Для цитирования: *Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Юсупов А.К. Напряженно-деформированное состояние шпренгельной подкрановой балки. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (2):184-196. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-184-196*
For citation: *Muselemov Kh.M., Ustarkhanov O.M., Yusupov A.K. Stress-deformed state of a strut-framed crane girder. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44(2):184-196. (In Russ.) DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-184-196*

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.072:624.011
DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-184-196

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ШПРЕНГЕЛЬНОЙ ПОДКРАНОВОЙ БАЛКИ

Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Юсупов А.К.
Дагестанский государственный технический университет,
367026 г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия,
[1]e-mail:dgtu.pgs@mail.ru,
[2]e-mail: abusupk @mail.ru,
[3] e-mail: hairulla213@mail.ru

Резюме. Целью *настоящего исследования является изучение влияния параметров конструкции на напряженно-деформированного состояние шпренгельной подкрановой балки; составление таблиц и соответствующих графиков, иллюстрирующих изменения внутренних силовых факторов в характерных сечениях элементов рассматриваемой системы. В статье излагается исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) металлической подкрановой шпренгельной балки.* ***Метод****. При решении этой задачи применяются численные методы анализа, основанные на использовании функции Грина. Вводится безразмерный параметр, в зависимости от которого строятся таблицы и графики. По известному алгоритму выполняются вычисления внутренних силовых факторов в сечениях рассматриваемой конструкции.* ***Результат.*** *В зависимости от безразмерного параметра, характеризующего геометрию и физические особенности системы, составляются таблицы изгибающих моментов и поперечных сил. По этим таблицам строятся соответствующие графики, по которым легко выбрать оптимальные параметры конструкции.* ***Вывод.*** *Выявлена зависимость моментов и поперечных сил от безразмерного параметра k, были построены соответствующие графики и вычислены затраты металла на подкрановые балки. Установлено, что минимальные значения моментов и поперечных сил имеют место при значениях безразмерного параметра k , близких к нулю. Наиболее экономичной оказалась шпренгельная подкрановая балка при k=0,0001. Самой неэкономичной ─ при k=0,05 и k = ∞. В конечном итоге, можно сказать, что шпренгельные балки по сравнению с обычными подкрановыми балками более выгодны. В рассмотренных в статье примерах экономия металла составила 14%. Изложенная методика позволяет выполнять расчет и проектирование шпренгельных подкрановых балок с двумя стойками.*

Ключевые слова: *шпренгельная балка, подкрановая балка, внутренние силовые факторы, таблицы, графики, расчетные схемы, условие прочности, безразмерный параметр, характерные сечения*

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

STRESS-DEFORMED STATE OF A STRUT-FRAMED CRANE GIRDER

Khairulla M. Muselemov[3], Osman M. Ustarkhanov,[1] Abusupyan K.Yusupov[2]
Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,
[1]e-mail:dgtu.pgs@mail.ru,
[2]e-mail: abusupk @mail.ru,
[3] e-mail: hairulla213@mail.ru

Abstract Objectives *The aim of the present work is to study the influence of design parameters on the stress-deformed state of a sprengel crane girder; to compile the tables and corresponding graphs illustrating changes in internal force factors in the characteristic cross-sections of the system elements under consideration. The article describes the study of the stress-deformed state (SDS) of a metal strut-framed crane girder.* ***Methods*** *Numerical methods of analysis based on the use of the Green's function are used during solving this problem. A dimensionless parameter is introduced, depending on which the tables and graphs are constructed. According to the known algorithm, the calculations of internal force factors in the sections of the considered construction are performed.* ***Results*** *Depending on the dimensionless parameter characterising the geometry and physical features of the system, tables of bending moments and transverse forces are compiled. According to these tables, the appropriate graphs are plotted in order to choose easily the optimal design parameters.* ***Conclusion*** *The dependence of the moments and transverse forces on the dimensionless parameter k was found, the corresponding graphs were plotted and the metal costs for the girders were calculated. The minimum values of the moments and transverse forces are established to take place when the dimensionless parameter k values are close to zero. The most economical was a strut-framed crane girder having k = 0.0001. The most uneconomical had k = 0.05 and k =∞. Eventually, the sprengel girders were found to be more profitable as compared to conventional crane girders. In the examples considered in the article, the metal savings amounted up to 14%. The presented methodology allows the calculation and designing of strut-framed crane girders with two racks to be carried out.*

