

УДК 624.21

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.173.2017.118301>

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПРОГОНОВИХ БУДОВ ПРИ РЕКОНСТРУКЦІЇ АВТОДОРОЖНЬОГО ШЛЯХОПРОВОДУ

Кандидати техн. наук О. В. Лобяк, Є. Ф. Орел, магістрант В. А. Сандул

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ АВТОДОРОЖНОГО ПУТЕПРОВОДА

Кандидаты техн. наук А. В. Лобяк, Е. Ф. Орел, магистрант В. А. Сандул

## SIMULATION OF BRIDGE SPAN BEHAVIOR DURING THE RECONSTRUCTION OF HIGHWAY OVERCROSSING

Candidate of techn. sciences A. Lobiak, Y. Orel, master student V. Sandul

*Удосконалено методику комп'ютерного моделювання роботи балкової прогонової будови шляхопроводу при реконструкції за схемою прибудови залізобетонної накладної плити. Методика використовує кроково-ітераційний алгоритм за участю аналітичних залежностей і скінченно-елементного моделювання. Розрахунки передбачають послідовне зведення споруди за трьома стадіями з урахуванням нелінійних залежностей деформування бетону і повзучості, а також аеродинамічного впливу від високошвидкісного поїзда. Облік повзучості бетону оснований на використанні узагальненої кінетичної кривої деформування.*

**Ключові слова:** *накладна плита, прогонова будова, аеродинамічний вплив, стадії зведення, скінченні елементи, повзучість.*

*Проведено развитие методики компьютерного моделирования работы балочного пролетного строения путепровода при реконструкции по схеме устройства железобетонной накладной плиты. Методика использует шагово-итерационный алгоритм с участием аналитических зависимостей и конечно-элементного моделирования. Расчеты предусматривают последовательное возведение сооружения по трем стадиям с учетом нелинейных зависимостей деформирования бетона и ползучести, а также учет аэродинамического влияния от высокоскоростного поезда. Учет ползучести бетона основан на использовании обобщенной кинетической кривой длительного деформирования.*

**Ключевые слова:** *накладная плита, пролетное строение, аэродинамическое воздействие, стадии возведения, конечные элементы, ползучесть.*

*Improvement of the computer simulation method of the work of the beam span structure of the overpass bridge during reconstruction according to the scheme of the device of the reinforced concrete slab was carried out. The method uses a step-iterative algorithm with analytic dependencies and finite-element simulation. The calculations include the sequential construction of the facility in three stages, taking into account the nonlinear dependencies of concrete deformation and creep, and aerodynamic effects of the high-speed train. The creep of concrete is based on the use of a generalized kinetic curve of long-term deformation. The aerodynamic load from the high-speed train to the beam span of the overpass, located in close to the railroad, is presented as a running wave with changing positive and negative pressure, centered near the head and tail of the train. The intensity of the impact depends on the speed and the aerodynamic shape of the train, the shape of the structure, the distance between the train and the structure and its location to the train.*

*Modeling of concrete behavior is performed using exponential diagrams. To obtaining an accurate simulation model, taking into account initial damages, a reduction of the concrete class was changed according to the data of the non-destructive strength test with the simultaneous exclusion of the stretched concrete behavior. The obtained finite element model and modeling method of beam span structures made possible to obtain the true bearing capacity of the bridge during reconstruction, and assign a rational reinforcement structure for the loads NK-80 and A-11. The proposed technical activities could be used in the design of engineering structures of the Ukrainian road network, including the case of the aerodynamic effect of the high-speed train.*

**Keywords:** slip plate, superstructure, modeling, stage construction, finite element, creep.

**Вступ.** За даними Державного агентства автомобільних доріг України, загальна протяжність мережі автошляхів України більш ніж 172 тис. км. Крім того, у перспективі очікується як активне будівництво нових, так і реконструкція існуючих автомобільних доріг для можливості пропуску транспортних потоків з усе більшою інтенсивністю, а це призведе до збільшення навантаження на штучні споруди дорожньої мережі, до яких належать автодорожні шляхопроводи. Одночасно відбувається постійна переробка норм і збільшення нормативних навантажень, що зрештою потребує підсилення прогонових будов. Крім того, у мостових конструкціях що експлуатуються постійно, виникають різні дефекти та пошкодження, пов'язані як з впливом зовнішнього середовища, так і з фізичним зносом.

