

## УРАХУВАННЯ СУМІСНОЇ РОБОТИ БАЛОК У СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНІЙ МОДЕЛІ ДІАФРАГМОВОЇ ПРОГОНОВОЇ БУДОВИ

Бережна К. В., Краснов С. М.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*Анотація.* Наведено аналіз скінченно-елементних моделей діафрагмових прогонових будов з урахуванням сумісної роботи за рахунок сталевих накладок та асфальтобетонного покриття. Обрано найбільш приближену модель до реальної шляхом порівняння результатів розрахунку з даними випробування аналогічної прогонової будови.

*Ключові слова:* ребристі прогонові будови, діафрагми, скінченно-елементна модель, закладні деталі, металеві накладки, приведена жорсткість, діаграми прогинів.

### Вступ

Одним з головних завдань обстеження мостів та шляхопроводів є визначення несучої здатності конструкцій та оцінка реальної сумісної роботи всіх конструктивних елементів. Лабораторія кафедри мостів ХНАДУ щороку виконує обстеження понад десятка штучних споруд, в архіві зберігається інформація про стан більш ніж півтори тисячі мостів та шляхопроводів у Харківській та інших областях, що дозволяє визначити найбільш актуальні теми для наукових досліджень. Понад 40 % залізобетонних прогонових будов, які на теперішній час побудовано в Україні, ребристі. Об'єднання ребристих балок між собою виконується за трьома основними способами: за рахунок суцільної монолітної плити; за рахунок з'єднання поперечних балок-діафрагм металевими накладками або попередньо-напруженою арматурою. Збірні конструкції складають понад 65 % з залізобетонних прогонових будов. Типові проекти, у яких передбачено об'єднання по діафрагмах: ТП 56, ТП 122-63 (62), ВТП 16, 3.503-14 (вип. 2) та ін. Тому розрахунки ребристих збірних прогонових будов для визначення несучої здатності виконують дуже часто, і розробка зручної та реальної моделі таких прогонових будов є актуальною.

### Аналіз публікацій

Пошук адекватних розрахункових моделей для аналізу та розрахунку будівельних конструкцій є актуальним питанням, що порушують автори багатьох наукових робіт [1–5].

На жаль, діафрагмові прогонові будови широко використовували лише на території колишнього СРСР, саме тому досліджень таких конструкцій за кордоном не проводять. Найбільш близькі до обраної теми роботи

[6–8]. Одержані результати викликали інтерес та примусили врахувати у раніше запропонованих моделях [9–11] деякі уточнення.

### Мета і постановка завдання

У збірних діафрагмових прогонових будовах поєднання між балками може бути виконано за рахунок натягіння пучків з високоміцного дроту або стрижневої арматури періодичного профілю, але найчастіше поєднання виконане сталевими накладками. Тобто у швах між залізобетонними балками є лише сталеві накладки в площині плити над діафрагмами та в нижній частині діафрагм з її обох боків. Тому реальна сумісна робота між балками визначається жорсткістю та наявністю накладок, а також товщиною асфальтобетонного покриття на мосту, яке теж впливає на сумісну роботу [9, 11].

Крім того, металеві накладки та закладні деталі діафрагмових прогонових будов є конструктивними елементами, які найбільше підлягають руйнуванню (корозії та розриву), й урахування їх наявності або відсутності (до 40–50 % у деяких випадках) є дуже важливим для розрахунку конструкцій, що експлуатуються.

Тобто метою роботи є визначення необхідності врахування безпосередньо накладок у процесі об'єднання балок та визначення характеристик елементів, які моделюють сталеві накладки.

Завдання роботи: аналіз моделей діафрагмової прогонової будови без урахування накладок та з ними; визначення варіантів завдання жорсткості накладок; порівняння отриманих результатів з даними натурного експерименту аналогічної прогонової будови.