Keywords*: strut-framed girder, crane girder, internal force factors, tables, graphs, calculation schemes, strength conditions, dimensionless parameter, characteristic cross-sections*

Введение. Шпренгельные системы находят широкое применение в практике проектирования и строительства [1,3-6,8,19,22]. Доля подкрановых балок в системе каркаса промышленных зданий составляют [8, 9] примерно 20-60% от общей массы металла. Поэтому совершенствование конструктивной системы подкрановых балок актуально. Шпренгельные подкрановые балки, как показывают проведенные исследования, рациональны при шаге колонн 12 м и более. В связи с появлением новых технологий шаг колонн имеют тенденцию к увеличению. А это в свою очередь открывает новые возможности для обоснованного применения шпренгельных подкрановых балок при проектировании металлических каркасов промышленных зданий. В настоящее время внимание исследователей приковано к совершенствованию конструктивной схемы подкрановых балок [7,11-13].

Постановка задачи. С целью повышения эффективности работы подкрановой балки вводится шпренгельная конструкция с двумя стойками. Эта конструкция загружается двумя мостовыми кранами. Определяется расположение мостовых кранов, при котором, возникает опасное состояние подкрановой балки. Исследуется напряженно-деформированное состояние элементов шпренгельной подкрановой балки при шаге колонн 12 м.

Метод исследования. В статье [1] был рассмотрен алгоритм расчета шпренгельных подкрановых балок с двумя стойками. При этом в качестве расчетной схемы была принята

трехпролетная балка, у которой две промежуточные опоры имели упругоподатливые связи. Как известно, прогибы балок на упругоподатливых опорах определяются методом 5-ти моментов. Однако в случае подкрановых шпренгельных балок, когда опасное расположение мостовых кранов заранее неизвестно, применение «5-ти моментов» затруднено. Здесь более эффективным является метод, основанный на применении функции Грина. Это ─ новый подход. Он позволяет достаточно просто решать задачи о балках на упругоподатливых опорах.

Достоверность метода, основанного на применении функции Грина, проверялась нами на многих задачах, решение которых хорошо известно[21]. Обычно при расчете шпренгельных подкрановых балок применяются приближенные методы [2, 10].

В настоящем исследовании приводим более точный метод расчета этих конструкций. В статье [1] при определении внутренних усилий две подкрановые балки перемещались с определенным шагом по всему пролету балки. Таким образом вычислялись наибольшие значения изгибающих моментов и поперечных сил. Функция прогибов конструкции определялась решением дифференциального уравнения

$$EJ \cdot y^{IV}(x) = \sum_{i}^{6} F_i \cdot \delta(x - x_i) - X_1 \cdot \delta(x - \ell_1) - X_2 \cdot \delta(x - \ell_2) \qquad (1)$$

при условиях шарнирного опирания концов перекладины шпренгельной подкрановой балки. В уравнении (1)

$\delta(x - x_i)$ – дельта -функция, X_1, X_2 – реакции упругоподатливых опор.

Решение этого уравнения представлялось в интегральной форме [1, 21]

$$y(x) = y_0(x) - X_1 G(x,l_1) - X_2 G(x,l_2), \qquad (2)$$

где, $$y_0(x) = \sum_{i}^{6} \int_0^l G(x,\xi) \cdot F_i \delta(\xi - x_i) d\xi = F_i \cdot \sum_{i}^{6} G(x, x_i). \qquad (3)$$

Неизвестные X_1 и X_2 даются равенствами:

$$X_1 = \frac{y_0(l_2) \cdot G(l_1,l_2) - y_0(l_1) \cdot [G(l_2,l_2) + \frac{1}{r}]}{G(l_2,l_1) \cdot G(l_1,l_2) - [G(l_1,l_1) + \frac{1}{r}] \cdot [G(l_2,l_2) + \frac{1}{r}]},$$

$$X_2 = \frac{y_0(l_1) \cdot G(l_1,l_2) - y_0(l_2) \cdot [G(l_2,l_2) + \frac{1}{r}]}{G(l_2,l_1) \cdot G(l_1,l_2) - [G(l_1,l_1) + \frac{1}{r}] \cdot [G(l_2,l_2) + \frac{1}{r}]}, \qquad (4)$$

где $G(x,\xi)$ – функция Грина [1, 21],

r – коэффициент жесткости пружины, характеризующий работу шпренгельной системы, стоек и затяжек. Значение этого коэффициента зависит от «геометрии» шпренгельной системы, размеров ее элементов, зависит от площадей сечений, модуля упругости и других конструктивных особенностей.