Так само потреба в збільшенні швидкості на всіх видах транспорту для прискорення перевезень пасажирів і вантажів визначається вимогами підвищення ефективності суспільного виробництва та продуктивності праці. У цьому розумінні при експлуатації шляхопроводів через високошвидкісну залізницю важливим питанням при проектуванні є адекватне врахування аеродинамічного впливу на конструкції, розташовані в безпосередній близькості від залізничної колії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Нині на дорогах України більш ніж 90 % мостів мають конструкцію прогонових будов, виконану із

застосуванням залізобетонних балок довжиною до 24 м. Переважна більшість з них не відповідає експлуатаційним вимогам, споживчим властивостям і потребам сучасного транспорту згідно з державними нормами [1], зокрема за вантажопідйомністю, габаритом мостового полотна, безпекою та комфортністю руху.

Існує кілька способів збільшення несучої здатності залізобетонних прогонових будов мостів та шляхопроводів при реконструкції [2]: прибудова накладної плити з монолітного залізобетону з утворенням температурно-нерозрізної схеми прогонових будов; нарощування перерізу нижньої розтягнутої арматури; прибудова шпренгельної системи із сталевих профілів; прибудова системи з композитних матеріалів.

Найбільш поширеним способом підсилення прогонових будов є застосування монолітної залізобетонної плити, включеної до спільної роботи з наявними балками. Ефект у цьому випадку досягається за рахунок збільшення робочої висоти перерізу, а отже, підвищення граничних зусиль. Для збільшення раціональності накладної плити прогони, на яких вона влаштовується, необхідно перетворити з розрізної схеми в нерозрізну систему. Це рішення призводить до зменшення додатних згинальних моментів у середній частині прогонів, а від'ємні моменти, що виникають у приопорних зонах накладної плити, можуть бути сприйняті додатковою арматурою. Також при влаштуванні нерозрізних систем вдається позбутися труднощів при експлуатації деформаційних швів.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Набутий досвід у питанні посилення мостів за схемою накладної плити свідчить, що числова оцінка ефекту збільшення несучої здатності прогонової будови буде залежати від прийнятих технологічних схем ремонту та поточного технічного стану конструкції [3]. Як продовження цих досліджень передбачається, що накладна плита при реконструкції шляхопроводів сприймає другу частину постійних навантажень і тимчасові навантаження, а розрахунок прогонової будови повинен виконуватися в нелінійній постановці з урахуванням послідовності зведення споруди. При цьому на кожному етапі монтажу розрахунок

повинен виконуватися для відповідної конструктивної схеми прогонової будови, що містить змонтовані до цієї стадії елементи [4]. Актуальним розвитком цього напрямку є наше дослідження, що включає в розрахунок прогонових будов шляхопроводу, розташованих в безпосередній близькості від залізничної колії, також аеродинамічний вплив від високошвидкісного поїзда.

**Основна частина дослідження.** Відповідно до прийнятих передумов пропонується методика розрахунку балкових прогонових будов з накладною плитою, яка враховує три стадії монтажу споруди (рис. 1).

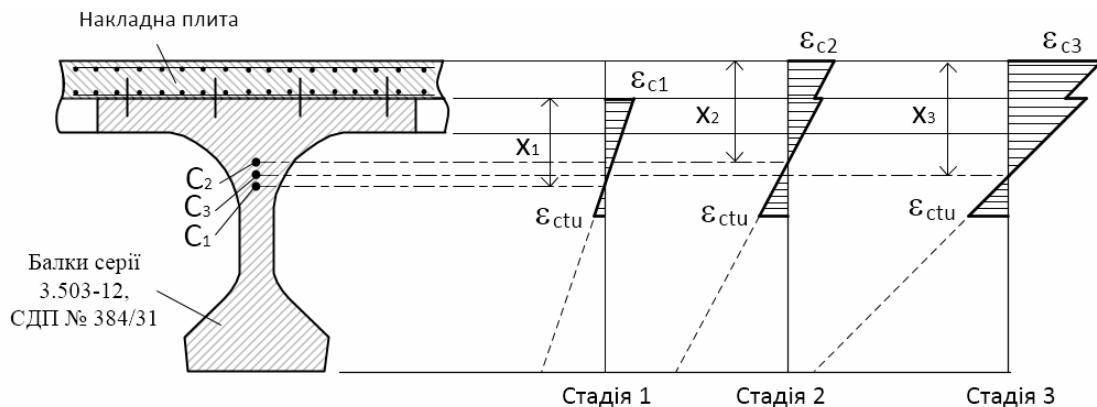


Рис. 1. Стадії роботи прогонової будови при реконструкції за схемою прибудови накладної плити