### Аналіз роботи реальних прогонових будов та скінченно-елементних моделей

Базовою конструкцією обрано міст, розташований на вул. Сватівській у м. Куп'янську. Міст перетинає правобережну частину заплави р. Оскол. Будівництво мосту виконано в період 1959–1960 рр. Повна довжина мосту по зовнішнім граням шафових стінок берегових опор – 84,58 м. Габарит – 9,1 м, тротуари –  $2 \times 1,3$  м. Схема мосту  $4,6 + 3 \times 22,16 + 4,6$  м. Проектне навантаження Н-18, НК-80. Берегові прогони – плитні з монолітного залізобетону, проміжні прогони – збірні, ребристі, об'єднані по діафрагмах. За геометричними характеристиками балки проміжних прогонів відповідають типовому проекту «Союздорпроект», випуск 56. Покриття виконано з асфальтобетону. На період проведення випробувань загальна товщина дорожнього одягу, з урахуванням раніше проведених ремонтних робіт, становить 30–32 см, що удвічі перевищує нормативні вимоги. У поперечному перерізі проміжних прольотів встановлено по вісім балок на відстані 1,4 м. Для випробування було обрано четвертий прогін мосту, який побудовано з ребристих діафрагмових балок завдовжки 22,16 м, з каркасною арматурою, висота балок – 125 см (рис. 1).

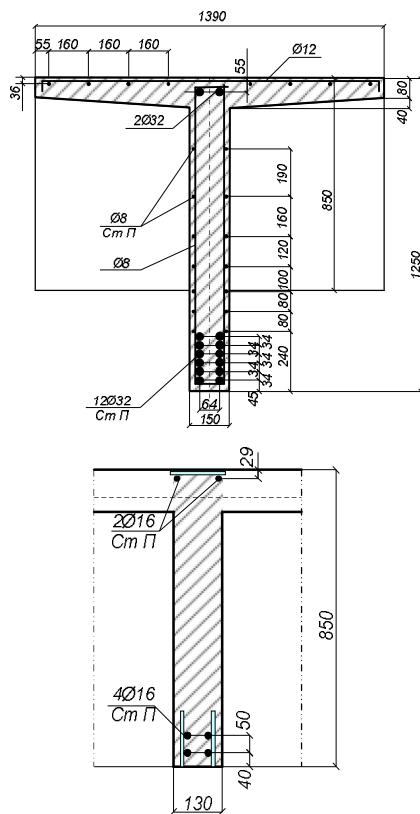


Рис. 1. Поперечний переріз головних балок та діафрагм прогонової будови

Як випробувальне навантаження використовувались автомобілі КраЗ 256 Б1. У середині четвертого прольоту було встановлено шість автомобілів, які були розміщені задніми бортами один до одного (рис. 2). У процесі випробування прогонової будови використані три схеми завантаження: схема 1 – два автомобілі біля тротуару (№ 1 і 2); схема 2 – додатково встановлюються два автомобілі приблизно по поздовжній осі мосту (№ 3 і 4); схема 3 – додатково встановлюються ще два автомобілі біля іншого тротуару (№ 5 і 6). Масу автомобілів було визначено шляхом їх зважування, результати якого наведені в табл. 1. Вертикальні переміщення (прогини) головних балок у середині прольоту вимірювались прогиномірами Максимова марки ПМ. Отримані результати є еталонними для вибору адекватної скінченно-елементної моделі для розрахунку ребристих діафрагмових прогонових будов.

Таблиця 1 – Маса автомобілів, які використано під час випробування

Номери автомобілів	Маса автомобіля, т	Розподілення навантаження, т	
		на передню вісь	на задню вісь
1	22,90	4,50	2×9,20
2	24,30	4,80	2×9,75
3	22,50	4,50	2×9,00
4	24,90	4,90	2×9,10
5	23,40	4,60	2×9,40
6	24,20	4,80	2×9,70

Розглянуто п'ять скінченно-елементних моделей прогонової будови: балковий ростверк, балковий ростверк з плитою, балковий ростверк з плитою і з урахуванням сумісної роботи балок за допомогою металевих накладок. Зупинимось більш детально на кожній з них.

Перша модель має вигляд балкового ростверку, у якому поздовжні стрижні (головні балки) мають тавровий переріз, а поперечні (діафрагми) – прямокутний відповідно до розмірів, наведених на рис. 1.

Модуль деформації для головних балок та діафрагм уведено з урахуванням робочої арматури:  $E_{r6} = 4673440 \text{ т/м}^2$ ,  $E_d = 3671960 \text{ т/м}^2$ . Поєднання між балками металевими накладними пластинами не враховувалося, діафрагми в поперечному напрямку майже суцільні.

