,0	1492	38,72	96,3	1864	69,62	75,0	2611	123,25	57,8	3562	235,45	43,5	5121
6	26,65	36,4	1807	38,72	31,4	2341	69,62	23,9	3446	123,25	18,1	5056	235,45	13,2	7972
		14,7		38,72	14,7		69,62	14,7		123,25	14,7		235,45	14,7	
7	26,65	24,2	329	38,72	22,3	432	69,62	18,8	654	123,25	16,8	1035	235,45	14,8	1742
8	26,65	49,0	588	38,72	43,8	848	69,62	38,9	1354	123,25	34,5	2126	235,45	29,2	3438
9	26,65	69,1	810	38,72	66,2	1282	69,62	59,1	2057	123,25	50,9	3137	235,45	40,7	4791
10	26,65	97,9	1305	38,72	87,1	1686	69,62	71,5	2489	123,25	64,3	3962	235,45	59,5	7005
11	26,65	48,4	645	38,72	41,2	798	69,62	35,4	1232	123,25	32,1	1978	235,45	28,2	3320
12	26,65	75,9	991	38,72	70,4	1363	69,62	62,3	2169	123,25	54,2	3340	235,45	46,5	5474

Примітки: * 1. Н-30; 2. НГ-30; 3. НГ-60; 4. НК-80; 5. НК-100;
6. А 15; 7. ЧМЗ АП-5523; 8. ЧМЗ АП-5208; 9. ЧМЗ АП-5212;
10. ЧМЗ АП-5530; 11. ЧМЗ АП-5247Г; 12. Візок Мінмонтажспецбуд

Таблиця 3 - Результати визначення Q від тимчасових навантажень для прогону 15, 18, 24, 32 та 44 м

Навантаження*	15 м			18 м			24 м			32 м			44 м		
	$\omega, \text{ м}^2$	$q, \text{ кН/м}$	ΣQ	$\omega, \text{ м}^2$	$q, \text{ кН/м}$	ΣQ	$\omega, \text{ м}^2$	$q, \text{ кН/м}$	ΣQ	$\omega, \text{ м}^2$	$q, \text{ кН/м}$	ΣQ	$\omega, \text{ м}^2$	$q, \text{ кН/м}$	ΣQ
1	7,3	34,2	187	8,8	29,6	330	11,8	27,5	411	15,7	24,6	490	21,7	22,4	616
2	7,3	34,7	127	8,8	29,6	130	11,8	22,9	135	15,7	17,6	138	21,7	13,1	142
3	7,3	66,7	243	8,8	57,4	253	11,8	44,8	264	15,7	34,6	272	21,7	25,8	280
4	7,3	93,8	342	8,8	80,0	352	11,8	61,7	364	15,7	47,1	370	21,7	35,2	382
5	7,3	117,3	428	8,8	100,0	440	11,8	77,1	455	15,7	58,9	462	21,7	44,0	477
6	7,3	37,9	279	8,8	31,9	577	11,8	24,3	642	15,7	18,3	717	21,7	13,4	836
		14,7		8,8	14,7		11,8	14,7		15,7	14,7		21,7	14,7	
7	7,3	31,5	117	8,8	29,9	132	11,8	26,9	159	15,7	22,9	180	21,7	18,3	199
8	7,3	65,5	215	8,8	61,5	271	11,8	53,0	313	15,7	43,6	342	21,7	34,1	370
9	7,3	84,6	272	8,8	78,8	347	11,8	67,6	399	15,7	55,5	436	21,7	43,3	470
10	7,3	98,9	360	8,8	92,2	406	11,8	87,5	516	15,7	79,3	623	21,7	66,3	719
11	7,3	60,1	219	8,8	57,1	251	11,8	50,9	300	15,7	42,7	335	21,7	33,7	366
12	7,3	101,7	363	8,8	93,7	412	11,8	78,6	463	15,7	63,7	500	21,7	49,1	533

Примітки: * 1. Н-30; 2. НГ-30; 3. НГ-60; 4. НК-80; 5. НК-100;
6. А 15; 7. ЧМЗ А П -5523; 8. ЧМЗ А П -5208; 9. ЧМЗ А П -5212;
10. ЧМЗ А П -5530; 11. ЧМЗ А П -5247Г; 12. Візок
Мінмонтажспецбуд

Висновки

1. Аналіз табл. 2 і 3 показує, що при довжині прогону 15 м максимальне значення згинального моменту $M_{згин} = 1807 \text{ кНм}$ виникає у металевій балці №2 від тимчасового навантаження А15 (тандем + розподілене навантаження), наступні значення від навантаження НК-100 – $M_{згин} = 1492 \text{ кНм}$ та ЧМЗАП-5530 – $M_{згин} = 1305 \text{ кНм}$, а максимальна поперечна сила від навантаження НК-100 – $Q = 428 \text{ кН}$, наступні значення від навантаження візок Мінмонтажспецбуд – $Q = 363 \text{ кН}$ та ЧМЗАП-5530 – $Q = 360 \text{ кН}$.

2. Максимальне значення згинального моменту для довжин прогону 18, 24, 32 та 44 м виникає у металевій балці №2 від тимчасового навантаження А15 (тандем + розподілене навантаження). Значення згинального моменту від навантаження НК-100 для прогонів 18 та 24 м знаходиться на другому місці, а для прогону 32 м – на третьому місці та в подальшому при збільшенні величини прогону значення згинальних моментів від нормативних тимчасових навантажень менші ніж від позанормативних.

