

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

ENGINEERING AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRDROMES, BRIDGES AND TUNNELS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 6. С. 227–241.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (6): 227–241.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.21.014.09.042

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-227-241

EDN: ICKCNM

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТА НЕСУЩИХ БАЛОК ТРУБЧАТОГО СЕЧЕНИЯ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МОСТОВ

Александр Аверьянович Алексеев¹,
Андрей Владимирович Картопольцев²

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия

²ООО «ДИАМОС». г. Томск, Россия

Аннотация. Актуальность. Сталежелезобетонные мосты с несущими балками из металлических труб являются эффективными для малых и средних пролетов. Повышение несущей способности за счет упругопластической работы сечения трубы отражает актуальность их применения в мостостроении.

Цель работы. Используя рациональность формы сечения балок и упругопластическое состояние, дополнить существующую модель расчета сталежелезобетонных сечений на воздействие сложных силовых факторов.

Результаты. Развитие методики расчета сталежелезобетонных комбинированных сечений с балками из металлических труб выявило изменения не только изгибной, но и изгибно-крутильной жесткости таких сечений в пролетных строениях и определило пути их оптимизации.

Ключевые слова: трубчатое сечение, пролетное строение, жесткость, нагрузка, коэффициент поперечной установки

Для цитирования: Алексеев А.А., Картопольцев А.В. Совершенствование расчета несущих балок трубчатого сечения пролетных строений металлических мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 227–241. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-227-241. EDN: ICKCNM

ORIGINAL ARTICLE

IMPROVEMENT OF LOAD-BEARING TUBULAR BEAM SECTION ANALYSIS OF BRIDGE SPANS

Aleksandr A. Alekseev¹, Andrei V. Kartopol'tsev²

¹*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

²*ООО "DIAMOS", Tomsk, Russia*

Abstract. Steel-reinforced concrete bridges with load-bearing tubular beams are effective for small and medium spans. The increased load-bearing capacity due to the elastoplastic operation of the tubular beam section reflects the relevance of their application in the bridge construction.

Purpose: The aim is to improve the section analysis using rational shape of the beam section and elastoplastic state.

Research findings: The improved section analysis of steel concrete tubular beams shows changes not only in bending, but also bending-torsional stiffness of sections in superstructures and identifies ways for their optimization.

Keywords: tubular beam, superstructure, stiffness, load, transverse loading coefficient

For citation: Alekseev A.A., Kartopol'tsev A.V. Improvement of Load-Bearing Tubular Beam Section Analysis of Bridge Spans. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (6): 227–241. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-227-241. EDN: ICKCNM

Известно, что в пространственных металлических конструкциях, какими являются пролетные строения мостов, подверженных воздействию многих сложных силовых факторов (сжатие и растяжение, изгиб и кручение одновременно), эффективными являются несущие трубчатого сечения балки, несущая способность которых определяется не столько количеством, площадью используемого материала, сколько рациональностью конструктивной формы поперечного сечения с точки зрения эффективности профиля, величиной упругости или упруго-пластического момента сопротивления W рассматриваемого элемента [1].

Несущие металлические балки трубчатого сечения зарекомендовали себя оптимально работающими на кручение с коэффициентом формы сечения K_x и K_y и минимальными коэффициентами конструктивных μ_k строительных ψ_c коэффициентов массы и коэффициентами восприимчивости трубчатых сечений к коррозии в 3...3,5 раза меньше, чем из балок открытого профиля поперечного сечения. Снижение эффективности применения несущих балок из труб за счет сравнительно небольшой изгибной жесткости компенсируется совершенствованием расчета и применением сводчатой железобетонной плиты проезжей части, повышающим изгибно-крутильную жесткость объединенного сечения с расчетной схемой, представленной на рис. 1 [2].

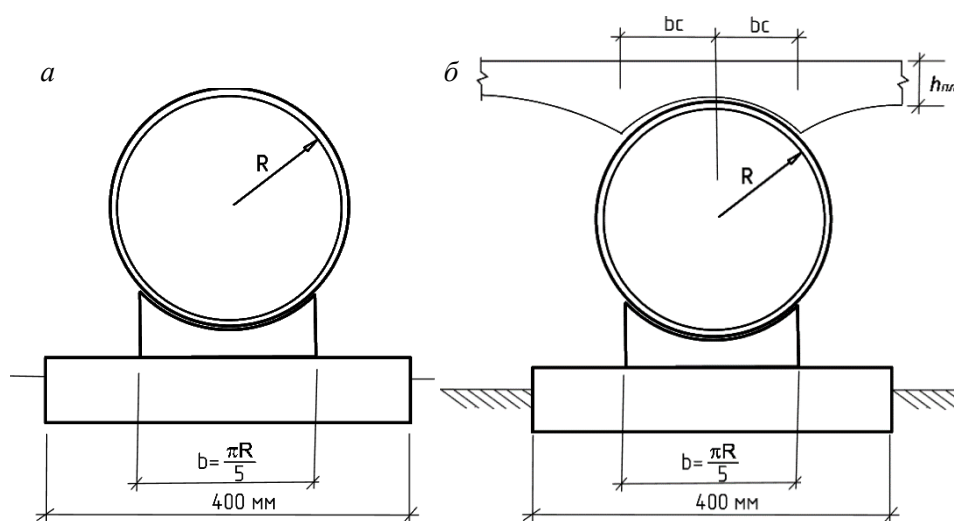


Рис. 1. Модель расчетной схемы объединенного сечения:

a – для стального пролетного строения из труб; *б* – сталежелезобетонного сечения