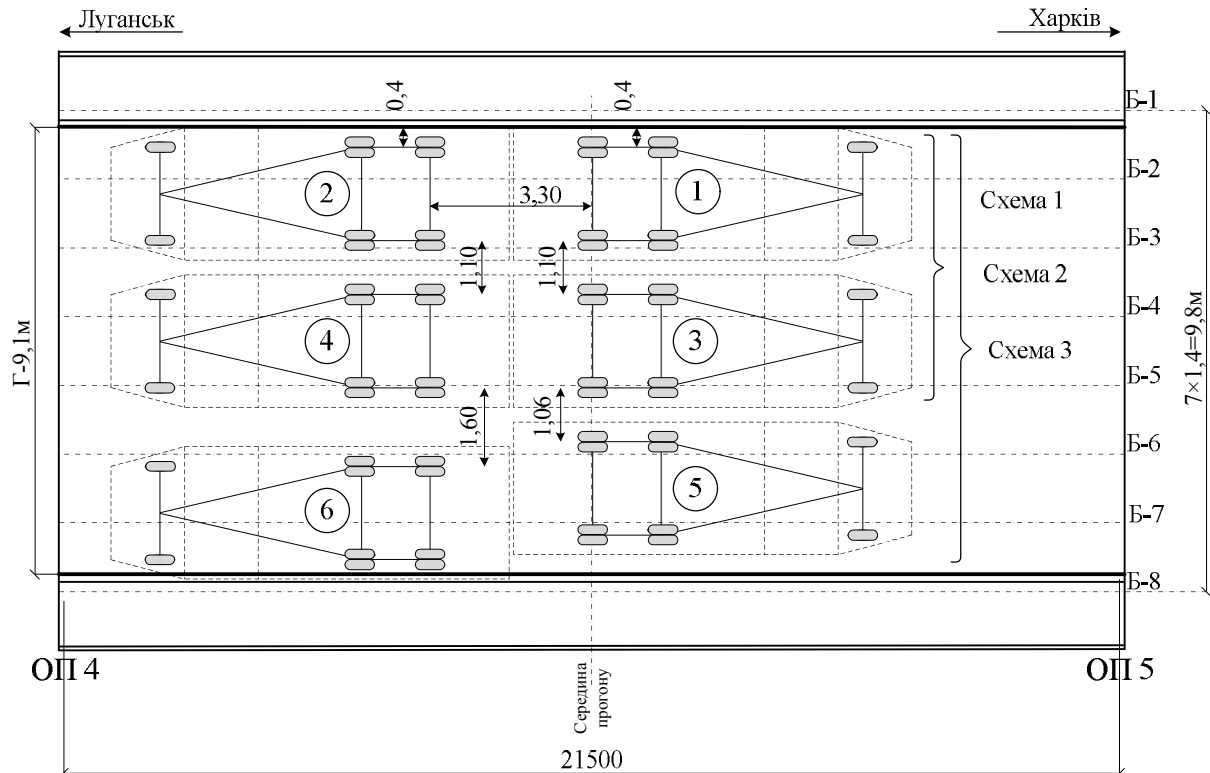


Рис. 2. Схема завантаження прогонової будови

Недоліком цієї моделі є незручність завдання рухомого навантаження та відсутність можливості врахування спільної з балками роботи шарів покриття проїзної частини.

Друга модель ідентична першій, але для полегшення завдання навантаження до системи стрижнів додано пластинчасті елементи, які моделюють плиту прогонової будови. Товщина плити 10 см, модуль деформації  $E_{пл} = 3000000 \text{ т/м}^2$ . Поєднання між балками металевими накладними пластинами не враховувалося.

Третя модель також складається зі стрижневих та пластинчастих скінчених елементів, але в цій та двох останніх моделях враховується поєднання між балками металевими накладними пластинами, переріз та схема розташування яких наведена на рис. 3.

Між пластинчастими та стрижневими елементами, з яких складається одна балка, передбачені додаткові елементи (завширшки 1 см), які моделюють шов між балками. У цій моделі додані тільки стрижневі елементи, що моделюють металеві накладки між балками й мають тавровий переріз, який складається з усіх шістьох накладок (без урахування відстані між ними), та модуль деформації сталі.

Четверта модель аналогічна третій, але металеві накладки задані чисельними скінче-

ними елементами, у яких враховано момент інерції перерізу з шістьох накладок ( $I = 44718,32 \text{ см}^4$ ), які знаходяться на відстані відповідно до рис. 3.