Перша стадія розрахунку передбачає навантаження наявних елементів прогонової будови першою частиною постійних навантажень: власною вагою, попереднім натягом, вагою накладної плити. На другій стадії в роботу включається накладна плита, переріз сприймає додаткові навантаження від ваги дорожнього одягу, тротуарних блоків, захисного шару та огорож. Третя стадія передбачає поєднання постійних і тимчасових навантажень. Оцінювання несучої здатності в запропонованій постановці ведеться окремо для наявних елементів прогонової будови та елементів

підсилення з урахуванням перерозподілу зусиль між елементами перерізу, нелінійної залежності деформування бетону і повзучості.

Сучасне проектування транспортних споруд припускає застосування програмних комплексів як основного інструменту комп'ютерного моделювання [5, 6]. Запропонована методика повною мірою реалізується засобами програмного комплексу «Ліра-САПР» [7, 8]. Велика бібліотека скінченних елементів (СЕ), підтримка нелінійних законів роботи матеріалів і потужні інструменти аналізу

забезпечують необхідну функціональність при числовому аналізі конструкцій з монолітного залізобетону.

Аеродинамічний вплив від високошвидкісного поїзда на прогонову будову шляхопроводу (рис. 2), розташовану в безпосередній близькості від залізничної колії, можна подати у вигляді рухомої хвилі зі змінним додатним та від'ємним тиском негативного впливу, зосередженим

поблизу голови і хвоста поїзда. При цьому інтенсивність впливу буде залежати від швидкості поїзда, аеродинамічної форми поїзда, форми конструкції, відстані між поїздом і конструкцією та її розташування відносно поїзда. Ці дії можуть бути замінені еквівалентними навантаженнями  $q_c$ , які слід використовувати при розрахунках зазначених конструкцій за першою і другою групами граничних станів.

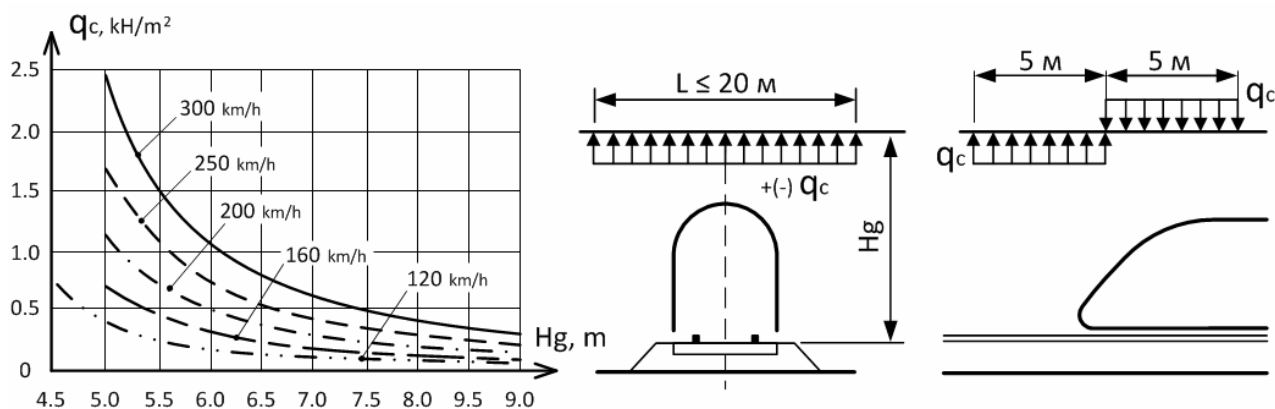


Рис. 2. Величина аеродинамічного впливу для горизонтальних поверхонь вище рейкової колії