Расчетная схема шпренгельной подкрановой балки имеет вид, графически представленный на рис. 1. Когда подкрановая балка - однопролетная, то расположение двух мостовых кранов, при котором возникает наибольший изгибающий момент, определяется по правилу Винклера. А в случае трехпролетной балки, да еще с упругоподатливыми опорами, - это проблема. Поэтому, с целью определения наибольших изгибающих моментов и поперечных сил, как указывалось выше, система сил от двух подкрановых балок перемещается по длине балки с шагом в один метр. Решение определяется формулами (2-4).

При этом меняются координаты x_i приложения сил по схеме, показанной на рис.1.

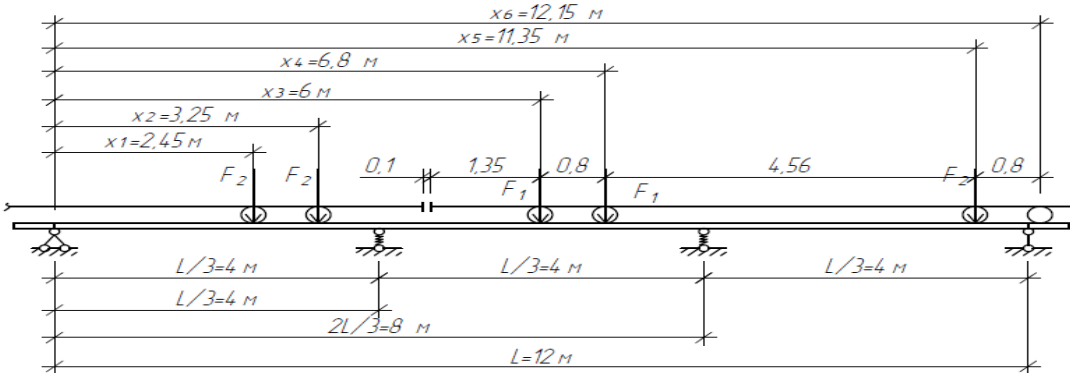


Рис.1. Расчетная схема шпренгельной балки
Fig.1. Calculation scheme of the crossbeam beam

По изложенному выше алгоритму [1] нами были вычислены внутренние силовые факторы в зависимости от безразмерного параметра $k = \frac{EJ}{rl^3}$.

Здесь: EJ – жесткость сечения перекладины при изгибе;

r – коэффициент жесткости пружины;

l – пролет шпренгельной подкрановой балки (шаг колонн).

Величина k – безразмерная.

Далее мы приводим таблицы и графики изгибающих моментов и поперечных сил, возникающих в сечениях перекладины шпренгельной подкрановой балки в зависимости от параметра k. Давления колёс мостового крана приняты следующие: $F_1 = 488kH;$ $F_2 = 515kH.$ При этом нагрузки определялись с использованием литературы [8-10].

Таблица 1.Максимальные моменты, поперечные силы и соответствующие сжимающие нормальные усилия в перекладине при различных значениях параметра k
Table 1. The maximum moments, transverse forces and the corresponding compressive normal forces in the crossbar for different values of the parameter k

№	Значение параметра k	Максимальный момент и соответствующие ему поперечная сила Q, и нормальное усилие F			Максимальная поперечная сила и соответствующие момент и усилия.		
		Mmax, кНм	Q, kH	Fп	Qmax, kH	M, kHм	Fп, kH
1	0	643	343.5	2391	879	77.6	2970
2	0.0001	644.5	348.4	2393	887.3	201.8	2944
3	0.0005	654	353.5	2362	893.4	32.3	2853
4	0.001	644.5	348.4	2896	887	201.8	3146
5	0.0025	786	497.5	2693	889.4	209.7	2855
6	0.005	968.3	416.5	2457	904.6	466.1	2556
7	0.01	1328	211	2124	916	796.5	2179
8	0.05	283	240.4	1061	1137.2	966.6	1059
9	0.1	3418	244.7	654	1283	1091	651
10	∞	4368	249.3	0	1520	1292.6	0

Зависимость моментов и поперечных сил от параметра *k* наглядно показана в виде графиков на рисунках 2 – 6.

