

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.072.2.042.3-021.431

С. Д. СИНЧУК*

*Кафедра «Строительная механика и гидравлика», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 70, эл. почта sinchuk.sophia@gmail.com, ORCID 0000-0002-2373-4205

К ВОПРОСУ О РАЦИОНАЛИЗАЦИИ КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Цель. Разработка нового подхода к рационализации комбинированной конструкции с учетом конструктивных, технологических, эксплуатационных и экономических требований. **Методика.** Для достижения поставленной цели используется метод уравнивания изгибающих моментов, основанный на свойствах распорных систем, а именно: в комбинированных балочных конструкциях определяющими по затратам материала являются элементы, испытывающие напряженное состояние в виде сжатия с изгибом; в элементах, работающих на сжатие с изгибом, уменьшение размеров сечения в большей степени определяется уменьшением изгибающего момента; изгибающие моменты возрастают от опоры к середине пролета. **Научная новизна.** На основании проведенных расчетов, используя вышеизложенную методику, составлен алгоритм оптимального проектирования шпренгельной балки под действием постоянной и временной нагрузки. Представленное решение позволяет получить эффективную комбинированную конструкцию с переменным числом стоек, в зависимости от требуемой длины пролета, соответствующую принятому критерию оптимальности. **Практическая значимость.** Использование данного подхода и алгоритма оптимизации, основанного на использовании конструктивных особенностей шпренгельной балки и требующего минимизации возникающих изгибающих моментов, позволит значительно уменьшить трудоемкость подобного расчета, а также подобрать оптимальные значения поперечных сечений для каждого конкретного случая.

Ключевые слова: комбинированная система; шпренгельная балка; изгибающий момент; линия влияния; временная нагрузка; рационализация сечения

Введение

Развитие сети автомобильных и железных дорог Украины, в том числе высокоскоростных, приводит к необходимости строительства или существенной реконструкции пересечений транспортных потоков с пассажирскими. Существующая улично-дорожная сеть, не рассчитана на увеличившиеся транспортные потоки, что обуславливает необходимость создания новых пешеходных переходов, в том числе пешеходных мостов. В качестве одного из элементов пролетных строений пешеходных мостов применяется шпренгельная балка. Вопросы снижения материалоемкости строительства или реконструкции, их сроков реализации, трудо- и энергозатрат напрямую зависят от эффективности предложенных конструктивных решений. Разработано много методов решения задач оптимального проектирования в канонической постановке [1-6]. Вопросами рационализации конструкции комбинированных систем занимались как отечественные, так и зарубежные исследователи [7, 9, 10].

Методика

Построение линий влияния

В качестве комбинированной конструкции рассмотрим шпренгельную балку. Шпренгельная балка состоит из трех элементов: балочного, нижнего пояса шпренгеля и стоек, которые являются связями между нижним поясом и балкой. Для расчета на подвижную нагрузку построим линии влияния изгибающего момента, продольных и поперечных усилий в элементах шпренгельной балки. В данном случае для построения используем условия равновесия. На рис. 1 представлены линии влияния для элементов шпренгельной балки. Указаны обобщенные значения характерных ординат и размеры однозначных участков линий влияния и положения их вершин.

Рассмотрим произвольное сечение j -й панели балки. При грузе справа от сечения z_{ij} запишем функцию для определения изгибающего момента в сечении балки в j -панели.

$$M_{ij} = R_0 \cdot z_{ij} - N_j \cdot h_{ij}, \quad (1) \quad \text{тогда с учетом (2) и (3), получим:}$$

где

$$N_j = H / \cos \alpha_j, \quad (2) \quad M_{ij}(x) = R_0 z_{ij} - H \left[y_{j-1} + \frac{y_j - y_{j-1}}{z_j} (z_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} z_k) \right], \quad (4)$$

$$h_{ij} = \left[y_{j-1} + \frac{y_j - y_{j-1}}{z_j} \right] \cdot (z_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} z_k) \cos \alpha_j. \quad (3) \quad \text{где } R_0 \text{ – линия влияния опорной реакции, } H \text{ –}$$

линия влияния распора.

