

УДК 624.21.014.2
UDC 624.21.014.2

DOI: 10.33744/0365-8171-2022-111-149-163

**МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ КОМПЛЕКСНОГО ПІДХОДУ ДО РОЗРАХУНКУ Й
АНАЛІЗУ РОБОТИ МОСТОВИХ ПРОГОНОВИХ БУДОВ ІЗ ОРТОТРОПНИМИ
ПЛИТАМИ ПРОЇЗНОЇ ЧАСТИНИ**

**METHODOLOGICAL ASPECTS OF THE COMPLEX APPROACH TO THE CALCULATION
AND ANALYSIS OF THE WORK OF BRIDGE GUARD STRUCTURES WITH ORTHOTROPIC
ROAD PLATES**



Ворошнов Сергій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, професор кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, e-mail: voroshnov52@ukr.net, тел. +38067709707

<https://orcid.org/0000-0003-0642-8289>



Онищенко Артур Миколайович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, тел. +380687771899

<https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>



Федоренко Олександр Володимирович, комунальна корпорація «Київавтодор», генеральний директор, e-mail: 50281@ukr.net, тел. +380672926788,

<https://orcid.org/0000-0002-3464-597X>



Чиженко Наталія Петрівна, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, e-mail: chyzenko_np@ukr.net, тел. +380507355080

<https://orcid.org/0000-0002-9152-2474>



Шалінський Валерій Володимирович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, ТОВ «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського», завідувач відділу мостів та спеціальних споруд, e-mail: shalinsky_v@ukr.net, тел. +380676824217

<https://orcid.org/0000-0001-9347-8342>

Анотація. В статті розглянуто особливості розрахунку та роботи мостових прогонових будов із ортотропними плитами проїзної частини. В якості прикладу розглянуто конструкцію прогонової будови існуючого автопроїзду по естакаді спряження греблі ДніпроГЕС із лівим берегом. Описані набуті за час експлуатації автопроїзду дефекти та пошкодження несних конструкцій. Досліджено нерівномірність розподілення нормальних напружень у листі настилу ортотропної плити. Знайдено коефіцієнти редукції, що характеризують нерівномірність розподілення нормальних напружень, шляхом розрахунку розрахункової моделі з використанням інженерно-аналітичного (нормативного) і

чисельного методів розрахунку. Наведено й проаналізовано результати чисельного методу у вигляді вертикальних переміщень і нормальних напружень у листі настилу ортотропної плити та дотичних напружень у стінках головних балок. Виконано порівняння отриманих результатів. Сформульовано висновки та рекомендації за результатами досліджень.

Ключові слова: мостова споруда, прогонова будова, ортотропна плита, розрахункова модель, коефіцієнт редукції, напруження.

Вступ. Естакада спряження греблі з лівим берегом введена в експлуатацію у 1977 році в результаті реалізації програми комплексної реконструкції автодорожнього переходу по спорудам ДніпроГЕС. Розроблення робочої документації конструкцій естакади було виконано інститутом ДПІ «Укрпроектстальконструкція» (нині ТОВ «Укрінсталькон імені В.М. Шимановського») у 1976 році у відповідності з чинними на той час вимогами та конструктивними вказівками технічних умов на проектування автодорожніх та міських мостів [3,4]. При цьому враховувались наступні тимчасові навантаження – автомобільне навантаження Н-30 та спеціальні навантаження НК-80 і НГ-60. Після введення в експлуатацію естакада увійшла до складу переходу через споруди Дніпровського гідровузла і, у такий спосіб, являється продовженням автопроїзду з земляної вставки на греблю. Габарит автопроїзду естакади спряження прийнято з умови пропуску чотирьох смуг автомобільного руху з швидкістю 60 км/год із урахуванням розширення на кривій, необхідного для пропуску автозцепів завдовжки до 11,0 м.

За результатами проведеного у червні 2020 р. обстеження споруди була виявлена низка дефектів її конструктивних елементів, проаналізувавши які стає цілком зрозумілим, що найбільш несприятливий вплив на загальну роботоспроможність естакади спряження спричиняють дефекти та пошкодження її прогонової будови. І в першу чергу це стосується конструктивних елементів ортотропної плити проїзної частини, зокрема, листа сталевго настилу, який має загальну нерівномірну корозію, подовжніх ребер і поперечних балок, на яких присутнє повсюдне руйнування антикорозійного захисту, а також нижніх поясів поперечних балок, на яких виявлена загальна нерівномірна корозія з втратою до 50% поперечного перерізу.

Мета і методи. Для об'єктивного оцінювання взаємовпливу напруженого стану конструктивних елементів при наявності дефектів елементів мостових споруд із застосуванням ортотропних плит проїзної частини застосовували дві методики проведення відповідних чисельних досліджень. Причому якщо за першою з них – прямою – задля отримання параметрів напружено-деформованого стану (НДС) прогонової будови застосовувався метод скінченних елементів, то друга методика полягає у використанні інженерно-аналітичного методу, який базується на оперуванні універсальним інтегральним показником – коефіцієнтом редукції ефективної ширини полиці ортотропної плити. У розвиток сказаного доцільно також привернути увагу до того, що загальна сутність цих двох методик висвітлена у нормах [2], а практичні приклади та прийоми їх використання викладені у [3,4, 5-8].

Мета публікації полягає у визначенні дослідженні й оцінюванні взаємовпливу напруженого стану конструктивних елементів при дійсній роботі ефективних мостових споруд із застосуванням ортотропних плит проїзної частини.

Об'єктом дослідження є прогонова будова естакади спряження греблі ДніпроГЕС із лівим берегом р. Дніпро, розрахункова модель якої створена з урахуванням дійсного технічного стану конструктивних елементів на основі результатів виконаних інженерних обстежень.

Приймаючи до уваги конфігурацію, структуру і топологію конструкції, в якості розрахункової прийнята скінченно-елементна модель, побудована шляхом моделювання дев'яти укрупнених блоків прогонових будов естакади спряження греблі ДніпроГЕС із лівим берегом р. Дніпро. В моделі всі складові частини ортотропної плити і головних балок апроксимовані набором тонких оболонкових трьох- і чотирикутних скінченних елементів. Матеріал конструктивних складових ортотропної плити і головних балок – сталь марки 09Г2С-12 із модулем пружності $E = 2,1 \cdot 10^6$ кгс /см², коефіцієнтом Пуассона $\nu = 0,3$ і розрахунковим опором $R = 3400 - 4000$ кгс /см² в залежності від товщини конструктивного елементу.

Побудована у такий спосіб скінченно-елементна модель укрупненого блоку (а саме крайнього опорного) прогонової будови естакади спряження наведена на рис. 1 і нараховує 11805 вузлів і 11736 скінченних елементів. А загальна скінченно-елементна модель естакади спряження греблі з лівим берегом представлена на рис. 2 і нараховує 98854 вузлів і 99008 скінченних елементів.