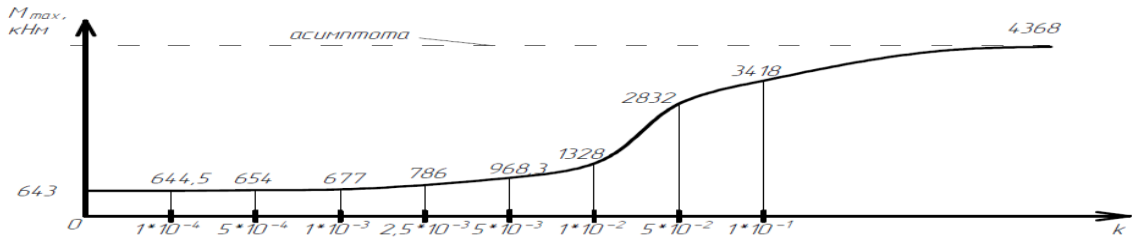


Рис.2. График зависимости максимальных моментов от параметра k
Fig.2. Graph of the dependence of the maximum moments on the parameter k

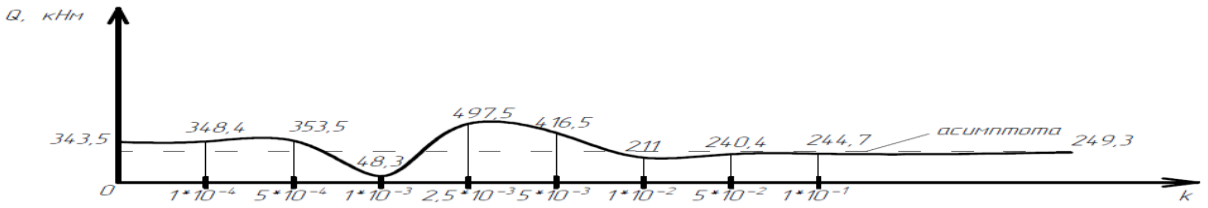


Рис.3. График зависимости поперечных сил (по максимальным моментам) от параметра k
Fig.3. The graph of the dependence of shear forces (on the maximum moments) of the parameter k

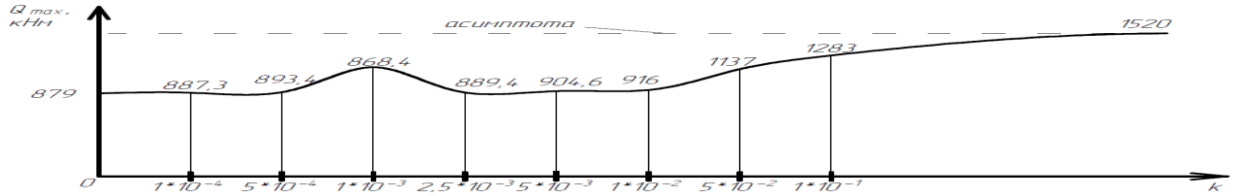


Рис.4. График зависимости максимальных поперечных сил от параметра k
Fig.4. The graph of the dependence of the maximum shear forces on parameter k

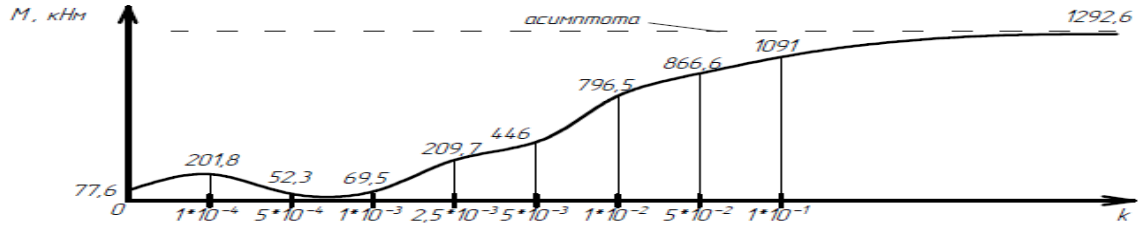


Рис.5. График зависимости моментов (по максимальным поперечным силам) от параметра k
Fig.5. The graph of the dependence of the moments (from the maximum transverse forces) on the parameter k