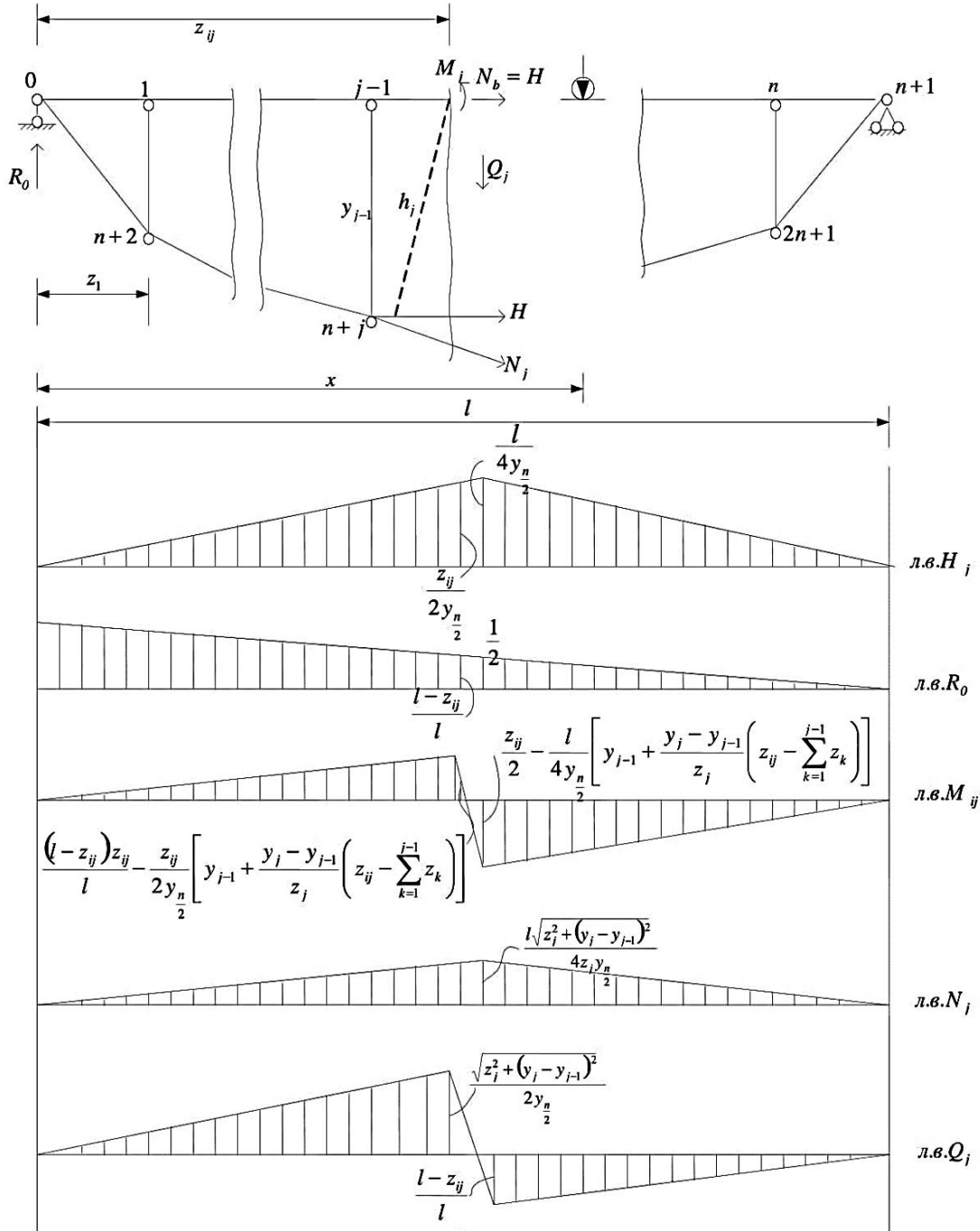


Рис. 1. Линии влияния усилий в шпренгельной балке

Запишем функцию продольной силы в элементе нижнего пояса

$$N_j(x) = \frac{\sqrt{z_j^2 + (y_j - y_{j-1})^2}}{2y_{n/2}} \quad (5)$$

и функцию продольного усилия в стойках шпренгеля

$$\begin{aligned} N_{j,n+j} &= N_j(x) \sin \alpha_j - N_{j-1}(x) \sin \alpha_{j-1} = \\ &= H(x)(tg \alpha_j - tg \alpha_{j-1}), \\ N_{j,n+j}(x) &= H(x) \left(\frac{y_j - y_{j-1}}{z_j} - \frac{y_j - y_{j-1}}{z_{j-1}} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Функция поперечного усилия в балке

$$Q_j = R_a - N_j / \sin \alpha_j. \quad (7)$$

Найдем положение нулевой точки линии влияния изгибающих моментов:

$$u = \frac{a \cdot l / 2 + b z_{ij}}{a + b}. \quad (8)$$

Результаты

Для получения расчетных усилий необходимо загрузить линии влияния невыгодным образом:

- загрузка временной нагрузкой положительного участка линии влияния;
- загрузка временной нагрузкой отрицательного участка линии влияния;
- загрузка временной нагрузкой линии влияния по всей длине.

Рассмотрим первое невыгодное загрузку (рис. 2).

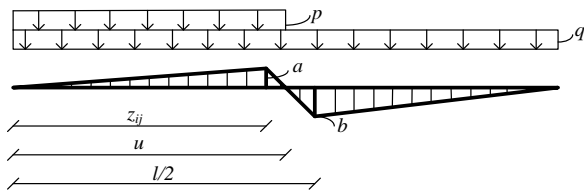


Рис. 2. Схема первого невыгодного загрузку.

Линия влияния M_{ij}

В этом случае изгибающий момент будет равен:

$$M^1 = \frac{q+p}{2} \cdot a \cdot u - \frac{q}{2} \cdot b \cdot (l-u). \quad (9)$$