Fig. 1. Design model of combined section:

a – for steel concrete span; *b* – for steel concrete cross-section

Исходными условиями являются

$$\frac{2bc}{b} \leq 0,617 \frac{b}{h_{пл}} + 0,702,$$

где $2bc$ – отношение расчетной ширины железобетонной плиты проезжей части к количеству труб в сечении моста.

$$\frac{h_b}{l} = \left(\frac{1}{11} \dots \frac{1}{30} \right).$$

Изгибная жесткость балок соответствует изгибающему моменту $M_{и}$, равному

$$M_{и} = \frac{2\pi}{3} \tau_{xy} \cdot a^3 \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_{xy}}{G \cdot \theta \cdot R} \right)^3 \right], \quad (1)$$

где a – редуцирующий коэффициент жесткости трубчатого сечения, который равен

$$a = 12,8 \frac{a^3 \cdot J_{тр}}{L_p^4 \cdot J_{пл}}. \quad (2)$$

Например, для трубы $d = 620$ мм с толщиной стенки $t_s = 10$ мм, пролетом $L_p = 8,4$ м и толщиной плиты $h_{пл} = 120$ мм значение a равно

$$a = 12,8 \frac{0,76^3}{8,4^4} \frac{0,0036^4}{0,003796^4} = 0,0017.$$

Коэффициент жесткости a является основным параметром при определении коэффициента поперечной установки (КПУ) и загрузки линий влияния

по методу В.С. Осипова для наиболее нагруженных в поперечном сечении балок (рис. 2) [3]. Знаменатель при определении реакции в линиях влияния для балок вычисляется по следующей формуле:

$$D = 540 + 48\,312a + 588\,330a^2 + 1\,856\,808a^3 + 205\,202a^4 = 592,37. \quad (3)$$

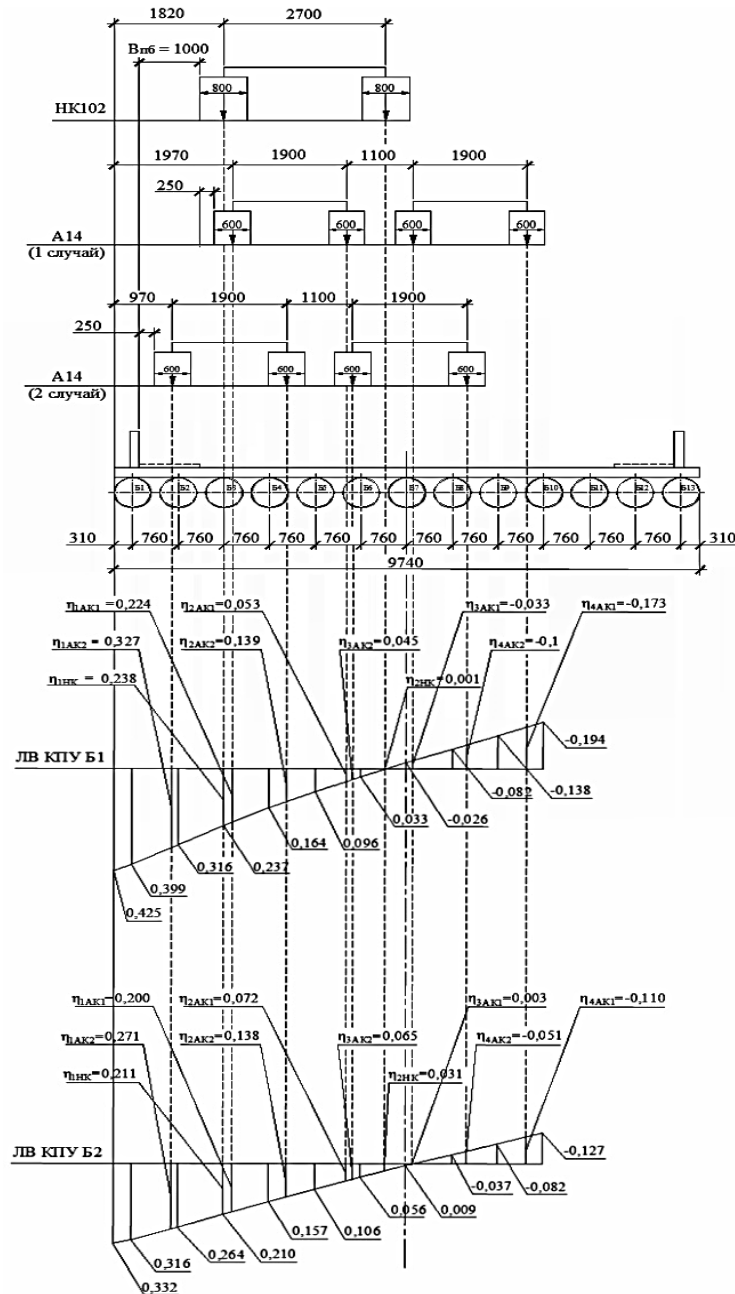


Рис. 2. Линии влияния КПУ методом упругих опор
Fig. 2. Influence of transverse loading coefficient determined by the method of elastic supports