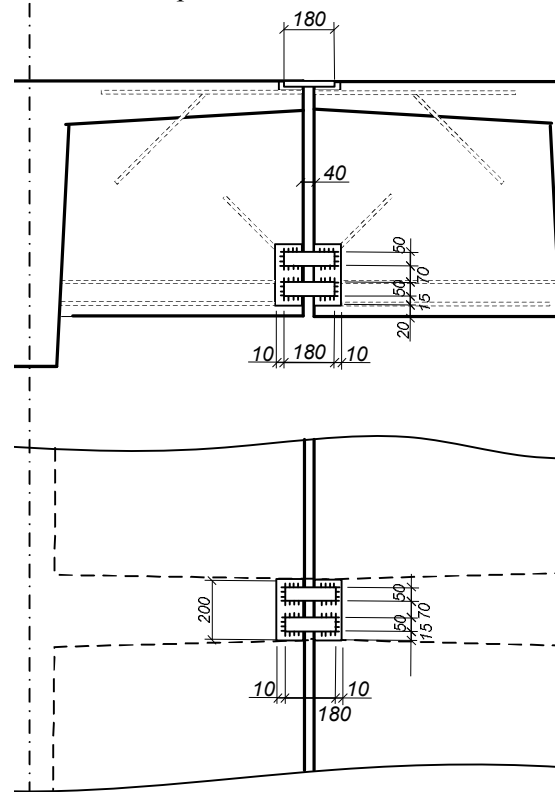


Рис. 3. Схема поєднання діафрагмових прогонових будов металевими накладками

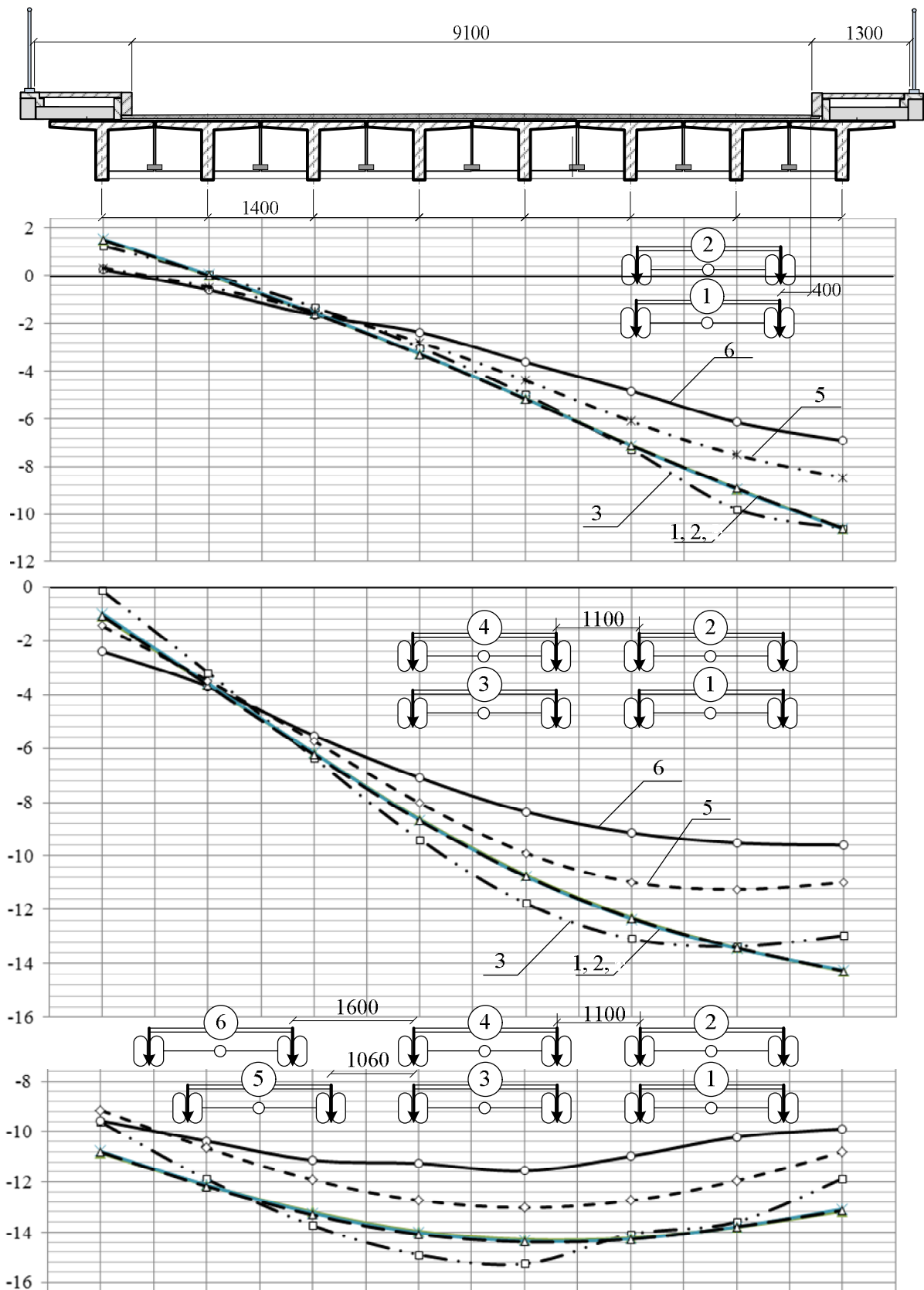


Рис. 4. Лінії прогинів від трьох схем завантаження (лінія 1 – прогини скінченно-елементної моделі 1; лінія 2 – прогини скінченно-елементної моделі 2; лінія 3 – прогини скінченно-елементної моделі 3; лінія 4 – прогини скінченно-елементної моделі 4; лінія 5 – прогини скінченно-елементної моделі 5; лінія 6 – експериментальні прогини)

П'ята модель відрізняється від третьої та четвертої такими уточненнями:

– модуль деформації для стрижнів, що моделюють головні балки, змінено  $E_{гб} = 5163000 \text{ т/м}^2$  (врахована вся поздовжня арматура балки);

– товщина пластинчастих елементів, які моделюють плиту, прийнята з урахуванням шарів покриття проїзної частини та становить 40 см, модуль деформації з урахуванням арматури та шарів покриття  $E_{пл} = 990000 \text{ т/м}^2$ ;

– у шві між балками, окрім стрижневих елементів, додано пластини, що моделюють шари покриття між балками, пластинчасті елементи, мають товщину 30 см та модуль деформації асфальтобетону  $32\,000 \text{ т/м}^2$ . Накладки між балками змодельовані стрижнями таврового перерізу за аналогією зі схемою 3.