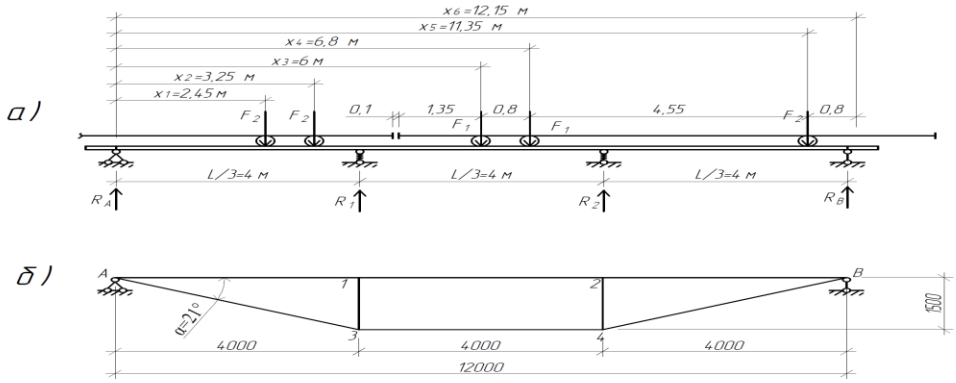


Рис. 6. Шпренгельная балка: а – расчетная схема; б – геометрическая схема
Fig. 6. The crossbar: a - calculation scheme; b - geometric scheme

Определение усилий в стержнях шпренгельной балки (k=0,001). Для определения усилий в элементах шпренгельной системы воспользуемся методом «вырезания узлов» (рис.7).

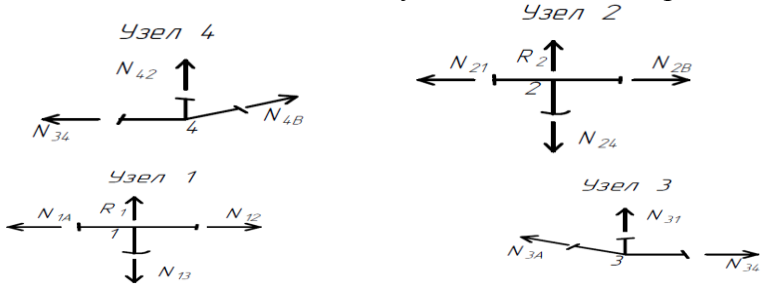


Рис .7. Схемы вырезанных узлов
Fig.7. Schemes of cut-out nodes

Из двух значений усилий в симметричных элементах шпренгельной системы выбираем бóльшее. В стойках используем узлы 1 и 2:

$N_{13} = -R_1 = -1086{,}2\ kH$ (определение усилий R_1 и R_2 в стойках было выполнено по изложенной в статье [1] методике, *при x3=7м.* R_1=1086 кН. $R_1 > R_2$),

$N_{42} = -R_2 = -894{,}3 kH.$ $F_c = N_{13} = 1086{,}2\ kH.$

В раскосах используем узлы 3 и 4:

$N_{A3} = -\frac{N_{13}}{\sin\alpha} = 3093{,}5\ kH;$ $N_{4B} = -\frac{N_{42}}{\sin\alpha} = 2547\ kH.$ $F_p = N_{A3} = 3093{,}5\ kH.$

- в затяжке пользуемся узлами 3 и 4:

$N_{34} = N_{A3} \cdot \cos\alpha = 2896{,}5\ kH;$ $N_{43} = N_{4A} \cdot \cos\alpha = 2384{,}9\ kH.$ $F_з = N_{34} = 2896{,}5\ kH.$

Результаты расчета сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты расчета
Table 2. Results of calculation