Определим абсциссу сечения z_{ij}^0 , в котором момент M_{ij} , будет принимать максимальное значение. Из условия максимума

$$\frac{\partial M_{ij}}{\partial z_{ij}} = 0,$$

получим

$$\frac{\partial M_{ij}}{\partial z_{ij}} = \frac{q+p}{2} \left[u \frac{\partial a}{\partial z_{ij}} - (l-u) \frac{\partial b}{\partial z_{ij}} + (a+b) \frac{\partial u}{\partial z_{ij}} \right], \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} \frac{\partial a}{\partial z_{ij}} &= \frac{l - 2z_{ij}}{l} - \\ &- \frac{1}{2y_{n/2}} \left[y_{j-1} + \frac{y_j - y_{j-1}}{z_j} \left(2z_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} z_k \right) \right], \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{\partial b}{\partial z_{ij}} = \frac{1}{2} - \frac{1}{4y_{n/2}} \frac{y_j - y_{j-1}}{z_j}, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial z_{ij}} &= \frac{\left(\frac{1}{2} \frac{\partial a}{\partial z_{ij}} + b + z_{ij} \frac{\partial b}{\partial z_{ij}} \right) (a+b)}{(a+b)^2} - \\ &- \frac{\left(\frac{\partial a}{\partial z_{ij}} + \frac{\partial b}{\partial z_{ij}} \right) \left(a \frac{l}{2} + b z_{ij} \right)}{(a+b)^2} \end{aligned} \quad (13)$$

Для получения наибольшего отрицательного момента смоделируем второе невыгодное загрузку (рис. 3).

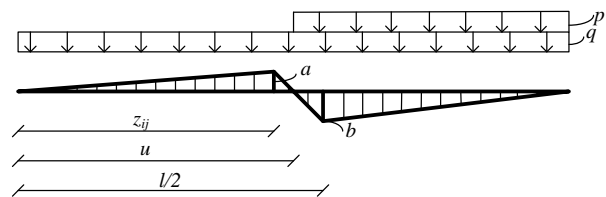


Рис. 3. Схема второго невыгодного загрузку.