Результати розрахунку п'ятох моделей та натурального випробування наведено на рис. 4 у вигляді ліній прогинів головних балок у середині прольоту від трьох схем завантаження.

### Висновки

Аналіз ліній прогинів дозволяє зробити висновок, що до еталонних значень найбільш близькими є прогини п'ятої моделі. Ця модель враховує всі конструктивні особливості ребристих діафрагмових прогонових будов, зручна з точки зору моделювання рухомого навантаження та не потребує додаткових розрахунків для чисельного завдання стрижневих елементів, які моделюють металеві накладки між діафрагмами. Крім того, ця модель дозволяє врахувати шари покриття проїзної частини та їх вплив на сумісну роботу балок прогонової будови.

### Література

1. Ehab Ellobody Finite Element Analysis and Design of Steel and Steel–Concrete Composite Bridges: 1st Edition. Butterworth-Heinemann. 19th June 2014. 682 p.
2. Adnan Jukic, Kristoffer Ekfeldt Concrete Bridge Design with FEM Sweden, Gothenburg: Chalmers University of Technology. 2012. 191 p.
3. Schlune H., Plos M. Bridge Assessment and Maintenance based on Finite Element Structural Models and Field Measurements Sweden, Gothenburg: Chalmers University of Technology. 2008. 90 p.
4. Innovative Bridge Design Handbook (Construction, Rehabilitation and Maintenance) / Editors: Alessio Pipinato. Butterworth-Heinemann. 2015. 878 p.