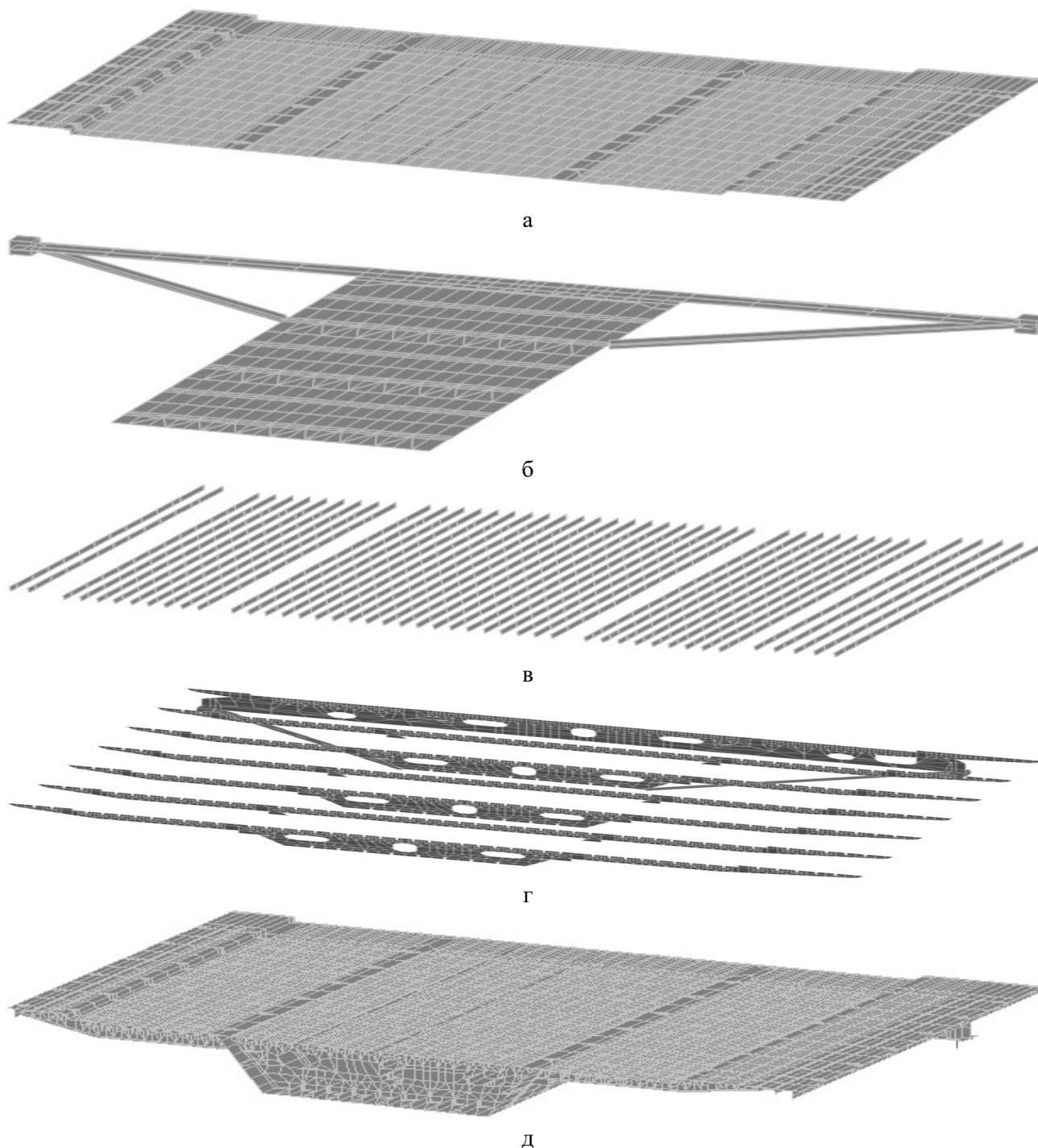


Рисунок 1 – Скінченно-елементна модель укрупненого блоку (крайнього опорного) прогонової будови естакади спряження греблі ДніпроГЕС із лівим берегом р. Дніпро:

а – верхній лист настилу; б – нижній лист настилу; в – подовжні ребра; г – поперечні балки; д – загальна модель укрупненого блоку

Figure 1 – Finite element model of the enlarged block (extreme support) span structure of the overpass conjugation of the Dnipro HPP dam with the left bank of the Dnipro River:

a – upper deck sheet; b – bottom sheet of flooring; в – longitudinal ribs; г – transverse beams; д – general model of the enlarged block

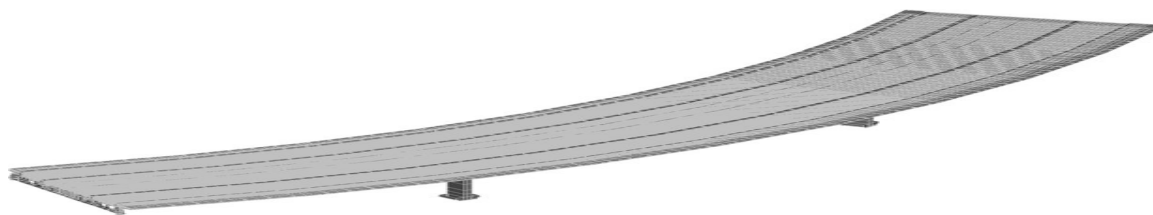


Рисунок 2 – Загальна скінченно-елементна модель прогонової будови естакади спряження греблі ДніпроГЕС із лівим берегом р. Дніпро

Figure 2 – The general finite element model of the span structure of the overpass of the Dnipro HPP dam coupling with the left bank of the Dnipro River

Зауважимо, що постійні та тимчасові навантаження на прогонову будову прийняті у повній відповідності з вимогами норм [1].

Постійне навантаження на прогонову будову естакади спряження являє собою власну вагу його конструктивних елементів і для чисельного розрахунку враховувалось приведенням навантаження до розподіленого за всією шириною конструкції. Загалом було прийнято шість складових постійного навантаження, значення яких наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Складові постійного навантаження від конструктивних елементів прогонової будови естакади спряження греблі ДніпроГЕС із лівим берегом р. Дніпро.

Table 1 – Components of constant load from the structural elements of the span structure flyovers connecting the Dnipro HPP dam with the left bank of the Dnipro River.

Ч/ч	Найменування конструктивного елементу	Характеристичне значення, тс/м.п.	Коефіцієнт надійності γ_f	Розрахункове значення, тс/м.п.
1.	Прогонова будова	6,25	1,25	7,81
2.	Опора освітлення	0,17	1,25	0,21
3.	Бар'єрне огороження	0,07	1,25	0,09
4.	Перила	0,05	1,25	0,06
5.	Комунікації	1,70	1,25	2,13
6.	Покриття проїзної частини	2,81	2,00	5,62
	Разом	11,05		15,92

Що ж стосується тимчасового навантаження на прогонову будову естакади спряження, то для чисельного розрахунку використовувалися дві його складові, а саме: автомобільне навантаження Н-30 від колони автомобілів вагою 30 тс кожен і розрахункове рівномірно розподілене навантаження від натовпу людей на тротуарі та на службовому проході ($q = 0,55$ і $0,44$ тс/м²). В частині ж колісного навантаження НК-80 від одного чотиривісного автомобіля вагою 80 тс вкажемо на добре відомий розрахунковий критерій, згідно якому при перевірці існуючої споруди з великими прогонами воно (навантаження НК-80) спричиняє виключно локальний вплив і саме через це вважається не розрахунковим. Схема прикладення складових тимчасового навантаження до поперечного перерізу прогонової будови наведена на рис. 3, де під R_{30} розуміється складова від автомобільного навантаження, яка задля більшої точності розрахунку задається між і вдовж двох коліс транспортного засобу.

Отже, з наведених вище даних випливає, що в розрахунку враховувались дві групи навантажень: постійні й тимчасові. При цьому загальна кількість сполучень розрахункових навантажень завдяки симетричності споруди естакади спряження склала чотири, а постійні навантаження та натовп були присутні у всіх сполученнях.

Для кожної характерної розрахункової точки перерізу прогонової будови естакади спряження (на опорах та посередині прогонів) були виконані перевірні розрахунки, результати яких, забігаючи трохи наперед, засвідчили, що всі розглянуті сполучення навантажень є найбільш несприятливими для конкретно визначеної точки, а максимальні значення вертикальних переміщень очікувано є найбільшими по центру покриття і не суттєво відрізняються при різних комбінаціях завантажень.