Численні експериментальні дослідження свідчать, що в конструкціях із застосуванням бетону, які перебувають під тривалою дією навантажень, виникають пружно-пластичні деформації, які в кілька разів можуть перевищувати початкові, умовно пружні деформації. Найбільш гострою проблема повзучості є для транспортних споруд із сталевих та залізобетонних. У зв'язку з цим питання прогнозування тривалого деформування прогонових будов і синхронного перерозподілу зусиль залишаються актуальними. В основу національних будівельних норм України, гармонізованих з Eurocode 2, покладений феноменологічний підхід, який базується на даних експериментів і встановлює залежність між деформаціями і часом через коефіцієнт повзучості  $\varphi(t, t_0)$ . Відповідно

до цієї методики граничні деформації повзучості визначаються коефіцієнтом, що залежить від середньої міцності бетону, його віку та відносної вологості, а розвиток повзучості в часі  $t$  залежить від відносної вологості і розмірів перерізу.

$$\varepsilon_{c,t} = \sigma_c / E_c [1 + \varphi_0 \beta(t, t_0)], \quad (1)$$

де  $\beta(t, t_0)$  – коефіцієнт, що описує розвиток повзучості в часі;

$t_0$  – вік бетону на момент першого завантаження.

При врахуванні повзучості також може розглядатися методика, основана на колоїдно-хімічному поданні механізму тривалого деформування, що містить алгоритм управління повзучістю через структурні характеристики бетону [9].

Прикладом запропонованого багато-стадійного моделювання слугить розрахунок автодорожнього шляхопроводу довжиною 58,6 м (рис. 3). Шляхопровід має габарит Г-11.7+0,82+0,81 м, побудований за

балковою розрізною бездіафрагменною схемою 3×18 м.

Відстань між внутрішніми гранями поруччя становить 13,77 м, шляхопровід складається з проїзної частини шириною 11,7 м (рис. 4).

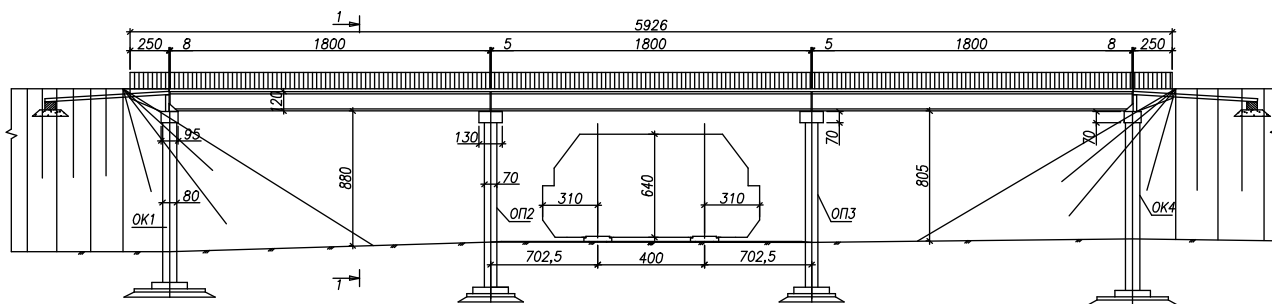


Рис. 3. Схема автодорожнього шляхопроводу

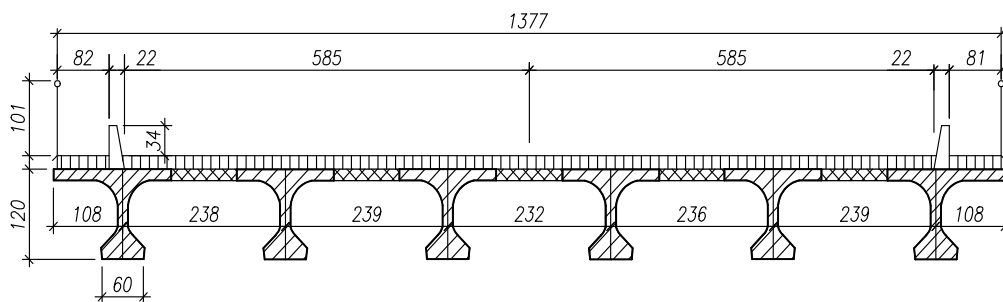


Рис. 4. Переріз 1-1 прогонової будови шляхопроводу

Початково шляхопровід розраховувався для навантаження Н-30 і НК-80, рік будівництва – 1975. У поперечному перерізі прогонової будови складаються із шести двотаврових попередньо напружених залізобетонних балок, виготовлених за типовим проектом серії 3.503-12, СДП № 384/31.