5. Mina Pezeshpour, Lian Duan, Paul Chang Structural modeling and analysis (Chapter 4): BRIDGE DESIGN PRACTICE (4-th Edition) / State of California Department of Transportation. 2015. P. 4–1 – 4–52
6. Кожушко В. П., Лононенко Е. Е. О распределительной способности железобетонных пролетных строений, выполненных по типовому проекту ВТП-16. Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Харьков, 2009. Вып. 44. С. 127–131.
7. Кожушко В. П., Кислов А. Г., Лозицкий А. С., Краснов С. Н., Синьковская Е. В. Работа пролетного строения реального сооружения. Научный вестник строительства. ХНТУБА. Харьков, 2016. Т. 86, № 4 С. 117–121.
8. Абделаль Ясер, Эль Хасан Исследование напряженного состояния продольного стыка сопряжения старых и новых элементов. Коммунальное хозяйство городов. Харьков, 2000. Вып. 25. С. 124–132.
9. Краснов С. М., Бережна К. В., Краснова К. С. Створення адекватної моделі для розрахунків залізобетонних прогонових будов з використанням ПК «ЛІРА». Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. Дніпропетровськ, 2010. Вип. 33. С. 138–143.
10. Бережная Е. В., Краснов С. Н., Краснова Е. С. Применение ПК «Лири» при расчетах ребристых пролетных строений мостов: материалы Всеукраинского научно-технического семинара молодых ученых и аспирантов. Харьков, 2008. С. 137–139.
11. Кожушко В. П., Краснов С. Н. Работа пролетного строения широкого городского моста. Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Харьков, 2017. Вып. 77. С. 51–57.

### References

1. Ehab Ellobody Finite Element Analysis and Design of Steel and Steel–Concrete Composite Bridges: 1st Edition. Butterworth-Heinemann, 19th June 2014, 682 p.
2. Adnan Jukic, Kristoffer Ekfeldt Concrete Bridge Design with FEM Sweden, Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2012. 191 p.
3. Schlune H., Plos M. Bridge Assessment and Maintenance based on Finite Element Structural Models and Field Measurements Sweden, Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2008. 90 p.
4. Innovative Bridge Design Handbook (Construction, Rehabilitation and Maintenance) / Editors: Alessio Pipinato. Butterworth-Heinemann, 2015. 878 p.
5. Mina Pezeshpour, Lian Duan, Paul Chang Structural modeling and analysis (Chapter 4): BRIDGE DESIGN PRACTICE (4-th Edition) / State of California Department of Transportation, 2015. P. 4–1 – 4–52

6. Kozhushko V. P., Lonovenko E. E. O raspredelitel'noj sposobnosti zhelezobetonnyh proletnyh stroenij, vypolnennyh po tipovomu proektu VTP-16. Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta. Har'kov, 2009. Vyp. 44. S. 127–131. [in Russian]
7. Kozhushko V. P., Kislov A. G., Lozickij A. S., Krasnov S. N., Sin'kovskaya E. V. Rabota proletnogo stroeniya real'nogo sooruzheniya. Naukovij visnik budivnictva. HNTUBA. Har'kov, 2016. T. 86, № 4 S. 117–121. [in Russian]
8. Abdelal' Yaser, Ehl' Hasan Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya prodol'nogo styka sopryazheniya staryh i novyh ehlementov. Kommunal'noe hozyajstvo gorodov. Har'kov, 2000. Vyp. 25. S. 124–132. [in Russian]
9. Krasnov S. M., Berezhna K. V., Krasnova K. S. Stvorennaya adekvatnoi modeli dlya rozrahunkiv zalizobetonnih progonovih budov z vikoristannyam PK «LIRA». Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu imeni akademika V. Lazaryana. Dnipropetrovs'k, 2010. Vip. 33. S. 138–143. [in Ukrainian]
10. Berezhnaya E. V., Krasnov S. N., Krasnova E. S. Primenenie PK «LIRA» pri raschetah rebristyh proletnyh stroenij mostov: Materialy Vseukrainskogo nauchno-tehnicheskogo seminaru molodyh uchenih i aspirantov. Har'kov, 2008. S. 137–139. [in Russian]
11. Kozhushko V. P., Krasnov S. N. Rabota proletnogo stroeniya shirokogo gorodskogo mosta. Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta. Har'kov, 2017. Vyp. 77. S. 51–57. [in Russian]

**Бережна Катерина Вікторівна** к.т.н., доцент, доцент кафедри мостів, конструкцій та будівельної механіки, тел. +38 057-707-37-22, e-mail: berezna@gmail.com,

**Краснов Сергій Миколайович** к.т.н., доцент кафедри мостів, конструкцій та будівельної механіки, тел. +38 057-707-37-22, e-mail: krasnov56@ukr.net.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, 61002, вул. Я. Мудрого, 25.