Ординаты линии влияния для крайней главной балки № 1 равны следующим значениям:

$$\begin{aligned}
 R_{00} &= 1 / D \left(204 + 29784a + 450942a^2 + 1597864a^3 + 1886810a^4 \right) = \\
 &= 0,002(204 + 31,869 + 0,516 + 0,002 + 0,000) = 0,399; \\
 R_{01} &= 1 / D \left(168 + 17982a + 189036a^2 + 440683a^3 + 320694a^4 \right) = \\
 &= 0,002(168 + 19,241 + 0,216 + 0,0005 + 0,000) = 0,316; \\
 R_{02} &= 1 / D \left(132 + 8028a + 20316a^2 - 81206a^3 - 132621a^4 \right) = \\
 &= 0,002(132 + 8,59 + 0,024 - 0,0001 - 0,000) = 0,237; \\
 R_{03} &= 1 / D \left(96 + 966a - 41988a^2 - 108971a^3 - 41410a^4 \right) = \\
 &= 0,002(96 + 1,034 - 0,048 - 0,0001 - 0,000) = 0,164; \\
 R_{04} &= 1 / D \left(60 - 2952a - 35706a^2 - 12092a^3 + 18804a^4 \right) = \\
 &= 0,002(60 - 3,159 - 0,041 - 0,00001 + 0,000) = 0,096; \\
 R_{05} &= 1 / D \left(24 - 4050a - 7608a^2 + 23293a^3 + 1770a^4 \right) = \\
 &= 0,002(24 - 4,334 - 0,009 + 0,00003 + 0,0) = 0,033; \\
 R_{06} &= 1 / D \left(-12 - 3012a + 10428a^2 + 3466a^3 - 4717a^4 \right) = \\
 &= 0,002(-12 - 3,223 + 0,012 + 0,000004 - 0,0) = -0,026; \\
 R_{07} &= 1 / D \left(-48 - 666a + 8688a^2 - 9581a^3 + 2592a^4 \right) = \\
 &= 0,002(-48 - 0,713 + 0,01 - 0,00001 + 0,000) = -0,082; \\
 R_{08} &= 0,002 / D \left(-84 + 2232a - 5778a^2 + 3352a^3 - 630a^4 \right) = \\
 &= 0,001(-84 + 2,388 - 0,007 + 0,000004 - 0,000) = -0,138.
 \end{aligned}$$

Ординаты линии влияния для главной балки № 2 равны следующим значениям:

$$\begin{aligned}
 R_{10} &= 1 / D \left(168 + 17982a + 189036a^2 + 440683a^3 + 320694a^4 \right) = \\
 &= 0,002(168 + 19,241 + 0,216 + 0,0005 + 0,000) = 0,316; \\
 R_{11} &= 1 / D \left(141 + 14160a + 204576a^2 + 867556a^3 + 1268879a^4 \right) = \\
 &= 0,002(141 + 15,151 + 0,234 + 0,001 + 0,000) = 0,264; \\
 R_{12} &= 1 / D \left(114 + 9729a + 146376a^2 + 543967a^3 + 562308a^4 \right) = \\
 &= 0,002(114 + 10,410 + 0,168 + 0,0007 + 0,000) = 0,21; \\
 R_{13} &= 1 / D \left(87 + 5562a + 67575a^2 + 108094a^3 - 40914a^4 \right) = \\
 &= 0,002(87 + 5,951 + 0,077 + 0,0001 - 0,000) = 0,157;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_{14} &= 1/D(60 + 2388a + 10986a^2 - 71210a^3 - 77302a^4) = \\
&= 0,002(60 + 2,555 + 0,013 - 0,0001 - 0,000) = 0,106; \\
R_{15} &= 1/D(33 + 414a - 14943a^2 + 52754a^3 + 11496a^4) = \\
&= 0,002(33 + 0,443 - 0,017 - 0,00006 + 0,000) = 0,056; \\
R_{16} &= 1/D(33 + 414a - 14943a^2 - 52754a^3 + 11496a^4) = \\
&= 0,002(6 - 0,549 - 0,02 + 0,00001 + 0,000) = 0,009; \\
R_{17} &= 1/D(-21 - 744a - 6672a^2 + 21976a^3 - 9793a^4) = \\
&= 0,002(-21 - 0,796 - 0,008 + 0,00003 - 0,000) = -0,037; \\
R_{18} &= 1/D(-48 - 666a + 8688a^2 - 9581a^3 + 2592a^4) = \\
&= 0,002(-48 - 0,713 + 0,01 - 0,00001 + 0,000) = -0,082.
\end{aligned}$$

Коэффициенты поперечной установки для метода упругих опор вычисляются по формуле

$$\text{КПУ} = \frac{\eta_1 + \mu_2}{2} + 0,6 \frac{\eta_3 + \mu_4}{2}. \quad (4)$$

Коэффициенты поперечной установки от двух полос нагрузки А14 равны следующим значениям:

– для балки Б1:

$$\text{КПУ}_{\text{А1Б1}} = \frac{0,224 + 0,053}{2} + 0,6 \frac{0,033 + 0,173}{2} = 0,077;$$

– для балки Б2:

$$\text{КПУ}_{\text{А1Б2}} = \frac{0,2 + 0,072}{2} + 0,6 \frac{0,003 - 0,110}{2} = 0,104.$$

Коэффициенты поперечной установки от двух полос нагрузки А14 соответственно равны:

– для балки Б1:

$$\text{КПУ}_{\text{А2Б1}} = \frac{0,327 + 0,139}{2} + 0,6 \frac{0,045 - 0,100}{2} = 0,217;$$

– для балки Б2:

$$\text{КПУ}_{\text{А2Б2}} = \frac{0,271 + 0,138}{2} + 0,6 \frac{0,065 - 0,051}{2} = 0,209.$$

Коэффициенты поперечной установки от нагрузки НК14 равны:

– для балки Б1:

$$\text{КПУ}_{\text{НКБ1}} = \frac{0,238 + 0,001}{2} = 0,12;$$

– для балки Б2:

$$\text{КПУ}_{\text{НКБ2}} = \frac{0,211 + 0,031}{2} = 0,121.$$

Линия влияния изгибающего момента посередине пролета балки и положение нагрузки, соответствующее M_{\max} , приведены для нагрузки АК на рис. 3, а для нагрузки НК – на рис. 4.

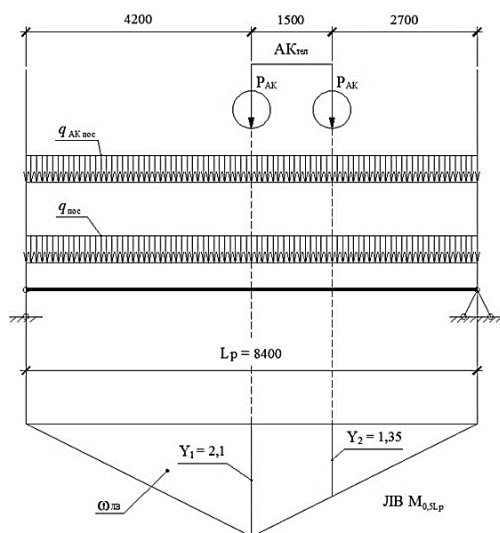


Рис. 3. Схема нагрузки АК вдоль моста
Fig. 3. Load diagram along the bridge

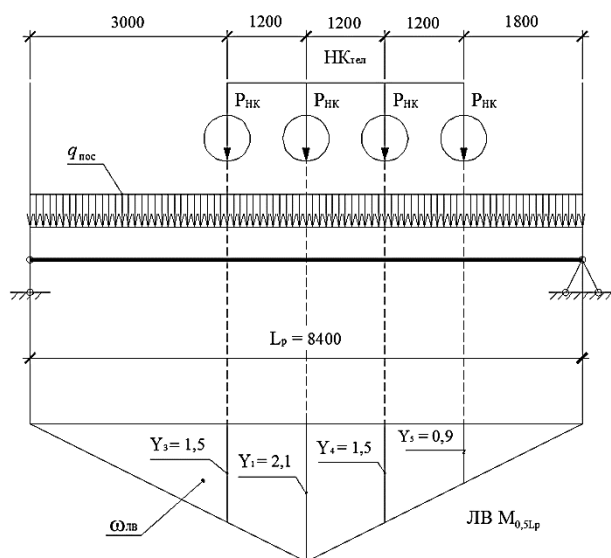


Рис. 4. Схема нагрузки НК вдоль моста
Fig. 4. Load diagram along the bridge

Площадь линии влияния изгибающего момента посередине пролета равна

$$\omega_M = 0,125 \cdot L_p^2 = 0,125 \cdot 8,4^2 = 8,82 \text{ усл. ед.} \quad (5)$$

Ординаты линии влияния от тележки нагрузки А14:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= \frac{L_p}{4} = \frac{8,4}{4} = 2,1; \\ Y_2 &= Y_1 \frac{0,5 \cdot L_p - 1,5}{0,5 \cdot L_p} = 2,1 \frac{0,5 \cdot 8,4 - 1,5}{0,5 \cdot 8,4} = 1,35. \end{aligned} \right\}$$

Ординаты линии влияния от НК102:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= 2,1; \\ Y_3 &= Y_4 = Y_1 \frac{0,5 \cdot L_p - 1,2}{0,5 \cdot L_p} = 2,1 \frac{0,5 \cdot 8,4 - 1,2}{0,5 \cdot 8,4} = 1,5; \\ Y_5 &= Y_1 \frac{0,5 \cdot L_p - 12,4}{0,5 \cdot L_p} = 2,1 \frac{0,5 \cdot 8,4 - 2,4}{0,5 \cdot 8,4} = 0,9. \end{aligned} \right\}$$

Принимаем коэффициенты надежности для временных нагрузок равными: для тележки нагрузки АК – $\gamma_{fAKT} = 1,5$; для полосовой нагрузки АК – $\gamma_{fAKn} = 1,15$; для нагрузки НК – $\gamma_{fHK} = 1,1$.