Линия влияния M_{ij}

Тогда величина момента будет равна

$$M^2 = \frac{q}{2} \cdot a \cdot u - \frac{q+p}{2} \cdot b \cdot (l-u). \quad (14)$$

Определение наибольших расчетных усилий в стержнях выполним, сочетая усилия от временной и постоянной нагрузок. Если знаки усилий одинаковы, т.е. $signN^p = signN^q$, то $N_{расч} = N^p + N^q$. Если – разные, то рассматривается два сочетания:

$$N_{1расч} = N^q \text{ и } N_{2расч} = N^p + N^q.$$

Из этих сочетаний выбираются расчетные усилия для данного стержня:

1) если $signN_{1расч} = signN_{2расч}$,

то $N_{расч} = \max(N_{1расч}, N_{2расч})$;

2) если $signN_{1расч} \neq signN_{2расч}$,

$|N_{1расч}| > |N_{2расч}|$ то $N_{расч} = N_{1расч}$ (или

наоборот);

3) если $signN_{1расч} \neq signN_{2расч}$ и, допустим,

что $signN_{1расч} = -1$, а $|N_{1расч}| < |N_{2расч}|$, то при оптимизации для стержня рассматриваются два расчетных состояния и то, при котором площадь сечения является большей, и принимается за действительное.

Так как в балке, помимо изгибающих моментов, возникают еще и продольные усилия, равные распуру H в шпренгеле, найдем выражения для них при первом и втором невыгодных загрузениях. Загрузим линию влияния H (рис. 1), учитывая, что $N_b = H$.

Продольное усилие в балке при первом невыгодном загрузении линии влияния:

$$N_{coome}^1 = -\frac{1}{8y_n} (ql^2 + 2pz_{ij}^2). \quad (15)$$

При втором невыгодном загрузении линии влияния:

$$N_{coome}^2 = -\frac{1}{8y_n} (ql^2 + p)(l^2 + 2pz_{ij}^2). \quad (16)$$

Третье невыгодное загрузение служит расчетным состоянием для стержней, образующих шпренгель, а также как одно из альтернативных расчетных состояний самой балки. В этом случае постоянной, и временной подвижными нагрузками загружается вся балка. Тогда наибольший распор в балке равен:

$$\max H = \frac{l^2(q+p)}{8y_n}. \quad (17)$$

Соответственно наибольшее продольное сжимающее усилие:

$$\max N = -\max H = -\frac{l^2(q+p)}{8y_n}. \quad (18)$$

Для балки необходимо еще найти изгибающие моменты при третьем загрузении (рис. 4) или соответствующие N_{max} . Загружаем линию влияния M_{ij} .

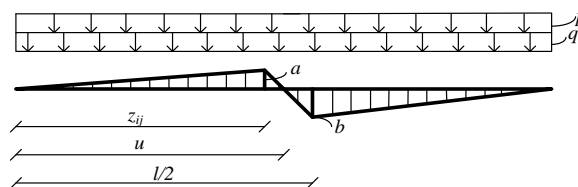


Рис. 4. Схема третьего невыгодного загрузения.
 Линия влияния M_{ij}

Запишем условия максимума для M_{ij}^{coome} :

$$M_{ij}^{coome} = \frac{q+p}{2} \cdot (a \cdot u - b \cdot (l-u)). \quad (19)$$

Когда расчетные усилия выбраны, находятся оптимальные значения топологических переменных по алгоритму, описанному в [8].

Научная новизна и практическая значимость

Определение объема шпренгельной балки

Объем шпренгельной балки определяется как сумма объемов балки, стоек и элементов нижнего пояса шпренгеля:

$$V = V^{(6)} + V^{(cm)} + V^{(u)}. \quad (20)$$

Балка работает на сжатие с изгибом, размер сечения определяется из условия прочности:

$$\frac{|N^{(6)}|}{A^{(6)}} + \frac{M_{max}}{W_z} \leq mR_y, \quad (21)$$

где M_{max} – наибольший из опорных и пролетных изгибающих моментов; $N^{(6)}$ – продольное

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

усилие в балке; mR_y – расчетное сопротивление.