Поперечне об'єднання балок здійснене по монолітних швах. Обпирання балок прогонових будов здійснюється на гумово-металеві опорні частини. Мостове полотно складається з багатошарової конструкції проїзної частини з асфальтобетонним покриттям, парапетного залізобетонного огороження висотою 0,34 м і металевих звареного поручневого огороження висотою 1 м.

На підставі аналізу результатів обстеження шляхопроводу зроблено такі висновки: відсутня відповідність проектних навантажень навантаженням від смуг А11 згідно з діючими будівельними нормами; занижена висота огорожень; несучу здатність додатково знижує наднормативна товщина дорожнього одягу; неприпустиме порушення герметичності деформаційних швів та локальне руйнування захисного шару бетону.

Для відновлення експлуатаційної надійності та довговічності шляхопроводу та приведення його транспортно-експлуатаційних характеристик у відповідність до діючих будівельних норм прийнято рішення щодо реконструкції зі

збереженням наявних балок прогонових будов.

Згідно з прийнятим варіантом реконструкції, ремонт прогонових будов припускає розбирання конструкції мостового полотна до верху плити балок, прибудову залізобетонної монолітної накладної плити, заміну опорних частин, ремонт поверхні балок, улаштування нової конструкції мостового полотна, установлення металевих бар'єрного та поручневого огороження, улаштування елементів водовідводу і дренажу, улаштування деформаційних швів типу «Thorma Joint». У наявних балках прогонових будов проводиться відновлення захисного шару бетону та закладення відколів сумішшю «EMACO S88C» з подальшим нанесенням матеріалу «MASTERSEAL 588».

Накладна плита товщиною 120-245 мм включається до спільної роботи з наявними полицями балок прогонової будови за допомогою анкерів на цементно-епоксидному розчині SikaGrout 311. Технологічно прибудова плити проводиться без попереднього розвантаження прогонових будов.

Розрахункова схема прогонової будови складена з фізично нелінійних СЕ пластин, що моделюють роботу накладної плити, стрижневих СЕ балок, «підвішених» до вузлів плити за допомогою першої групи жорстких вставок, а також другої групи жорстких вставок – для передачі зусиль попереднього натягу арматури балок.

Характеристики СЕ, що визначають роботу залізобетону, складені з урахуванням нелінійних діаграм деформування бетону і сталі. Відомо, що робота бетону у фізично нелінійних задачах описується нелінійним законом, а арматури – діаграмою з фізичною площиною текучості. Однак використання повних діаграм у ПК «Ліра-САПР» не реалізовано – виключена можливість застосування спадної частини діаграми деформування бетону та фізичної текучості сталі. Також не реалізована можливість прямого впливу на характеристики елементів, що мають

початкові ушкодження. Моделювання роботи матеріалів можливе тільки за допомогою експонентних діаграм, використання яких визначає роботу неушкоджених матеріалів на першому відрізку повних діаграм деформування [10]. У зв'язку з цим для формування більш точної моделі з урахуванням початкових ушкоджень виконувалося зниження класу бетону із одночасним усуненням його з роботи на розтягання.

Тимчасові навантаження прийняті за схемами А-11 і НК-80. Результати розрахунків для сполучень навантажень (РСН), що враховують аеродинамічний вплив, подано у вигляді ліній зусиль (моментів) для різного положення смуг навантаження А11 у поперечному напрямку проїзної частини: для крайнього положення (РСН 1) із прив'язкою 1,5 м від бордюру до осі візка крайньої смуги; проміжного положення (РСН 2) із прив'язкою 1,8 м від бордюру до осі візка крайньої смуги; центрального положення (РСН 3) з прив'язкою 2,1 м від бордюру до осі візка крайньої смуги (рис. 5).