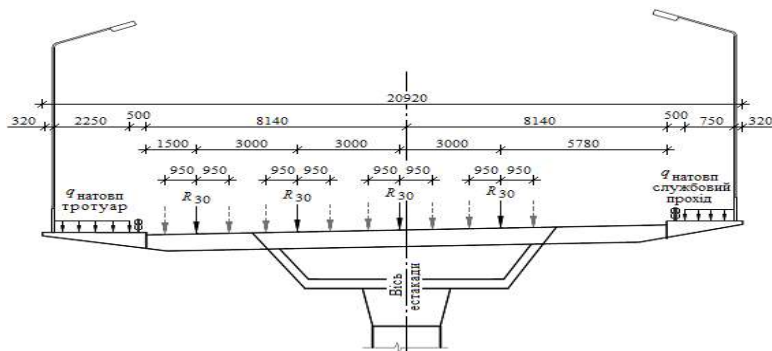


Рисунок 3 – Схема прикладення складових тимчасового навантаження до поперечного перерізу прогону будови естади спряження

Figure 3 – The scheme of applying the components of the temporary load to the cross section span structure of the overpass conjugation

Результати і пояснення. Зважаючи на зазначене розглянемо роботу прогону будови естади спряження греблі ДніпроГЕС із лівим берегом р. Дніпро при одному з розрахункових сполучень навантажень, а саме: постійного та тимчасового навантаження у складі автомобільного навантаження Н-30 від колони автомобілів вагою 30 тс кожен і розрахункового рівномірно розподіленого навантаження від натовпу людей на тротуарі. Результати чисельних розрахунків у вигляді ізополів вертикальних переміщень і нормальних напружень у листах настилу ортотропної плити та дотичних напружень у стінках головних балок представлено на рис. 4 – 6.

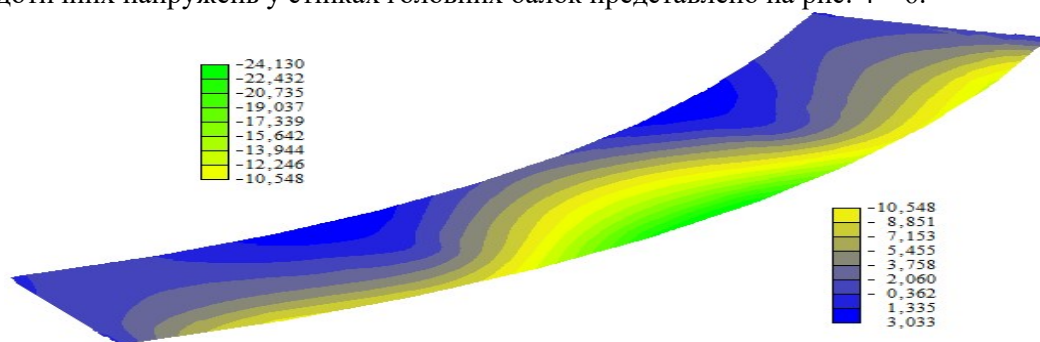


Рисунок 4 – Ізополі вертикальних переміщень w у листі настилу ортотропної плити, мм
Figure 4 – Isofield of vertical movements w in the floor sheet of an orthotropic slab, mm

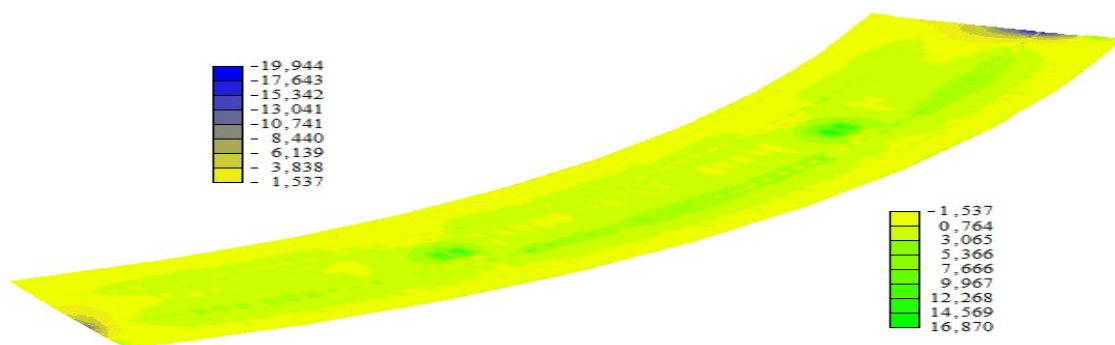


Рисунок 5 – Ізополі нормальних напружень σ_x у листі настилу ортотропної плити, $\sigma_x \cdot 10^2$ кгс/см²
Figure 5 – Isofield of normal stresses σ_x in the floor sheet of an orthotropic slab, $\sigma_x \cdot 10^2$ kgf/cm²

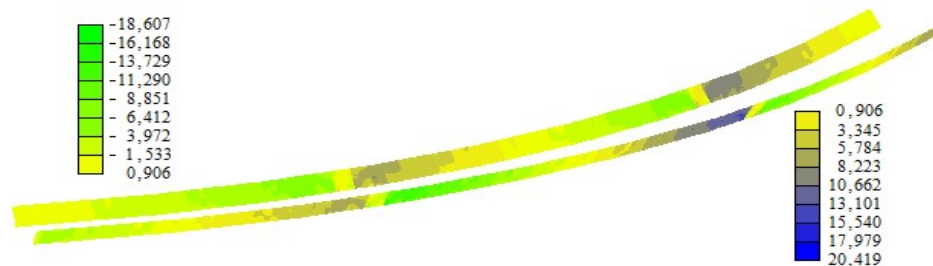


Рисунок 6 – Ізополя дотичних напружень τ_{xy} у стінках головних балок, $\tau_{xy} \cdot 10^2$ кгс/см²
Figure 6 – Isofield of tangential stresses τ_{xy} in the walls of the main beams, $\tau_{xy} \cdot 10^2$ kgf/cm²

Як випливає з аналізу отриманих результатів лист настилу ортотропної плити за всією довжиною прогонової будови естакади спряження має два типи принципово відмінних зон вертикальних переміщень (рис. 4). Перша з них розташована в місцях опорних діафрагм та сталевих колон і охоплює всю довжину проїзної частини ортотропної плити по внутрішній дузі з максимальними позитивними значеннями переміщень до 3,033 мм. Друга ж зона знаходиться по середині покриття, де лист настилу прогинається донизу з максимальними значеннями прогину 24,13 мм. Що ж стосується розподілення нормальних напружень у листі настилу ортотропної плити (рис. 5), зазначимо, що лист настилу в місцях опорних діафрагм сприймає напруження стиснення в межах $\sigma_x = 153 - 1994$ кгс/см², а в центрах прогонів між консольними ригелями загалом є більш-менш рівномірно розтягнутим у межах $\sigma_x = 76 - 1687$ кгс/см². Щодо роботи стінок головних балок, то в них відслідковується різнонаправлений напружений стан (рис. 6): в деяких фрагментах цих стінок присутні напруження стиску (у межах до $\tau_{xy} = 1860$ кгс/см²); в інших – розтягу (у межах до $\tau_{xy} = 2041$ кгс/см²), що обумовлено особливостями обпирання головних балок на сталеві колони.

Осмислюючи тепер наведені результати можна усвідомити, що ортотропна плита знаходиться у дещо недонапруженому стані. Роз'яснити ж це неповне використання несної спроможності ортотропної плити можна досить легко, якщо пригадати історію спорудження автопроїзду по греблі ДніпроГЕС, головна мета якого насамперед була спрямована на пришвидшене вирішення тогочасних нагальних транспортних проблем м. Запоріжжя. З огляду на вказане, як проектування, так і будівництво проводились у дуже скорочені терміни, а головна увага приділялась виключно розв'язанню низки супутніх організаційно-технологічних заходів, при цьому економічні показники застосовуваних конструктивних рішень практично не брались до відома.

А тепер продовжимо аналізування параметрів НДС конструктивних елементів ортотропної плити. На рис. 7 і 8 для одного з типових укрупнених блоків прогонової будови естакади спряження греблі ДніпроГЕС із лівим берегом р. Дніпро (в даному випадку передостаннього) представлено графічні залежності зміни параметрів НДС уздовж локальних поздовжньої і поперечної осей, які проходять посередині цього блоку (орієнтація локальних осей вказана на рис. 9). І одразу привернемо увагу до того, що суцільна чорна крива на цих графіках відповідає дійсній роботі прогонової будови з врахуванням дефектів і пошкоджень (зокрема корозійних) мостових конструкцій, виявлених під час останніх спеціальних обстежень естакади спряження греблі ДніпроГЕС із лівим берегом р. Дніпро (нагадуємо, що ці дефекти і пошкодження наведені вище), а суцільна синя – відображає роботу її проектного стану.