Соответственно объем балки:

$$V^{(6)} = A^{(6)} \cdot l. \quad (22)$$

Элементы нижнего пояса шпренгеля растянуты, поэтому размеры сечений определяются из условия прочности на растяжение:

$$A_j^{(u)} \geq N_j^{(u)} / mR_y. \quad (23)$$

Соответственно объем нижнего пояса шпренгеля равен:

$$V_j = 2 \sum_{j=1}^{n/2-1} A_j \sqrt{z_j^2 + (y_j - y_{j-1})^2} + A_{n/2} z_{n/2}. \quad (24)$$

Стойки сжаты, поэтому размеры сечения определяются из условия устойчивости:

$$A_j^{(c)} \geq N_j^{(c)} / (\varphi \cdot mR_y), \quad (25)$$

где $N_j^{(c)}$ – продольное усилие в элементе.

Из (24) методом последовательных приближений определяются $A_j^{(c)}$ и φ . Следовательно, объем стоек будет равен:

$$V_{j,n+j}^{(c)} = 2 \sum_{j=1}^{n/2} A_j^{(c)} y_j. \quad (26)$$

Выводы

Для шпренгельной балки с n -м количеством стоек были построены линии влияния внутренних усилий. Найдены значения изгибающих моментов по трем видам сочетаний постоянной и временной нагрузки.

Определено значение максимального продольного усилия. Исходя из этих данных, получено значение суммарного объема конструкции, что позволяет выполнить ее оптимизацию с заданным критерием.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ватуля, Г. Л. Некоторые особенности задачи оптимизации шпренгельных балок [Текст] / Г. Л. Ватуля, Ю. П. Китов, М. А. Веревицева, С. Д. Синчук // Сб. научн. тр. УкрГУЖТ. – Харьков, 2016. – Вып. 161. С. 36-47.
2. Ватуля, Г. Л. Расчет и проектирование комбинированных и сталебетонных конструкций

[Текст]: дисс. д-ра техн. наук : 05.23.01 / Ватуля Глеб Леонидович ; – Харьков, 2015. – 430 с.

3. Виноградов, А. И. Проблема оптимального проектирования в строительной механике [Текст] / А. И. Виноградов. – Харьков : Вища школа, 1973. – 168 с.
4. Гоголь, М. В. Проектування і розрахунок комбінованих мостових переходів [Текст] / М. В. Гоголь, М. Р. Більський, І. Д. Пелешко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 2012. – Вып. 3. – С. 33-38.
5. Китов, Ю. П. Влияние параметров проектирования на оптимальность конструкции стальных балок [Текст] / Ю. П. Китов, Г. Л. Ватуля // 36. наукових праць УкрДАЗТ. – Харків, 2011. – Вып. 125. С. 24-33.
6. Китов, Ю. П. Некоторые соображения о критериях оптимальности [Текст] / Ю. П. Китов, Г. Л. Ватуля, М. А. Веревицева // 36. наукових праць УкрДАЗТ. – Харків, 2014. – Вып. 143. С. 124-131.
7. Ключев, С. В. Оптимальное проектирование строительных конструкций на основе эволюционных и генетических алгоритмов [Текст] / С. В. Ключев, А. В. Ключев. – Lambert, 2011. 128 с.
8. Лазарев, И. Б. Математические методы оптимального проектирования конструкций [Текст] / И. Б. Лазарев. – Новосибирск : НИИЖТ, 1974. – 191 с.
9. Лучко, Й. Й. Будова та експлуатація штучних споруд [Текст] / Й. Й. Лучко, О. С. Распопов. – Львів : Каменяр, 2011. – 879 с.
10. Основы расчета и проектирования комбинированных и сталебетонных конструкций [Текст] / Э. Д. Чихладзе, Г. Л. Ватуля, Ю. П. Китов и др.; под ред. Э. Д. Чихладзе. – Киев : Транспорт Украины, 2006. – 136 с.
11. Пелешко, І. Д. Про формулювання задач оптимізації металевих стрижневих конструкцій в системах автоматизованого проектування [Текст] / І. Д. Пелешко, В. В. Юрченко // Теорія і практика будівництва, Вісник НУ “Львівська політехніка” – Львів : НУ “Львівська політехніка”, 2002. № 441. – С. 148-152.
12. Фесик, С. П. Справочник по сопротивлению материалов [Текст] / С. П. Фесик. – Киев : Будівельник, 1982. – 230 с.
13. Dimou, S. K. Reliability-Based Optimal Design of Truss Structures Using Particle Swarm Optimization / S. K. Dimou, V. K. Koumoussis // Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE. – Vol. 2/3 (2009). – pp. 100-109.
14. Farzin Aminifar Optimal Design of Truss Structures via an Augmented Genetic Algorithm / Farzin Aminifar, Farrokh Aminifar, Daryoush Nazarpour // Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences. – Vol. 37(2013). – pp. 56-68.