Закон зміни напружень по висоті на останній стадії навантаження визначає частку згинального моменту, яку сприймає накладна плита. Згинальний момент згину, який сприймають балки, визначається різницею повного моменту і моменту, що припадає на накладну плиту.

Як показують розрахунки, моделювання послідовності монтажу прогонової будови приводить до зменшення впливу накладної плити на несучу здатність споруди після реконструкції. Частка повного згинального моменту, що виникає від усіх постійних навантажень і сприймається накладною плитою, складає 3 %, те саме від навантаження за схемою А-11 (з урахуванням пішоходів) – 14 %, для навантаження НК-80 – 11 %.

Результати розрахунків також визначені у вигляді мозаїки підбраної площі арматури (рис. 6). У результаті найбільша площа арматур досягає 20,1 см<sup>2</sup>, що відповідає сітці Ø16 крок 100 класу А400С2.

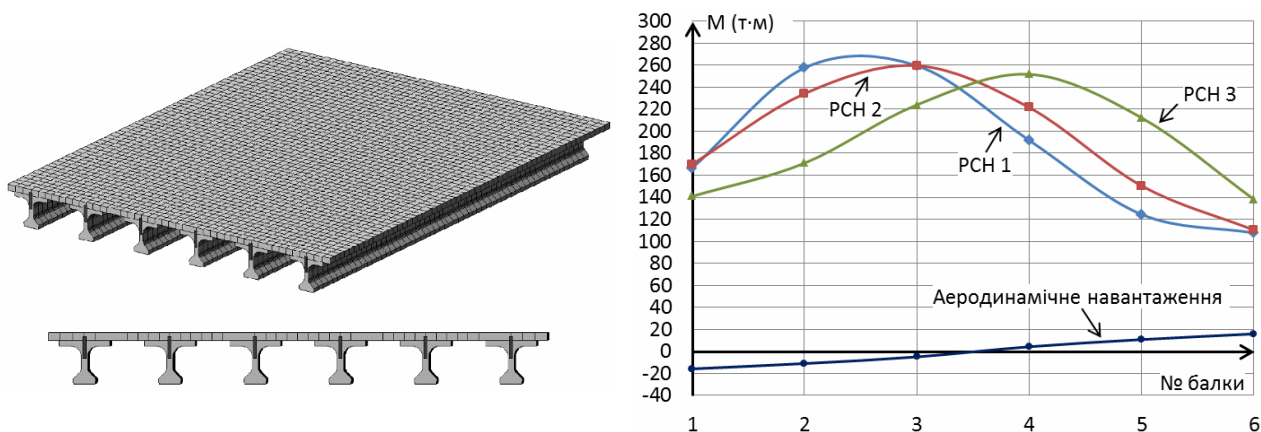


Рис. 5. Скінченно-елементна модель прогонової будови та лінії зусиль у балках

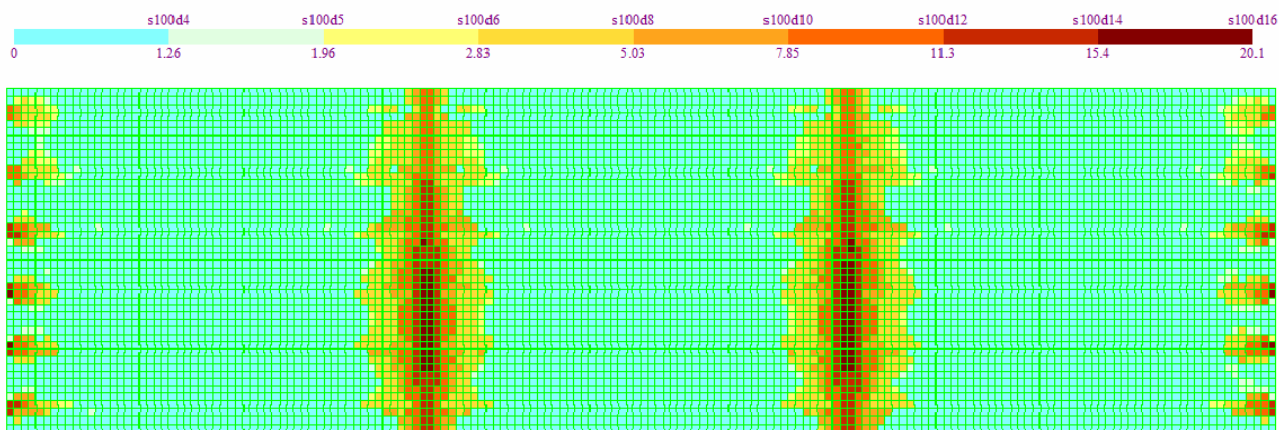


Рис. 6. Повздовжня арматура біля верхньої грані накладної плити

**Висновки.** Розроблена скінченно-елементна модель і на її основі методика моделювання балкових прогонових будов дали змогу встановити справжню несучу здатність моста при реконструкції та призначити раціональну конструкцію підсилення для відповідності

навантаженням НК-80 та А-11. Запропоновані технічні заходи можуть бути запроваджені для використання при проектуванні штучних споруд дорожньої мережі України та зокрема у випадку врахування аеродинамічного впливу від високошвидкісного поїзда.

### Список використаних джерел

1. ДБН В.2.3-22:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://dbn.at.ua/load/normativy/dbn/dbn\\_v\\_2\\_3\\_22\\_2009/1-1-0-345](http://dbn.at.ua/load/normativy/dbn/dbn_v_2_3_22_2009/1-1-0-345).
2. Мости: конструкції та надійність: довідник [Текст] / Й. Й. Лучко, П. М. Коваль, М. М. Корнієв [та ін.]; за ред. В. В. Панасюка і Й. Й. Лучка; Нац. академія наук України. Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка. – Львів: Каменяр, 2005. – 989 с.

3. Експлуатація і реконструкція мостів [Текст] / Н. Е. Страхова, В. О. Голубев, П. М. Ковальов, В. В. Тодиріка. – К.: Транспортна академія України, 2002. – 403 с.