Принимаем динамические коэффициенты равными для тележки нагрузки АК – $(1 + \mu)_{AKT} = 1,4$; для полосовой нагрузки АК – $(1 + \mu)_{AKn} = 1,0$; для нагрузки НК – $(1 + \mu)_{HK} = 1,0$.

Значения временных нагрузок для нагрузок класса К = 14: осевая нагрузка тележки АК – $P_{AK} = 10 \cdot K = 10 \cdot 14 = 140$ кН; интенсивность полосовой нагрузки АК – $v_{AK} = K = 14$ кН/м; осевая нагрузка тележки НК – $P_{HK} = 18 \cdot K = 18 \cdot 14 = 252$ кН;

Тогда нормативные изгибающие моменты будут равны следующим значениям:

$$\left. \begin{aligned} &\text{– для нагрузки АК:} \\ &M_H^{AK} = q_c \cdot \omega_M + \text{КПУ}_{AK} (P_{AK} (Y_1 + Y_2) + v_{AK} \cdot \omega_M); \\ &\text{– для нагрузки НК:} \\ &M_H^{HK} = q_c \cdot \omega_M + \text{КПУ}_{HK} (P_{HK} (Y_1 + Y_3 + Y_4 + Y_5)). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Расчетные изгибающие моменты равны следующим значениям:

$$\left. \begin{aligned} &\text{– для нагрузки АК:} \\ &M_p^{AK} = \gamma_{fc} \cdot q_c \cdot \omega_M + \text{КПУ}_{AK} \times \\ &\times (\gamma_{fAKT} (1 + \mu)_{AKT} P_{AK} (Y_1 + Y_2) + \gamma_{fAKn} (1 + \mu)_{AKn} v_{AK} \cdot \omega_M); \\ &\text{– для нагрузки НК:} \\ &M_p^{HK} = \gamma_{fc} \cdot q_c \cdot \omega_M + \text{КПУ}_{HK} (\gamma_{fHK} (1 + \mu)_{HK} P_{HK} (Y_1 + Y_3 + Y_4 + Y_5)). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Вычисления изгибающих моментов для наиболее нагруженных первых двух балок Б1, Б2 приведены в таблице.

Расчетные данные

Calculated data

Значения	Нагрузка от собствен- ного веса q , кН/м	Схемы нагружения				
		Б1 (А14)		Б2 (А14)		(НК102)
		Тележка АК, P_{AK} , кН	Полосо- вая АК, v_{AK} , кН/м пог.	Тележка АК, P_{AK} , кН	Полосовая АК, v_{AK} , кН/м пог.	P_{HK} , кН
Нормативные значения						
Параметры нагрузок	5,3	140	14	140	14	252
$\sum y_i$, м		3,45	—	3,45	—	6
$\sum \omega_i$, м ²	8,82	—	8,82	—	8,82	—
η	—	0,077	0,077	0,217	0,217	0,12
M_n , кН·м	46,75	37,19	9,51	104,81	26,8	181,44
$\sum M_n$, кН·м	46,75		46,7		131,61	181,44
$\sum M_{нобщ}$, кН·м			93,45		178,36	228,19
γ_f		1,5	1,15	1,5	1,15	1,1
(1+ μ)		1,4	1	1,4	1	1
Расчетные значения						
Параметры нагрузок	6,08	294	16,1	294	16,1	277,2
M_p , кН·м	53,63	78,1	10,93	220,1	30,81	199,58
$\sum M_p$, кН·м	53,63		89,03		250,91	199,58
$\sum M_{робщ}$, кН·м			142,66		304,54	253,21

Из данных таблицы следует, что максимальный изгибающий момент наблюдается в балке Б2 от нагрузки А14, равен $M_{\max} = 341,16$ кН·м и свидетельствует о проявлении клавишного эффекта.

Рассмотрим расчетную схему для определения геометрических характеристик (рис. 5, 6).

Коэффициент приведения характеристик бетона к стали:

$$n = \frac{E_s}{E_b},$$

где $E_s = 206\,000$ МПа – модуль упругости стали; $E_b = 32\,500$ МПа – модуль упругости бетона марки В30 [4],