Якщо уважно проаналізувати представлені на рис. 7 і 8 графіки, то можна дійти до цілком очікуваного якісного висновку, що набуті за час експлуатації дефекти та пошкодження прогонової будови автопроїзду впливають на параметри НДС мостових конструкцій. Що ж стосується кількісної оцінки цього впливу, вкажемо на те, що розбіжність між переміщеннями і напруженнями проектного та дійсного стану знаходиться у межах від 7 до 11,5% майже для всіх конструктивних елементів в результаті практично рівномірної довготривалої корозії металу з незначним ослабленням поперечних перерізів (одночасно з рис. 8, б також випливає, що у листі настилу над головними балками ортотропної плити присутні неістотні хвилеподібні коливання значень нормальних напружень. Виняток із зазначеного становить тільки зона завширшки біля 0,5 – 0,6 м, яка прилягає до тротуару і простягається за всією довжиною естакади спряження. А особливість цієї зони зводиться до того, що на ній на відміну від усіх інших елементів прогонової будови автопроїзду в значній мірі присутня нерівномірна корозія металу конструктивних елементів, викликана впливом дощових опадів (влітку) і розчинів агресивних

протиожедних соляних сумішей (у зимовий період), які потрапляють на неї шляхом стікання по нахилений верхній площині ортотропної плити (рис. із подальшим накопиченням біля бордюру у вигляді калюж і, як наслідок, просочуванням у її (плити) внутрішній простір. Через це у цій зоні різниця між переміщеннями і напруженнями проектного та дійсного стану (не зважаючи на їх не дуже суттєві значення) збільшується приблизно у 1,5 – 2 рази і досягає 16 – 20%, про що виразно свідчить рис. 8.

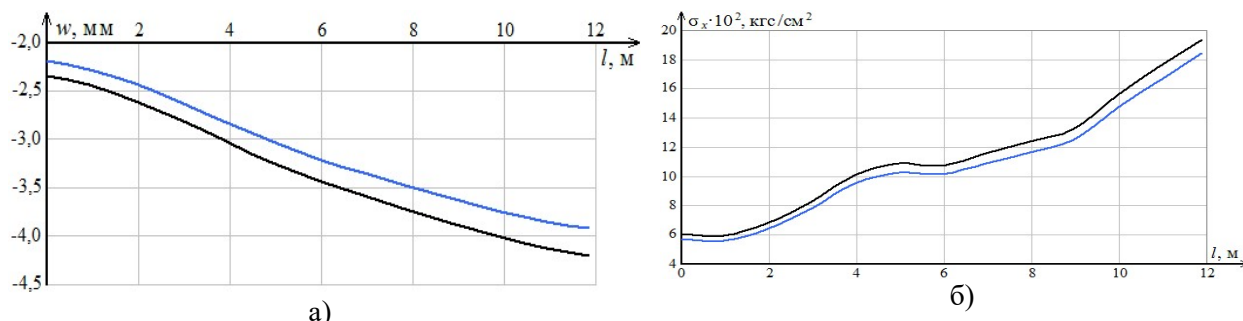


Рисунок 7 – Графіки зміни параметрів НДС уздовж локальної поздовжньої осі укрупненого блоку прогонової будови естакади спряження: а - вертикальні переміщення; б - нормальні напруження

Figure 7 – Graphs of changes in VAT parameters along the local longitudinal axis of the magnified of the span structure block of the overpass conjugation: a - vertical movements; b - normal stresses

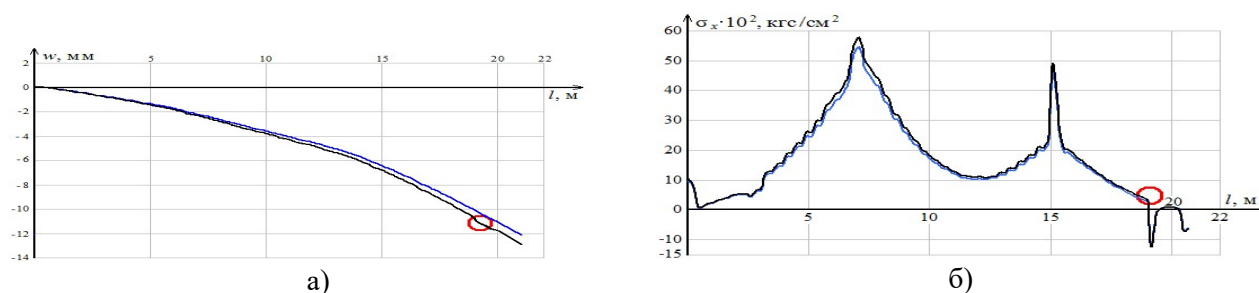


Рисунок 8 – Графіки зміни параметрів НДС уздовж локальної поперечної осі укрупненого блоку прогонової будови естакади спряження: а - вертикальні переміщення; б - нормальні напруження; **О** – зона біля тротуару

Figure 8 – Graphs of changes in VAT parameters along the local transverse axis of the enlarged block of the span structure of the conjugation overpass: a – vertical movements; b – normal stresses; **O** – zone near the sidewalk

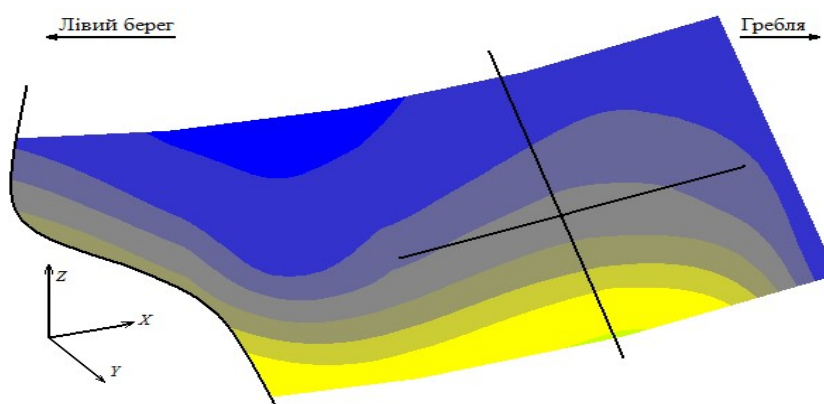


Рисунок 9 – Орієнтація локальних осей, використаних при побудові графічних залежностей зміни параметрів НДС у листі настилу ортотропної плити

Figure 9 – Orientation of local axes used in the construction of graphics dependences of changes in VAT parameters in the floor sheet of an orthotropic slab

Методика розрахунку прогонової будови з використанням коефіцієнта редукції. Привернемо увагу до того, що загальні положення винесеної у назву даного розділу методики викладені у чинному нормативному документі [3,4], а її деталізація і послідовність застосування стосовно конкретного прикладу прогонової будови із ортотропною сталевую плитою проїзної частини існуючого автопроїзду по греблі ДніпроГЕС – у роботах авторів [3,4]. Із урахуванням цього в даній статті вказана методика повторно не викладається, проте якщо у читачів все ж таки виникне бажання з нею ознайомитися, вони можуть достатньо легко звернутися до перелічених публікацій.

Результати розрахунків прогонової будови з використанням коефіцієнта редукції. Відомо, що розрахунок ортотропних плит прогонової будови рекомендується проводити у два прийоми (переважно з метою порівняння отриманих результатів): спочатку застосовується інженерно-аналітичний метод, а потім – чисельний (як правило, метод скінченних елементів) [2]. З огляду на це спершу дослідження прогонової будови з ортотропною плитою естакади спряження греблі ДніпроГЕС із лівим берегом р. Дніпро проведені з використанням коефіцієнта редукції ширини полиці β , який знаходиться у функціональній залежності від ефективної ширини полиці b_{eff} . Оскільки, як зазначено в [2], задля визначення параметру b_{eff} при пружній роботі конструкції вид навантаження не відіграє жодної ролі, то з метою спрощення обчислення нормальних напружень доцільно використовувати власну вагу прогонової будови. Що ж стосується безпосередньо коефіцієнтів редукції, то для їх підрахунку перерізи епюр нормальних напружень у листі прогонової будови необхідно робити в характерних точках – на опорах та у чвертях прогонів, а схему з позначенням розрахункових ділянок цих коефіцієнтів у поперечному перерізі прогонової будови представляти у зображеному на рис. 10 вигляді.