С. Д. СІНЧУК*

*Кафедра «Будівельна механіка та гідравліка», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 70, ел пошта sinchuk.sophia@gmail.com, ORCID 0000-0002-2373-4205

ДО ПИТАННЯ РАЦІОНАЛІЗАЦІЇ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ

Мета. Розробка нового підходу до раціоналізації комбінованої конструкції, враховуючи конструктивних, технологічних, експлуатаційних та економічних вимог. **Методика.** Для досягнення поставленої мети використовується метод зрівняння згинальних моментів, що базується на властивостях розпірних систем, а саме: в комбінованих балочних конструкціях визначаються по витратах матеріалу елементи, що працюють під дією напруженого стану у вигляді стискання зі згином; в елементах, які працюють на стискання зі згином, зменшення розмірів перерізу значною мірою визначається зменшенням згинального моменту; згинальні моменти збільшуються від опори до середини прогону. **Наукова новизна.** На основі проведених розрахунків, використовуючи вищеописану методику, був розроблений алгоритм оптимального проектування шпренгельної балки під дією постійного та тимчасового навантаження. Представлене рішення дозволяє отримати ефективну комбіновану конструкцію зі змінним числом стійок, залежно від необхідної довжини прогону, що відповідає прийнятому критерію оптимальності. **Практична значимість.** Використання даного підходу та алгоритму оптимізації, який базується на використанні конструктивних особливостей шпренгельної балки та вимагає мінімізації виникаючих згинальних моментів, дозволить значно зменшити трудомісткість подібного розрахунку, а також, підібрати оптимальні значення поперечних перерізів для кожного конкретного випадку.

Ключові слова: комбінована система; шпренгельна балка, згинальний момент, лінія впливу; тимчасове навантаження; раціоналізація перерізу

S. D. SINCHUK*

*Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport, Feieryakh sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 70, e-mail sinchuk.sophia@gmail.com, ORCID 0000-0002-2373-4205

TO QUESTION OF COMBINED SYSTEMS RATIONALIZATION

Purpose. Developing a new approach to the rationalization of the combined structure, taking into account constructive, technological, operational and economic requirements. **Methodology.** The bending moment adjustment method representations to achieve the goal, based on the properties of the thrust-systems, namely: in the combination beam construction cost material defining elements are experiencing stress state of compression with a bend; in cells operating at the bending compression, reducing the size of the cross section largely determined by the decrease of the bending moment; bending moments increase from the support to the middle of the span. **Originality.** On the basis of calculations using the methodology set forth above, the algorithm of optimal design of truss beams under the influence of permanent and temporary load. The present solution allows to obtain an effective design combined with a variable number of racks, depending on the required span length, corresponding to the received optimality criterion. **Practical value.** The use of this approach and the optimization algorithm based on the use of the design features of truss beams and requires minimization of bending moments, will significantly reduce the complexity of the calculation, as well as to find the optimal values of the cross sections for each case.

Keywords: combine structure, truss beam, bending moment, influence line, temporary load and structure rationalization.