$$n = \frac{206000}{32500} = 6,34.$$

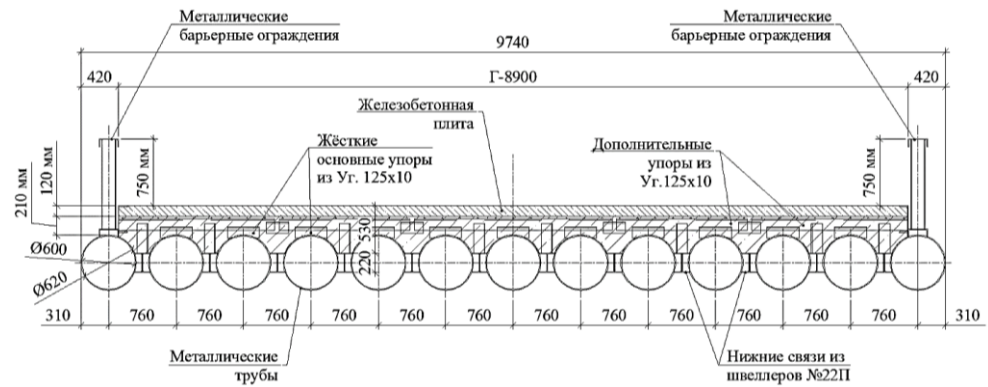


Рис. 5. Поперечное сечение моста из металлических труб с габаритом Г-8,9 м

Fig. 5. Cross-section of bridge made of metal tubes 8.9 m in size

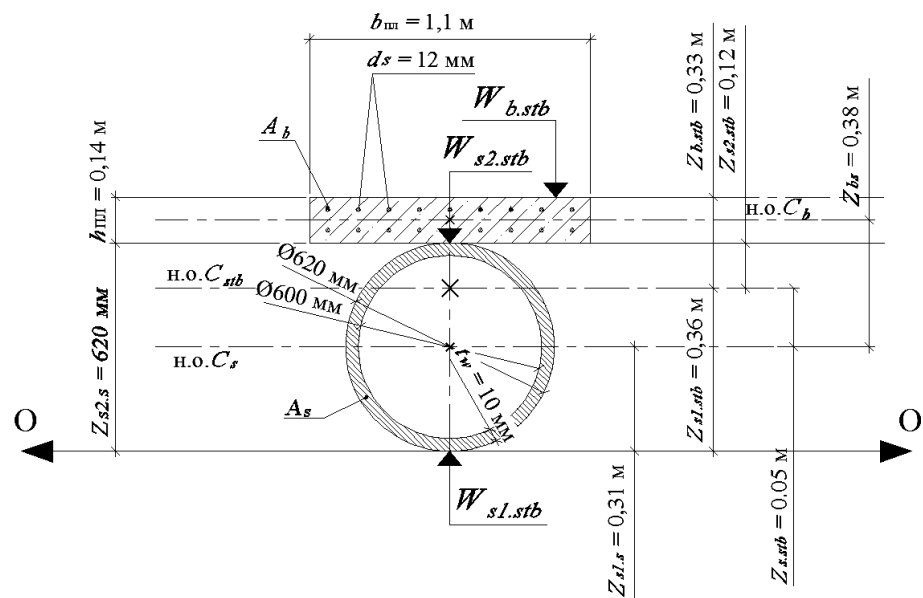


Рис. 6. Схема расчета геометрических характеристик сталежелезобетонного пролетного строения

Fig. 6. Design scheme for geometrical parameters of steel concrete span

Площадь сечения стальной трубы $D = 620$ мм с толщиной стенки $t_w = 10$ мм.

$$A_s = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4};$$

$$A_s = 3,14 \cdot 0,622/4 - 3,14 \cdot 0,062/4 = 0,0192 \text{ м}^2.$$

Площадь сечения бетона плиты проезжей части равна

$$A_b = b_{\text{пл}} \cdot h_{\text{пл}};$$

$$A_b = 1,1 \cdot 0,14 = 0,154 \text{ м}^2.$$

Площадь арматурных стержней в железобетонной плите.

Принимаем армирование двумя сетками из арматуры диаметром $d_s = 0,012$ м с размерами ячеек 120×120 мм. На участке плиты длиной 1,1 м разместится при этом $n_r = 2 \frac{1,1}{0,12} \approx 18$ шт. стержней арматуры.

$$A_r = n_r \frac{\pi d_s^2}{4};$$

$$A_r = 18 \cdot 3,14 \cdot 0,0122/4 = 0,0020 \text{ м}^2.$$

Площадь железобетонной плиты A_{bs} :

$$A_{bs} = A_b + \frac{A_r}{n};$$

$$A_{bs} = 0,154 + 0,0020/6,34 = 0,1543 \text{ м}^2.$$

Площадь сталежелезобетонного сечения A_{stb} :

$$A_{stb} = A_s + A_{bs};$$

$$A_{stb} = 0,0192 + 0,1543 = 0,1735 \text{ м}^2.$$

Положение нейтральной оси стальной трубы:

$$Z_{s1.s} = D/2;$$

$$Z_{s1.s} = 0,62/2 = 0,31 \text{ м}.$$

Статический момент стальной трубы S_s относительно собственной нейтральной оси $Z_{s1.s}$:

$$S_s = A_s \cdot z_{s1.s};$$

$$S_s = 0,0192 \cdot 0,31 = 0,006 \text{ м}^3.$$

Статический момент сталежелезобетонного сечения (S_{stb}) относительно нейтральной оси стального сечения (н. о. C_s):

$$S_{stb} = \frac{1}{n} A_{bs} \cdot Z_{bs};$$

$$S_{stb} = 0,1543 \cdot 0,38/6,34 = 0,0093 \text{ м}^3.$$

Расстояние $Z_{s.stb}$ между н. о. стальной трубы (s) и н. о. сталежелезобетонного сечения (stb):

$$Z_{s.stb} = \frac{S_{stb}}{A_{stb}};$$

$$Z_{s.stb} = 0,0093/0,1735 = 0,0536 \text{ м}.$$

Момент инерции стальной трубы J_s относительно собственной нейтральной оси н. о. (C_s):

$$J_s = \frac{\pi D^4}{64} - \frac{\pi d^4}{64};$$

$$J_s = 3,14 \cdot 0,624/64 - 3,14 \cdot 0,64/64 = 0,0008 \text{ м}^4.$$

Момент инерции железобетонной плиты J_{bs} относительно собственной нейтральной оси (н. о. C_b):

$$J_{bs} = \frac{b_{пл} \cdot h_{пл}^3}{12} + 18 \frac{\pi \cdot d_s^4}{64} + A_r (h_{пл} - z_{s.stb})^2;$$

$$J_{bs} = 1,1 \cdot 0,143/12 + 18 \cdot 3,14 \cdot 0,0124/64 + 0,002(0,14 - 0,05)^2 = 0,0003 \text{ м}^4.$$