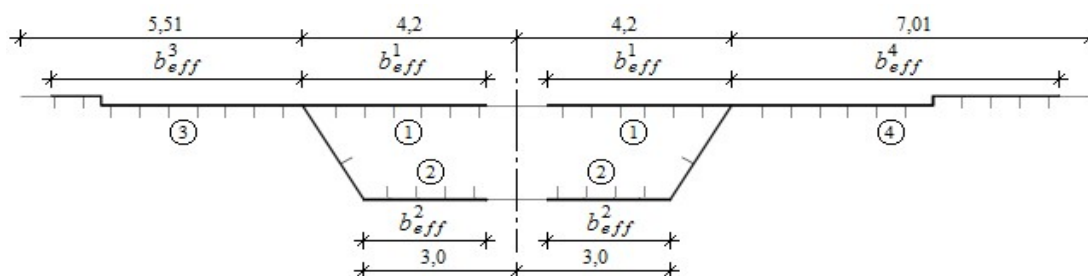


Рисунок 10 – Поперечний переріз прогонової будови з зазначеними розрахунковими ділянками коефіцієнтів редукції:

- 1 – внутрішня плита верхня (ділянка N 1); 2 – внутрішня плита нижня (ділянка N 2);
3 – консольна плита коротка (ділянка N 3); 4 – консольна плита довга (ділянка N 4)

Figure 10 – Cross-section of the span structure with the indicated calculation areas of coefficients reductions:

- 1 – upper inner plate (section N 1); 2 – lower internal plate (section N 2);
3 – console plate is short (section N 3); 4 – cantilever plate is long (section N 4)

Побудовані у такий спосіб графіки залежності між коефіцієнтом редукції β та довжиною прогону L для розрахункових ділянок поперечного перерізу прогонової будови зображені на рис. 11.

А зараз перейдемо до розгляду результатів чисельних розрахунків прогонової будови. Проте перш ніж безпосередньо приступити до дослідження коефіцієнта редукції, спочатку звернемося до самих цих результатів із метою виявлення й узагальнення найменших нюансів роботи конструктивних елементів прогонової будови під навантаженням. Для цього насамперед розглянемо розподілення вертикальних переміщень і нормальних напружень у листі настилу ортотропної плити та дотичних напружень у стінках головних балок, ізополя яких представлено на рис. 12 – 14.

Як вбачається з рис. 12 лист настилу ортотропної плити за всією довжиною прогонової будови естакади спряження має незначні прогини. В районі опорних діафрагм та сталевих колон значення переміщень майже дорівнюють 0 мм, що цілком зрозуміло. По середині покриття лист настилу прогинається донизу з максимальними значеннями прогину до 10,6 мм. Що ж стосується характеру розподілення нормальних напружень у листі настилу ортотропної плити (рис. 13), вкажемо на те, що лист настилу загалом є майже рівномірно розтягнутим по всій довжині покриття із коливаннями значень напружень:

від $\sigma_x = 50 \text{ кгс/см}^2$ до $\sigma_x = 1792 \text{ кгс/см}^2$. І тільки в місцях опорних діафрагм є наявними напруження стиснення, що знаходяться в межах від $\sigma_x = 73 \text{ кгс/см}^2$ до $\sigma_x = 1187 \text{ кгс/см}^2$. Щодо роботи стінок головних балок, то в них відслідковується різнонаправлений напружений стан (рис. 14), що знаходить своє відображення у наявності в деяких фрагментах цих стінок незначних за значеннями напружень стиску (у межах до $\tau_{xy} = 980 \text{ кгс/см}^2$) і розтягу (у межах до $\tau_{xy} = 1000 \text{ кгс/см}^2$)

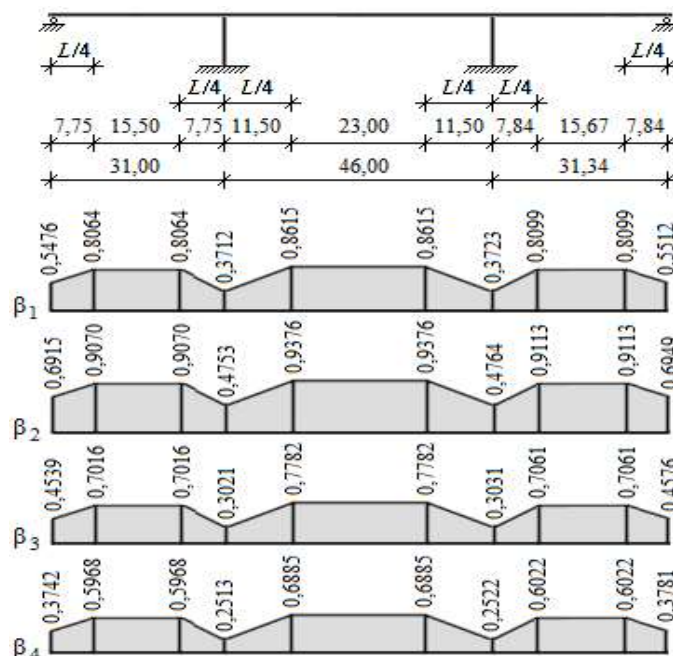


Рисунок 11 – Графіки залежності коефіцієнтів редукції від довжини прогонової будови $\beta = f(L)$, побудовані з використанням інженерно-аналітичного методу розрахунку [2] (розміри ділянок прогонової будови естакади спряження вказані по осі естакади)

Figure 11 – Graphs of the dependence of the reduction coefficients on the length of the span structure $\beta = f(L)$, built using the engineering-analytical method of calculation [2] (the dimensions of the sections of the span structure of the conjugation trestle are indicated along the axis of the trestle)

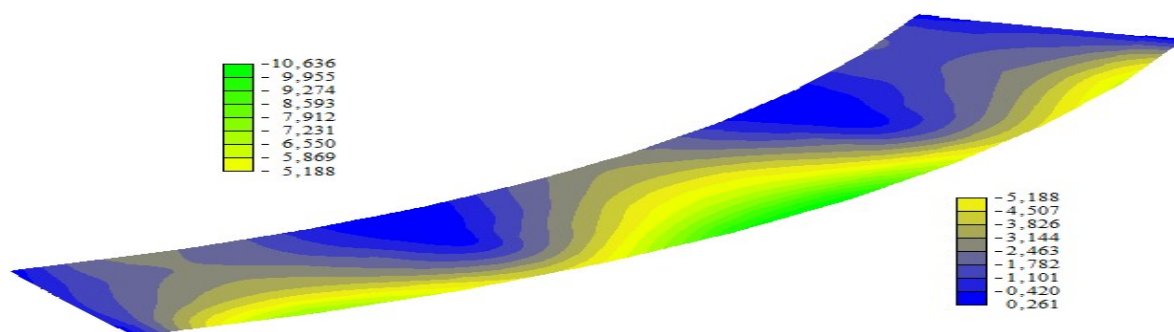


Рисунок 12 – Ізополя вертикальних переміщень w у листі настилу ортотропної плити від постійного навантаження, мм

Figure 12 – Isofield of vertical movements w in the floor sheet of an orthotropic slab due to constant loading, mm

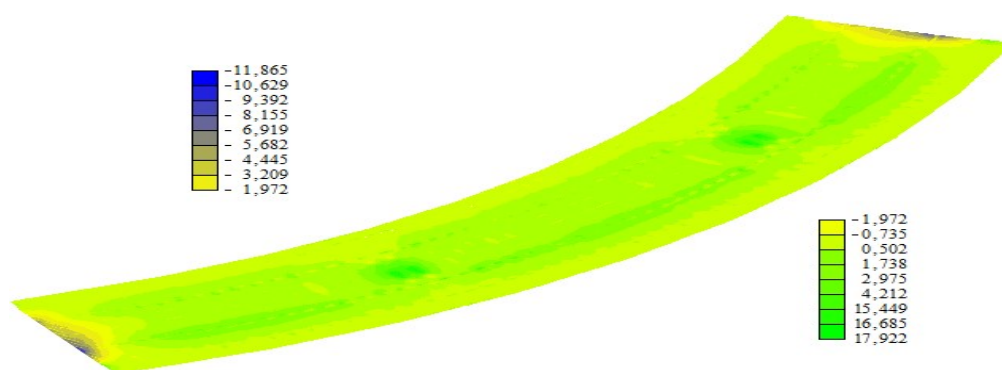


Рисунок 13 – Ізополя нормальних напружень σ_x у листі настилу ортотропної плити від постійного навантаження, $\sigma_x \cdot 10^2 \text{ кгс/см}^2$