REFERENCES

1. Vatulya G. L., Kitov Y. P., Verevicheva M. A., Sinchuk S. D. Neketorie osobennosti zadachy optimizatsii shpengelnykh balok [Some features of the optimization problem truss beams]. *Sbornik nauchnykh trudov Ukrainського gosudarstvennogo zheleznodorozhnogo universiteta – Proc. of Ukrainian State University of Railway Transport*, 2016, issue 161. pp. 36-47.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

2. Vatulya G. L. Raschet i proectirovanie kombinirovannukh i stalebetonnukh konstruksii. Dokt. Diss. [Calculation and Design of Composite and Reinforced Concrete Structures. Doct. Diss.]. Kharkiv, 2015. 430 p.
3. Vinigradov A. I. *Problema optimalnogo proektirovaniya v stroitelnoy makhanike* [The problem of optimal design in structural mechanics]. Kharkiv, Vyshcha shkola Publ., 1973. 168 p.
4. Gogol M. V., Bil'skiy M. R., Peleshko I. D. Proektuvannya i rozrahunok kombinovanykh mostovykh perehodiv [Design and calculation of composite bridges]. *Mosty ta tuneli: tepriya, doslidzhennya, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2012, issue 3, pp. 33-38.
5. Kitov Y. P., Vatulya G. L. Vliyanie parametrtov proektirovaniya na optimalnost konstruksii stalnykh balok [Influence of design parameters on the optimal design of steel beams]. *Sbornik nauchnykh trudov Ukrainskogo gosudarstvennogo zheleznodorozhnogo universiteta – Proc. of Ukrainian State University of Railway Transport*, Kharkiv, 2011, issue 125, pp. 24-33.
6. Kitov Y. P., Vatulya G. L., Verevicheva M. A. Nekotopye soobrazheniya o kriteriyah optimalnosti [Some considerations on optimality criteria]. *Sbornik nauchnykh trudov Ukrainskogo gosudarstvennogo zheleznodorozhnogo universiteta – Proc. of Ukrainian State University of Railway Transport*, Kharkiv, 2014, issue 143, pp. 124-131.
7. Kluev S. V., Kluev A. V. *Opimalnoe proektirovanie stroitelnykh konstruksiy na osnove evolyutsyonnykh i geneticheskikh algoritmov* [Optimal design of building structures on the basis of evolutionary and genetic algorithms]. Lambert, 2011, 128 p.
8. Lazarev I. B. *Matematicheskie metody opimalnogo proektirovaniya konstruksiy* [Mathematical methods of optimal design constructions]. Novosibirsk, NIIZHT Publ., 1974. 191 p.
9. Luchko Y. Y., Raspopov O. S. *Budova ta ekspluatatsiya shtuchnykh sporud* [The structure and operation of engineering structures]. Lviv, Kamenyar Publ., 2011. 879 p.
10. Chikhladze E. D., Vatulya G. L., Kitov Y. P. *Osnovy rascheta proectirovaniya kombinirovannukh i stalebetonnukh konstruksii* [Fundamentals of calculation and design of composite and reinforced concrete structures]. Kyjiv, Transport Ukrainy Publ., 2006. 136 p.
11. Peleshko I. D., Yurchenko V. V. Pro formulyuvannya zadach optimizatsii metalevykh stryzhnevyykh konstruksiy v systemakh avtomatyzovanogo proektuvannya [About the formulation of optimization metal beam structures in computer-aided design]. *Visnyk NU "Lvivska Politekhnikha" – Bulletin of "Lvivska Politekhnikha"*. Lviv, 2002, issue 441, pp. 148-152.
12. Fesyk S. P. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook of resistance of materials]. Kyjiv, Budivelnik Publ., 1982. 230 p.
13. Dimou C. K., Koumousis V. K. Reliability-Based Optimal Design of Truss Structures Using Particle Swarm Optimization. *Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE*. Vol. 2/3 (2009), pp. 100-109.
14. Farzin Aminifar, Farrokh Aminifar, Daryoush Nazarpour Optimal Design of Truss Structures via an Augmented Genetic Algorithm. *Turkish Journal of Engineering&Environmental Sciences*. Vol. 37(2013), pp. 56-68.

Надійшла до редколегії 04.09.2017

Прийнята до друку 11.09.2017