Момент инерции J_{stb} сталежелезобетонного сечения относительно собственной нейтральной оси (н. о. stb):

$$J_{stb} = J_s + A_s \cdot Z_{s.stb}^2 + \frac{J_{bs}}{n} + \frac{A_{bs}}{n} (Z_{b.s} - Z_{s.stb})^2;$$

$$J_{stb} = 0,0008 + 0,0192 \cdot 0,052 + 0,0003/6,34 + 0,1543/6,34(0,38 - 0,05)^2 = 0,0008 + 0,00005 + 0,00005 + 0,0027 = 0,0036 \text{ м}^4.$$

Момент сопротивления $W_{b.stb}$:

$$Z_{b.stb} = Z_{bs} - z_{s.stb} = 0,38 - 0,05 = 0,33 \text{ м};$$

$$W_{b.stb} = \frac{J_{stb}}{Z_{b.stb}};$$

$$W_{b.stb} = 0,0036/0,33 = 0,011 \text{ м}^3.$$

Момент сопротивления $W_{s1.stb}$ крайней фибры низа трубы:

$$W_{s1.stb} = \frac{J_{stb}}{Z_{s1.stb}};$$

$$W_{s1.stb} = 0,0036/0,36 = 0,01 \text{ м}^3.$$

Момент сопротивления $W_{s2.stb}$ крайней фибры верха трубы:

$$W_{s2.stb} = \frac{J_{stb}}{Z_{s2.stb}};$$

$$W_{s2.stb} = 0,0036/0,12 = 0,03 \text{ м}^3.$$

Коэффициент тонкостенности трубы равен

$$k = b = \frac{d}{D} = \frac{600}{620} = 0,97.$$

При расчетном сопротивлении стали трубы $R_n = 200$ МПа; $\sigma_T = 195$ МПа.

$$\text{Значение } \cos \varphi = \frac{Z_{s.stb}}{d} = \frac{0,05}{0,6} = 0,083; \quad \cos \varphi = 0,99.$$

Определим расчетный коэффициент удельного веса трубы [5]:

$$(R_n - \sigma_T) = \lambda \cdot \sigma_T (b \cdot \gamma \cos \varphi - 1); \quad (8)$$

$$\frac{(R_n - \sigma_T)}{\lambda \cdot \sigma_T} = (b \cdot \gamma \cos \varphi - 1); \quad (9)$$

$$\frac{200 - 195}{1 \cdot 195} = (0,97 \cdot \gamma \cdot 0,99 - 1);$$

$$\begin{aligned} 0,025 &= 0,96\gamma - 1; \\ -0,96\gamma &= -0,025 - 1; \\ \gamma &= \frac{-1,025}{-0,96} = 1,07; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= \arccos \frac{1}{\gamma} - \frac{1}{\gamma} \left(\frac{2}{\gamma^2} - 1 \right) \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = \\ &= \arccos \frac{1}{1,07} - \frac{1}{1,07} \left(\frac{2}{1,07^2} - 1 \right) \sqrt{1 - \frac{1}{1,07^2}} = 0,76. \end{aligned}$$

Определим параметр B по формуле

$$B = \left(1 - \frac{1}{\gamma^2} \right)^{3/2} = \left(1 - \frac{1}{1,07^2} \right)^{3/2} = 0,046.$$

Для упругопластического состояния сечения трубы значение параметра β равно

$$\begin{aligned} \beta &= \gamma - \frac{2\lambda}{\pi(1-b^4)} \left(\gamma \cdot A - \frac{8}{3} B \right) = \\ &= 1,07 - \frac{2 \cdot 1}{3,14(1-0,97^4)} \left(1,07 \cdot 0,76 - \frac{8}{3} 0,046 \right) = 2,76. \end{aligned}$$

Запишем условие

$$\frac{M_{\text{внеш}}}{M_{\text{трубы}}} = 2,76,$$

тогда

$$\begin{aligned} \frac{253,21 \text{ кН} \cdot \text{м}}{M_{\text{трубы}}} &= 2,76; \\ M_{\text{трубы}} &= \frac{253,21}{2,76} = 91,74 \text{ кН} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Изгибающий момент, воспринимаемый железобетонной плитой проезжей части, равен

$$M_{\text{ж/б}} = 86830 \text{ кг} \cdot \text{см} = 86830 \frac{9,81}{100000} = 8,52 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

тогда

$$M_{\text{трубы}}^{\text{несущ}} = M_{\text{трубы}}^{\text{чист}} + M_{\text{ж/б}} = 141,97 + 8,52 = 150,49 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