Figure 13 – Isofield of normal stresses σ_x in the floor sheet of an orthotropic slab from a constant load, $\sigma_x \cdot 10^2 \text{ kgf/cm}^2$

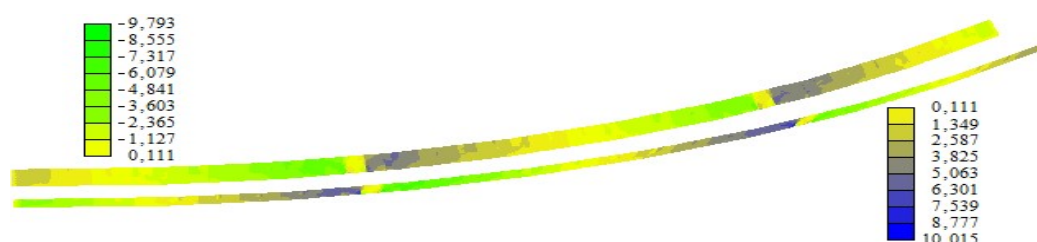


Рисунок 14 – Ізополя дотичних напружень τ_{xy} у стінках головних балок від постійного навантаження, $\tau_{xy} \cdot 10^2 \text{ кгс/см}^2$

Figure 14 – Isofield of tangential stresses τ_{xy} in the walls of the main beams from a constant load, $\tau_{xy} \cdot 10^2 \text{ kgf/cm}^2$

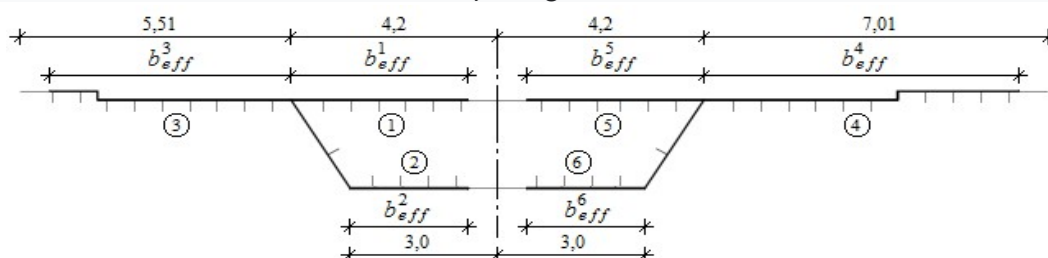


Рисунок 15 – Поперечний переріз прогонової будови з зазначеними розрахунковими ділянками коефіцієнтів редукції:

- 1 – внутрішня плита ліва верхня (ділянка N 1); 2 – внутрішня плита ліва нижня (ділянка N 2);
- 3 – консольна плита коротка (ділянка N 3); 4 – консольна плита довга (ділянка N 4);
- 5 – внутрішня плита права верхня (ділянка N 5); 6 – внутрішня плита права нижня (ділянка N 6)

Figure 15 – Cross-section of the span structure with the indicated calculation areas of coefficients reductions:

- 1 – upper left inner plate (section N 1); 2 – lower left internal plate (section N 2);
- 3 – console plate is short (section N 3); 4 – long console plate (section N 4);
- 5 – upper right inner plate (section N 5); 6 – lower right inner plate (section N 6)

Побудовані шляхом опрацювання наведених вище результатів чисельного методу розрахунку графіки залежності між коефіцієнтом редукції β та довжиною прогону L для розрахункових ділянок поперечного перерізу прогонової будови (схема яких наведена на рис. 15) зображені на рис. 16. Зауважимо, що особливість цього рисунку (у порівнянні з результатами інженерного розрахунку на рис. 11) полягає у двох додаткових графіках β_5 і β_6 для внутрішніх верхньої і нижньої ділянок плити. Це пов'язано з тим, що згідно методики [4] коефіцієнти редукції для внутрішніх ділянок ортотропної плити вважаються однаковими, тоді як при використанні чисельного розрахунку отримуються різні

значення, що пов'язано з, по-перше, кривиною прогонової будови в плані й, по-друге, несиметричністю поперечного перерізу ортотропної плити (одна з консолей більша, ніж інша), яка й призводить до несиметричності завантаження прогонової будови.

Одночасно в таблиці 1 із метою оцінювання близькості отриманих із застосуванням інженерно-аналітичного та чисельного методів розрахунку результатів визначення коефіцієнта редукції β відображені відповідні дані для шістьох розрахункових ділянок поперечного перерізу прогонової будови (нагадуємо, що схема цих ділянок представлена на рис. 16) на опорі та в прогоні й вказана різниця між ними.

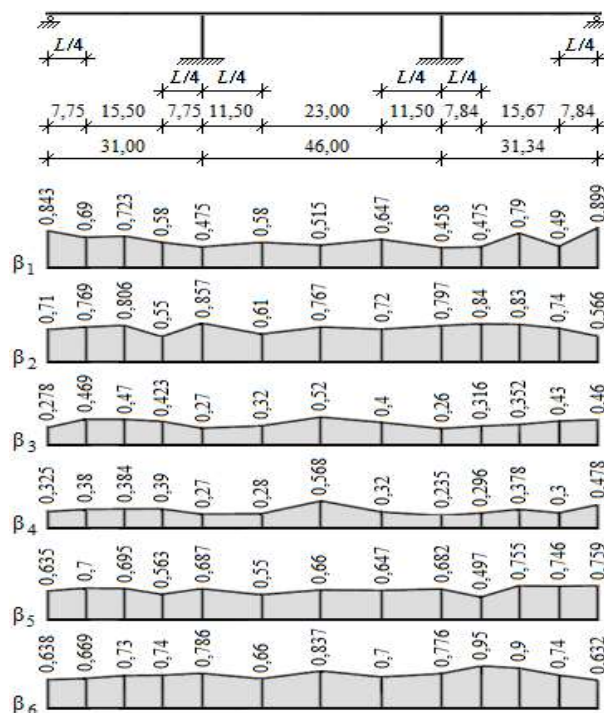


Рисунок 16 – Графіки залежності коефіцієнтів редукції від довжини прогонової будови $\beta = f(L)$, побудовані з використанням чисельного методу розрахунку (розміри ділянок прогонової будови естакади спряження вказані по осі естакади)

Figure 16 – Graphs of the dependence of the reduction coefficients on the length of the span structure $\beta = f(L)$, built using the numerical method of calculation (the dimensions of the sections of the span structure of the conjugation trestle are indicated along the axis of the trestle)

З наведених у таблиці 2 даних випливає, що коефіцієнти редукції, обчислені майже для всіх ділянок ортотропної плити за допомогою чисельного розрахунку і за Додатком «Д» [2], достатньо суттєво відрізняються один від іншого – від 0,43 до 59,3 відсотків. Проте така розбіжність має досить просте пояснення, пов'язане з двома суттєвими конструктивними відмінностями між реальною конструкцією й тією, що розглядається в Додатку «Д» [2].