### Considering the joint operation of beams in finite element models of diaphragm superstructures

**Abstract. Problem.** One of the tasks of examining bridges and overpasses is to determine the bearing capacity of structures and evaluate the real joint operation of all structural elements. Ribbed precast reinforced concrete spans are the most common in Ukraine. Consequently, the calculations of such structures are performed very often, and the development of a convenient and real model of such spans is relevant. **Goal.** In prefabricated diaphragm spans, the joining between the beams is most often performed with steel plates. Therefore, the real joint work between the beams is determined by the stiff-

ness and presence of the plates, as well as the thickness of the asphalt concrete pavement on the bridge, which also affects the joint work. The tasks of the paper are as follows: analysis of the models of diaphragm superstructure with and without taking into account the plates, identifying options for setting the stiffness of elements modeling the plates, comparing the obtained results with the data of full-scale testing of a similar superstructure. **Results.** Analysis of the deflection lines makes it possible to choose the model whose deflections are the closest to the experimental ones for further calculations. This model considers all the design features of ribbed diaphragm superstructures, which is convenient in terms of modeling moving load and does not require additional calculations for the numerical problem of core elements that simulate metal plate between the diaphragms. In addition, this model allows to take into account the layers of asphalt concrete pavement of the roadway and their influence on the joint work of the superstructure beams. **Practical value.** The selected model allows to take into account the state and the presence of all metal plates between the diaphragms, which will make possible to analyze the real work of the diaphragm span and to determine its bearing capacity.

**Keywords:** ribbed precast reinforced concrete spans, diaphragm, finite element models, steel plates, reduced stiffness, deflection lines.

**Berezhna Katerina** Ph. D., associate professor, associate professor of Department of Bridges, Constructions and Building Mechanics, tel. +38 057-707-37-22, e-mail: berezna@gmail.com,

**Krasnov Sergey** Ph. D., associate professor of Department of Bridges, Constructions and Building Mechanics, tel. +38 057-707-37-22, e-mail: krasnov56@ukr.net.

Kharkiv National Automobile and Highway University, 61002, Ukraine, Kharkiv, Yaroslava Mudrogo st, 25.

### Учет совместной работы балок в конечно-элементных моделях диафрагменных пролетных строений

**Аннотация.** Одной из задач обследования мостов и путепроводов является определение несущей способности конструкций и оценка реальной совместной работы всех конструктивных элементов. Ребристые сборные железобетонные пролетные строения являются наиболее распространенными на территории Украины. Следовательно, расчеты таких конструкций выполняются очень часто, и разработка удобной и реальной модели таких пролетных строений является актуальной. В сборных диафрагменных пролетных строениях объединение между балками чаще всего выполнено стальными накладками. Поэтому реальная совместная работа между балками определяется жесткостью и наличием накладок, а также толщиной асфальтобетонного покрытия на мосту, которое также влияет на сов-

местную работу. Задачи работы: анализ моделей диафрагменного пролетного строения без учета накладок и с ними; определение вариантов задания жесткости элементов, моделирующих накладки; сравнение полученных результатов с данными натурного испытания аналогичного пролетного строения.

Анализ линий прогибов дает возможность выбрать для дальнейших расчетов модель, прогибы которой наиболее близки к экспериментальным. Эта модель учитывает все конструктивные особенности ребристых диафрагменных пролетных строений, удобная с точки зрения моделирования подвижной нагрузки и не требует дополнительных расчетов для численной задачи стержневых элементов, моделирующих металлические накладки между диафрагмами. Кроме того, эта модель позволяет учесть слои асфальтобетонного покрытия проезжей части и их влияние на совместную работу балок пролетного строения. Выбранная модель позволяет учиты-

вать состояние и наличие всех металлических накладок между диафрагмами, что позволит проанализировать реальную работу диафрагменного пролетного строения и определить его несущую способность.

**Ключевые слова:** ребристые пролетные строения, диафрагмы, конечно-элементная модель, закладные детали, металлические накладки, приведенная жесткость, линии прогибов.

**Бережная Екатерина Викторовна** к.т.н., доцент, доцент кафедры мостов, конструкций и строительной механики, тел. +38 057-707-37-22 e-mail: beregna@gmail.com,

**Краснов Сергей Николаевич** к.т.н., доцент кафедры мостов, конструкций и строительной механики, тел. +38 057-707-37-22, e-mail: krasnov56@ukr.net.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина, г. Харьков, 61002, ул. Ярослава Мудрого, 25.

---