При расчетном сопротивлении плиты железобетонной части $R_b = 160 \text{ кг/см}^2$ изгибающий момент плиты равен

$$\begin{aligned} M_{\text{ж/б}} &= (160 \text{ см/см}^2 \cdot J_{\text{стб}}) / 33 \text{ см} = 160 \text{ см/см}^2 \cdot 360\,000 \text{ см}^4 / 33 \text{ см} = \\ &= 1\,745\,454,54 \text{ кг} \cdot \text{см} = 171,23 \text{ кН} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Изгибающий момент металлической трубы будет равен

$$M_{\text{трубы}} = (1950 \text{ см/см}^2 \cdot J_{stb})/31 \text{ см} = 1950 \text{ см/см}^2 \cdot 360\,000 \text{ см}^4/31 \text{ см} = 22\,645\,161,29 \text{ кг}\cdot\text{см} = 2221,49 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Изгибающий момент сталежелезобетонного сечения:

$$M_{stb} = M_{ж/б} + M_{ср} = 171,23 + 2221,49 = 2392,72 \text{ кН}\cdot\text{м};$$

$$M_{I+II}'' = 83,97 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Проверяем условие прочности на внешней фибре кольцевого сечения трубы по формуле

$$\sigma_{s2} = \frac{M_{stb} - Z_{bs} \cdot N_{b2s}}{\eta \cdot W_{s2stb}} - \frac{N_{b2s}}{A_s} \leq m \cdot m_1 \cdot R_y, \quad (10)$$

где η – коэффициент для кольцевого сечения, равен 1,15 [6]; N_{b2s} – продольная сила на уровне ц. т. плиты, равна 2832,2 кН; $m = 0,9$; $m_1 = 0,75$; $R_y = 200\,000 \text{ кН/м}^2$.

Расчетное значение $\sigma_{s2} = 126\,000 \text{ кН/м}^2 < 135\,000 \text{ кН/м}^2$ – условие прочности выполняется с запасом 6,7 %.

Выводы

Совершенствование расчета несущих балок пролетных строений мостов из металлических труб, объединенных для совместной работы с железобетонной плитой проезжей части, показало дополнительные резервы прочности за счет упругопластической работы сечения трубы, а также необходимость рассмотрения влияния клавишного эффекта при расчетах КПУ методом упругих опор.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Петрова Г.В. Применение пролетных строений из труб на мостах средней длины // Избранные доклады II Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы (МНТ-2015)», Томск, 16–20 ноября 2015 г. Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2016. С. 323–326. EDN: VZRKBF
2. Новожилова Н.И., Быстров В.А., Шайкевич В.Л. Прогрессивные материалы и конструктивные формы в металлических мостах. Ленинград, 1988. 101 с.
3. Петрова Г.В., Картопольцев В.М. К расчету пролетных строений сталежелезобетонных мостов из труб методом упругих опор // Избранные доклады 63-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых учёных, Томск, 20 апреля 2017 г. Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2017. С. 206–208. EDN: YQHCHK
4. Алексеев А.А., Чернышов А.И., Киряков Е.И., Глотов С.А. Влияние электризованной поверхности минерального вяжущего на процессы гидратации // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 6. С. 134–143.
5. Hainc S.P. LED-criteria for composite steel I-beams bridges // J. Struct. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Enq. 1980. V. 11. P. 2297–2312.
6. Лейбензон Л.С. Курс теории упругости. Москва ; Ленинград : Гостехиздат, 1947. 464 с.

REFERENCES

1. Petrova G.V. The use of tubular beam spans on medium-length bridges. In: *Proc. Int. Sci. Conf. of Students and Young Scientists 'Youth, Science, Technology: New Ideas and Prospects'*. Tomsk. 2015, Pp. 323–326. EDN: VZRKBF (In Russian)

2. Novozhilova N.I., Bystrov V.A., Shaikevich V.L. Progressive materials and structural forms in metal bridges. Leningrad, 1988. 101 p. (In Russian)
3. Petrova G.V., Kartopoltsev V.M. Section analysis of tubular beams of bridge spans using elastic support method. In: *Proc. 63rd Sci. Conf. of Students of Young Scientists*. Tomsk, 2017. Pp. 219–221. EDN: YQHCHK (In Russian)
4. Alekseev A.A., Chernyshov A.I., Kiryakov E.I., Glotov S.A. The Influence of Surface Electrization of Cementitious Material on Hydration Processes. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017; (6): 134–143. (In Russian)
5. Heins C.P. LED Criteria for Composite Steel I-Beam Bridges. *Journal of the Structural Division*. 1980; 106 (11): 2297–2312.
6. Leibenzon L.S. The Course of Elasticity Theory. Moscow, Leningrad, 1947. 464 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Алексеев Александр Аверьянович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, alekseev10@yandex.ru

Картопольцев Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной, 24/1, diamos@mail.ru

Authors Details

Aleksandr A. Alekseev, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, alekseev10@yandex.ru

Audrei V. Kartopoltsev, PhD, A/Professor, ООО “DIAMOS”, 24/1, Solyanoy Str., 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.05.2025
Одобрена после рецензирования 27.05.2025
Принята к публикации 27.05.2025

Submitted for publication 15.05.2025
Approved after review 27.05.2025
Accepted for publication 27.05.2025