Перша з цих відмінностей полягає в тому, що в Додатку «Д» [2] будь-яка прогонова будова і, зокрема, естакада спряження, апроксимується у вигляді прямої балки з проміжними опорами. У дійсності ж кожен блок прогонової будови є повернутим у плані відносно попереднього, утворюючи таким чином закінчену криволінійну споруду з радіусом 125 м, що достатньо сильно змінює характер розподілу напружень порівняно з прямою в плані конструкцією. А друга зводиться до того, що проміжні (середні) опори естакади являють собою колони коробчастого перерізу жорстко з'єднані з проговною будовою, що теж вносить певні корективи у розподіл нормальних напружень в ортотропній плиті. Що ж стосується додатку «Д» [2], то в ньому взагалі не розглядає застосований тип опирання. І саме тому перелічені конструктивні відмінності й зумовлюють розбіжність в отриманих значеннях коефіцієнтів редукції. Більше того, це означає, що для нестандартних конструкцій, на кшталт естакади спряження, реальні значення коефіцієнтів редукції можна визначити лише за результатами чисельних розрахунків.

Таблиця 2 – Розрахункові значення коефіцієнтів редукції β

Table 2 – Calculated values of reduction coefficients β

Номер розрахункової ділянки	Коефіцієнти редукції β											
	На крайніх опорах		Різниця, %	На середніх опорах		Різниця, %	У крайніх прогонах		Різниця, %	У середньому прогоні		Різниця, %
	I	II		I	II		I	II		I	II	
1	0,548 / 0,551	0,843 / 0,899	34,9 / 38,7	0,371 / 0,372	0,458 / 0,475	18,9 / 21,7	0,806 / 0,81	0,475 / 0,79	41,1 / 2,5	0,862	0,515 / 0,647	40,2 / 24,9
2	0,692 / 0,695	0,566 / 0,71	18,2 / 2,1	0,475 / 0,476	0,797 / 0,857	40,4 / 44,5	0,907 / 0,911	0,55 / 0,84	39,4 / 7,8	0,938	0,61 / 0,767	34,9 / 18,2
3	0,454 / 0,458	0,278 / 0,46	38,7 / 0,43	0,302 / 0,303	0,26 / 0,27	13,9 / 10,9	0,702 / 0,706	0,316 / 0,47	54,9 / 33,4	0,778	0,32 / 0,52	58,8 / 33,2
4	0,374 / 0,378	0,325 / 0,478	13,1 / 20,9	0,251 / 0,252	0,235 / 0,27	6,4 / 6,7	0,597 / 0,602	0,296 / 0,39	50,4 / 35,2	0,689	0,28 / 0,568	59,3 / 17,6
5	0,548 / 0,551	0,635 / 0,759	13,7 / 27,4	0,371 / 0,372	0,682 / 0,687	45,6 / 45,9	0,806 / 0,81	0,476 / 0,755	40,9 / 6,8	0,862	0,55 / 0,66	36,2 / 23,4
6	0,692 / 0,695	0,632 / 0,638	8,67 / 8,2	0,475 / 0,476	0,776 / 0,786	38,8 / 39,4	0,907 / 0,911	0,669 / 0,95	26,2 / 4,1	0,938	0,66 / 0,837	29,6 – 10,7

Примітки: 1. Розташування розрахункових ділянок коефіцієнтів редукції у поперечному перерізі прогонової будови за номерами вказано на рис. 25 і 30.

2. Для методів розрахунку прийняті наступні позначення: I – інженерно-аналітичний метод розрахунку [3];

II – чисельний метод розрахунку.

3. Величини коефіцієнтів редукції у кожній чарунці таблиці розташовані в порядку збільшення

До речі, вказаний висновок стосується обчислення й інших параметрів напружено-деформованого стану прогонової будови естакади спряження. Засвідчує сказане дані таблиці 3, в якій згруповані результати розрахунків із використанням інженерно-аналітичного і чисельного методів розрахунку щодо нормальних і дотичних напружень в елементах її головної балки.

Таблиця 3 – Розрахункові значення нормальних і дотичних напружень в елементах головної балки прогонової будови

Table 3 – Calculated values of normal and tangential stresses in the elements of the main beam of the span structure

Абсциса поперечного перерізу прогонової будови, м	Елемент поперечного перерізу головної балки	Нормальні напруження σ_x , кгс/см ²		Різниця, %	Дотичні напруження τ_{xy} , кгс/см ²		Різниця, %
		I	II		I	II	
$x = 0$; $x = 108,34$	стінка	–	–	–	714	787	9,3
$x = 15,5$; $x = 92,67$	верхній пояс	395	567	30,3	–	–	–
	стінка	–	–	–	303	545	44,4
	нижній пояс	928	1056	12,1	–	–	–
$x = 31,0$; $x = 77,0$	верхній пояс	2177	1688	22,4	–	–	–
	стінка	–	–	–	1333	1129	15,3
	нижній пояс	2842	2627	7,5	–	–	–
$x = 54,0$	верхній пояс	600	648	7,4	–	–	–
	стінка	–	–	–	159	283	43,8
	нижній пояс	1386	1209	12,8	–	–	–

Примітка: I – інженерно-аналітичний метод розрахунку [3]; II – чисельний метод розрахунку

З даних у наведеній таблиці чітко відслідковується, що визначені з використанням інженерно-аналітичного методу розрахунку нормальні й дотичні напруження в елементах головної балки прогонової будови мають більші значення (особливо їх максимальні величини) порівняно з тими, які підраховані за допомогою чисельного методу розрахунку. Останнє зайвий раз підтверджує тезис про те, що методика Додатку «Д» [2] є більш консервативна, а чисельний метод, завдяки можливості відображення в розрахунковій моделі конструктивних особливостей досліджуваних конструкцій шляхом їх максимальної деталізації, дозволяє отримувати більш якісніші, надійніші та точніші результати розрахунків.

Висновки та рекомендації.

В статті розглянуто методологічні аспекти комплексного підходу до розрахунку й аналізу роботи мостових прогонових будов із ортотропними плитами проїзної частини. В якості об'єкту дослідження прийнято прогонову будову естакади спряження греблі ДніпроГЕС із лівим берегом р. Дніпро, розрахункова модель якої створена з урахуванням дійсного технічного стану конструктивних елементів на основі результатів виконаних інженерних обстежень. Визначено коефіцієнти редукації шляхом застосування інженерно-аналітичного (нормативного) та чисельного (скінченних елементів) методів розрахунку. Наведено й проаналізовано результати чисельного методу у вигляді вертикальних переміщень і нормальних напружень у листі настилу ортотропної плити та дотичних напружень у стінках головних балок. Виконано порівняння отриманих результатів та надані рекомендації в частині застосування методів розрахунку.

Нові результати і, як наслідок, сформульовані на їх базі рекомендації полягають в наступному.

1. Стосовно розрахункового оцінювання дійсного технічного стану – розрахунки мостових споруд у неодмінному порядку необхідно здійснювати з оглядом на їх дійсний технічний стан, встановлений за результатами проведених інженерних обстежень.

2. Стосовно відображення в чисельній моделі дійсного технічного стану – при побудові скінченно-елементної моделі мостових конструкцій врахування визначених дефектів, пошкоджень і руйнувань конструктивних елементів внаслідок їх значної кількості рекомендується проводити не прямим їх відтворенням, а опосередковано – коригуванням товщини скінченних елементів у залежності від існуючої відповідної «вади» зі збереженням інших геометричних і жорсткісних параметрів. Причому величину цього коригування слід визначати усереднюючи наявні «вади» по поверхні конструктивного елементу.

3. Стосовно застосування методів розрахунку – при проведенні досліджень мостових споруд, які мають набуті під час експлуатації дефекти, пошкодження і руйнування, а також тих, яким властиві нестандартні конструктивні рішення, ліпше використовувати чисельні методи розрахунку з двох обставин. Перша з них полягає в тому, що тільки чисельні методи дозволяють досягти при побудові числової моделі максимально можливої деталізації конструкції і, як наслідок, отримати більш якісніші, надійніші та точніші результати розрахунків; друга – пов'язана з відсутністю у чинній нормативній документації методик, які передбачали б врахування результатів інженерних обстежень конструктивних елементів мостових споруд і застосованих нестандартних конструктивних рішень, а тому визначені за допомогою цих методик результати призводять до великих похибок.