3. Максимальне значення поперечної сили для довжин прогону 18, 24, 32 та 44 м також виникає у металевій балці №2 від тимчасового навантаження А15

(тандем + розподілене навантаження). Значення поперечної сили від навантаження НК-100 для прогонів 18 м знаходиться на другому місці, а в подальшому при збільшені величини прогону максимальні значення згинальних моментів поступаються позанормативним навантаженням.

4. Аналіз конструкцій тимчасових мостів з використанням полімерних композитних матеріалів показав перспективу удосконалення їх за рахунок переходу для умов України з дерев'яної плити проїзної частини до полімерної. Розроблені полімерні плити проїзної частини мають високу несну здатність, надійне з'єднання зі сталевими балками та забезпечать підвищення довговічності мосту.

Література

1. Рекомендації щодо конструктивних рішень для відбудови пошкоджених мостів і труб. Київ : ДП ДерждорНДІ, 2022. 167 с.

2. Державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України. URL: <https://restoration.gov.ua> (дата звернення: 01.09.2025).

3. Авдокушин П. Проект "Павло Авдокушин. Інфраструктурний оглядач". URL: <https://avdokushyn.info/pro-proekt> (дата звернення: 01.09.2025).

4. Сайт *bridgeUkraine*. URL: <https://www.bridgeukraine.org> (дата звернення: 01.09.2025).

5. Бугаєвський С.О. Відновлення мостів і труб після пошкодження. Аварії мостів : навчальний посібник / С.О. Бугаєвський, Т.О. Ненастіна, К.В. Бережна, С.М. Краснов, В.О. Бугаєвський. Кременчук: NOVABOOK, 2024. 252 с.

6. Сайт компанії *Matiere* (Франція). URL: <https://www.matiere-tp.com/entreprise> (дата звернення: 01.09.2025).

7. Potyrała P. B. Use of Fibre-Reinforced Polymers in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures. Barcelona : Universitat Politècnica de Catalunya, 2011. 93 p. URL: <https://hdl.handle.net/2099.1/12353> (дата звернення: 01.09.2025).

8. O'Connor J.S., Hooks J.M. U.S.A.'s experience using fiber reinforced polymer (FRP) composite bridge decks to extend bridge service life. January 2005. 12 p. URL: <https://www.pwri.go.jp/eng/ujnr/tc/g/pdf/19/7-4oconnor.pdf>. (дата звернення: 01.09.2025).

9. Taylor B.J. Fiber-Reinforced Polymer Honeycomb Bridge Deck Heating Evaluation. Toledo, 2009. URL: http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=toledo1260205596 (дата звернення: 01.09.2025).

10. Keller T. Use of fibre reinforced polymers in bridge construction. Zurich, Switzerland : International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 2003. URL: <https://doi.org/10.2749/sed007> (дата звернення: 01.09.2025).

11. Wan B. Using fiber-reinforced polymer (FRP) composites in bridge construction and monitoring their performance: an overview. *Advanced Composites in Bridge Construction and Repair*. 2014. P. 3–29. URL: <https://doi.org/10.1533/9780857097019.1.3> (дата звернення: 01.09.2025).

12. Wei X., Russell J., Živanović S., and Mottram J.T. Measured dynamic properties for FRP footbridges and their critical comparison against structures made

of conventional construction materials. *Composite Structures*. 2019. Vol. 223. P. 110956. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110956> (дата звернення: 01.09.2025).

13. Shenoï R., Moy S., Holloway L. Advanced polymer composites for structural applications in construction. *Proceedings of the First International Conference*. Southampton University, 2002. P. 544. URL: <https://doi.org/10.1680/apcfsaic.31227> (дата звернення: 01.09.2025).

14. Siwowski T. W., Rajchel M., Kaleta D. Development, testing and construction of the hybrid FRP composite – concrete road bridge. *IABSE Symposium, Vancouver 2017: Engineering the Future*, Vancouver, Canada, 21–23 September 2017. Zurich, Switzerland, 2017. URL: <https://doi.org/10.2749/vancouver.2017.1824> (дата звернення: 01.09.2025).

15. Siwowski T. W., Rajchel M., Kaleta D., Własak L. The First Polish Road Bridge Made of FRP Composites. *Structural Engineering International*. 2017. Vol. 27, no. 2. P. 308. URL: <https://doi.org/10.2749/101686617x14881932436339> (дата звернення: 01.09.2025).

16. Rajchel M., Siwowski T.W., Hybrid Bridge Structures Made of FRP Composite and Concrete. *Civil and Environmental Engineering Reports*. 2017. Vol. 26, no. 3. P. 161–169. URL: <https://doi.org/10.1515/ceer-2017-0043> (дата звернення: 01.09.2025).

17. Knippers J., Gabler M. The FRP road bridge in Friedberg Germany – new approaches to a holistic and aesthetic design. *Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008)*, Zurich, 22–24 July 2008. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-FRP-road-bridge-in-Friedberg-Germany---new-to-a-Knippers/9a9611eb32d6d2808650584047d9855b4fa6dccb> (дата звернення: 01.09.2025).

18. Страхова Н.Є. та ін.; ред. А. Лантуха-Ляценка. Експлуатація і реконструкція мостів. Київ : Транспортна Акад. України, 2000. 408 с.

19. Єрмакова І., Нечипоренко М. Перспективні розрахункові навантаження для мостів на автомобільних дорогах. *Дороги і мости*. Київ, 2024, № 29. С. 251-272. URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.29.251> (дата звернення: 01.09.2025).