4. Лобяк, А. В. Уточненняя методика моделювання пролетних строений мостов при усилении накладной железобетонной плитой [Текст] / А. В. Лобяк, В. В. Сердюк // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 138. – С. 244-251.
5. Ramyasri. N and Rangarao.V, Study On Behaviour of Prestressed Concrete Bridge with & Without Soil Interaction. International Journal of Civil Engineering and Technology, 8(1), 2017. – P. 456-463.
6. Ramya. T and K. Shyam Chamberlin, Soil Interaction Studies on Prestressed Concrete Bridge Using Finite Element Method. International Journal of Civil Engineering and Technology, 8(1), 2017. – P. 639-645.
7. Программный комплекс ЛИРА-САПР 2013 [Текст]: учеб. пособие / Д.А. Городецкий, М. С. Барабаш, Р. Ю. Водопьянов [и др.]; под ред. акад. РААСН А. С. Городецкого. – М., 2013. – 376 с.
8. Барабаш, М. С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства [Текст] / М. С. Барабаш. – К., 2014. – 265 с.
9. Alexey Lobiak, Glib Vatulia, Yevhen Orel. Simulation of performance of circular CFST columns under short-time and long-time load / 6th International Scientific Conference “Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings” (Transbud-2017). MATEC Web of Conferences. Volume 116, 2017, 02036 (2017).
10. Городецкий, А. С. Компьютерные модели конструкций [Текст] / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров. – К.: Факт, 2007. – 394 с.

---

Лобяк Олексій Вікторович, канд. техн. наук, доцент, в.о. завідувача кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-70. E-mail: Lobiak@ukr.net.  
Орел Євген Федорович, канд. техн. наук, доцент кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-59. E-mail: Orel@kart.edu.ua.  
Сандул Валентин Анатолійович, магістрант ІППК (Проект TEMPUS IV) Українського державного університету залізничного транспорту.

Lobiak Alexey, cand. of techn. sciences, Associated Professor, Head of Building Mechanics and Hydraulics Department Ukrainian State Academy of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-70. E-mail: Lobiak@ukr.net.  
Orel Yevhen Fedorovich, cand. of techn. sciences, Associated Professor of Track and Track Facilities Department Ukrainian State Academy of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-67. E-mail: Orel@kart.edu.ua.  
Sandul Valentine, gs of ESIRAT (project TEMPUS IV) Ukrainian State University of Railway Transport.

Стаття прийнята 10.11.2017 р.