4. Стосовно підвищення несної спроможності конструкцій – оскільки дефекти, пошкодження і руйнування, які присутні в конструктивних елементах, що експлуатуються протягом багатьох десятків років, у значній мірі негативно впливають на роботу цих елементів під навантаженням, рекомендується з урахуванням результатів розрахунків розроблювати необхідні організаційні пропозиції (зокрема, щодо постійного моніторингу технічного стану конструкцій) та ремонтні заходи з метою підвищення як рейтингу експлуатаційного стану мостової споруди, так і безпеки її експлуатації.

5. Стосовно корегування нормативної документації – зважаючи на те, що чинні нормативні документи не містять положень із розрахунку та проектування мостових споруд із урахуванням даних інженерних обстежень і нестандартних конструктивних рішень рекомендується доповнювати ці нормативні документи відповідними розділами.

Перелік посилань

1. ДБН В.1.2-15:2009 Споруди транспорту. Навантаження і впливи. Мости та труби. Київ, 2009. 84 с. (Інформація та документація).

<http://kbu.org.ua/assets/app/documents/dbn2/48.1.%20%D0%94%D0%91%D0%9D%20%D0%92.1.2-15~2009.%20%D0%A1%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%B8%20%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82%D1%83.%20%D0%9C%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8%20%D1%82%D0%B0%20%D1%82%D1%80.pdf> (дата звернення: 10.05.2022).

2. ДБН В.2.3-26:2010 Споруди транспорту. Мости та труби. Сталеві конструкції. Правила проектування. Київ, 201. 265 с. (Інформація та документація). http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=26663 (дата звернення: 15.05.2022).

3. Шимановський О. В., Шалінський В.В., Шимановська М.О. Напружений стан ортотропних плит проїзної частини мостових прогонових будов із урахуванням впливу експлуатаційних дефектів і пошкоджень. *Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М.Шимановського*. Київ: Видавництво «Сталь», 2020. Вип. 25. С. 5-11.

4. Шимановський О. В., Шалінський В.В., Шимановська М.О. Особливості розрахунку та роботи мостових прогонових будов із ортотропними плитами проїзної частини з урахуванням їх дійсного технічного стану. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2020. № 3. С.2 – 16.

5. Онищенко А. М., Ковальчук В. В., Гібаленко О. М., Шалінський В. В., Чиженко Н. П., Гаркуша М. В. Забезпечення експлуатаційної надійності мостового переходу аванкамери проїзду греблі «Дніпровська ГЕС». *Вісник національного університету водного господарства та природокористування*. Рівне, Випуск 4 (96), 2021. С.26 – 38.

6. Онищенко А.М., Шалінський В.В., Чиженко Н.П., Гаркуша М.В. Обстеження автодорожнього мосту гідротехнічної споруди Дніпровської ГЕС. *Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції Гідротехнічне і транспортне будівництво*. Одеса. 2022 р. С.41 - 44.

7. Шимановський О.В., Шалінський В.В., Шимановська М.О. Закономірності впливу експлуатаційних дефектів і пошкоджень на технічний стан мостових прогонових будов із ортотропними плитами проїзної частини. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2021. № 2. С. 3 – 18.

8. Шимановський О.В., Осадчий С.Д., Шалінський В.В., Тарнопольський Д.Й. Питання реконструкції автопроїзду по спорудах греблі ДніпроГЕС. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2022. № 1. С. 12 – 29.

METHODOLOGICAL ASPECTS OF THE COMPLEX APPROACH TO THE CALCULATION AND ANALYSIS OF THE WORK OF BRIDGE GUARD STRUCTURES WITH ORTHOTROPIC ROAD PLATES

Voroshnov Serhii M., Candidate of Technical Sciences, Ph. D, National Transportation University, Professor of bridges, tunnels and hydraulic structures Department, e-mail: voroshnov52@ukr.net, +38067709707, <https://orcid.org/0000-0003-0642-8289>

Onyshchenko Artur M., Doctor of Technical Science, Professor, National Transportation University, Head of bridges, tunnels and hydraulic structures Department, e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, +380687771899, <https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>

Fedorenko Oleksandr V., utility corporation "Kyivavtodor", general director, e-mail: 50281@ukr.net, +380672926788, <https://orcid.org/0000-0002-3464-597X>

Chyzhenko Nataliia P., Candidate of Technical Sciences, Ph. D, National Transportation University, Associate Professor of bridges, tunnels and hydraulic structures Department, e-mail: chyzhenko_np@ukr.net, +380507355080, <https://orcid.org/0000-0002-9152-2474>

Shalinskyi Valery V., candidate of technical sciences, senior researcher, LLC "Ukrinstalkon named after V. M. Shymanovskyi", head of the department of bridges and special structures, e-mail: shalinsky_v@ukr.net, +380676824217, <https://orcid.org/0000-0001-9347-8342>

Abstract. The paper considers peculiarities of analysis and operation of bridge decks with orthotropic deck plates of the roadway. As an example, the design of the superstructure of the existing driveway over the overpass of Dnieper Hydroelectric Power Plant dam with the left bank is considered. Defects and damages of load-bearing structures acquired during the operation of the carriageway are described. The non-uniform distribution of normal stresses in the orthotropic plate decking is investigated. Reduction coefficients characterizing the non-uniform distribution of normal stresses were found by analyzing the design model using engineering and analytical (normative) method and numerical method of calculation. The results of the numerical method are presented and analyzed in the form of vertical displacements and normal stresses in the orthotropic plate decking and shear stresses in the walls of the main girders. The results obtained are compared. Conclusions and recommendations based on the research results are formulated.

Key words: bridge structure, span structure, orthotropic slab, calculation model, reduction factor, stress.

References

1.DBN V.1.2-15:2009 (2009) Transport structures. Loads and influences. Bridges and pipes. Kyiv, (Information and documentation).

<http://kbu.org.ua/assets/app/documents/dbn2/48.1.%20%D0%94%D0%91%D0%9D%20%D0%92.1.2-15~2009.%20%D0%A1%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%B8%20%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82%D1%83.%20%D0%9C%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8%20%D1%82%D0%B0%20%D1%82%D1%80.pdf> (data zvernennia: 10.05.2022).

2. DBN V.2.3-26:2010 (2010) Transport structures. Bridges and pipes. Steel structures. Design rules. Kyiv, (Information and documentation). http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=26663 (data zvernennia: 15.05.2022).

3. Shymanovsky O. V., Shalinsky V. V., Shymanovska M. O. (2020). Stress state of orthotropic slabs of the carriageway of bridge girder structures, taking into account the influence of operational defects and damage. Collection of scientific works of the Ukrainian Institute of Steel Structures named after V. M. Shymanovsky. Kyiv: "Stal" Publishing House, Vol. 25. P. 5-11.

4. Shymanovsky O. V., Shalinsky V. V., Shymanovska M. O. (2020). Peculiarities of the calculation and operation of bridge girder structures with orthotropic slabs of the carriageway, taking into account their actual technical condition. Industrial construction and engineering structures. Vol. 3. P.2 – 16.

5. Onyshchenko A. M., Kovalchuk V. V., Gibalenko O. M., Shalynskyi V. V., Chyzhenko N. P., Harkusha M. V. (2021). Ensuring operational reliability of the bridge crossing of the advance camera passage of the Dniprovsk HPP dam. Bulletin of the National University of Water Management and Nature Management. Rivne. Issue 4 (96). P.26 – 38.

6. Onyshchenko A.M., Shalynskyi V.V., Chyzhenko N.P., Harkusha M.V. (2022). Inspection of the road bridge of the hydrotechnical structure of the Dnipro HPP. Collection of theses of the international scientific and technical conference Hydrotechnical and transport construction. Odesa. P.41 - 44.

7. Shymanovskyi O.V., Shalynskyi V.V., Shymanovska M.O. (2022). Patterns of influence of operational defects and damage on the technical condition of bridge girder structures with orthotropic slabs of the carriageway. Industrial construction and engineering structures. Vol. 2. P. 3 – 18.

8. Shymanovskyi O.V., Osadchii S.D., Shalynskyi V.V., Tarnopolskyi D.Y. (2022). The issue of the reconstruction of the road through the constructions of the Dnipro HPP dam. Industrial construction and engineering structures. Vol. 1. P. 12 - 29.