№	k	R_A, kH	R_1, kH	R_2, kH	R_B, kH	N_{13}, kH	N_{24}, kH	N_{A3}, kH	N_{34}, kH	N_{4B}, kH	N_{43}, kH
1	0	1455.9	1271.6	603.4	1462.1	-1271.6	-603.4	1271.6	0	603.4	0
2	0.0001	1378.6	897	894	1386	-897	-894	448.5	0.0449	447	0.0447
3	0.0005	1455.9	885.8	883.4	1462.1	-885.8	-883.4	2522.8	2362.1	2515.9	2355.7
4	0.001	583	1086.2	894.34	139.8	-1086.2	-894.34	3093.5	2896.5	2547.1	2384.9
5	0.0025	1455.9	1010.2	881.4	1462.1	-1010.1	-881.4	2877	2693.8	2510.2	2350.4
6	0.005	148.2	921.4	838.3	321.6	-921.4	-838.3	2624.1	2457.1	2387.5	2235.5
7	0.01	448.8	796.5	747.9	316	-796.5	-747.9	2268.4	2124	2130	1994.4
8	0.05	1124.1	397.9	375.8	1137.2	-397.9	-375.8	1133.2	1061.1	1070.3	1002.1
9	0.1	1274	245.26	233.4	1283.3	-245.26	-233.4	698.5	654.03	664.72	622.4
10	∞	1515			1521						

1. Подбор сечения раскосов. Растягивающее усилие *Fp=3093.5 kH.*

$$\frac{F_p}{A_{нетто}} \le \gamma R.$$

Здесь:

$A_{нетто}$ – площадь поперечного сечения элемента в ослабленном месте;

γ – коэффициент условий работы, принимаем 0,9;

R – расчетное сопротивление стали, принимаемое по СНиП «Стальные конструкции [14-15]».

По пределу текучести $R = \frac{R_T^H}{\gamma_m}$, $\gamma_m = 1.025,$

где γ_m – коэффициент надежности по материалу, который определяется по СНиП «Стальные конструкции» [14]:

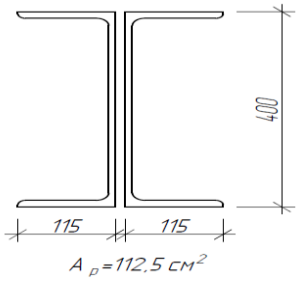
$$R = \frac{235\,МПа}{1{,}025} = 229{,}2\ МПа; \qquad A_{нетто} = \frac{F_p}{1{,}3 \cdot \gamma \cdot R_T^H} = \frac{3093{,}5\,kH}{1{,}3 \cdot 0{,}9 \cdot 22{,}9} = 112{,}5\ см^2.$$

По временному сопротивлению

$$R = \frac{R_в^H}{\gamma_m}, = \frac{365\,МПа}{1{,}025} = 356\ МПа; \qquad A_{нетто} = \frac{F_p}{\gamma \cdot R_B^H} = \frac{3093{,}5\,kH}{0{,}9 \cdot 35{,}6} = 96{,}5\ см^2.$$

Из двух значений площади поперечного сечения принимаем большее:
$A_{нетто} = 112{,}5\ см^2$;

Приведем пример подбора сечения шпренгельной балки при *k=0,001.*
Назначаем 2 швеллера 40П с параллельными поясами [16-18].



$A_р = 112{,}5\ см^2$

$$R = \frac{235\,МПа}{1{,}025} = 229{,}2\ МПа.$$

2. Подбор сечения затяжки. Растягивающее усилие *Fз=2896,5 kH.*

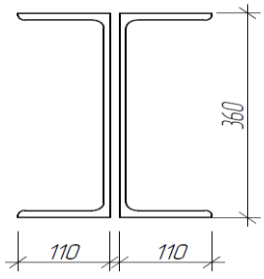
$$A_{нетто} = \frac{F_p}{1{,}3 \cdot \gamma \cdot R_T^H} = \frac{2896{,}5\,kH}{1{,}3 \cdot 0{,}9 \cdot 22{,}9} = 105{,}3\ см^2.$$

По временному сопротивлению

$$R = \frac{R_в^H}{\gamma_m}, = \frac{365\,МПа}{1{,}025} = 356\ МПа; \qquad A_{нетто} = \frac{F_p}{\gamma \cdot R_B^H} = \frac{2896{,}5\,kH}{0{,}9 \cdot 35{,}6} = 90{,}4\ см^2.$$

Из двух значений площади поперечного сечения принимаем большее:
$A_{нетто} = 105{,}3\ см^2.$

Назначаем 2 швеллера 36П с параллельными поясами, в количестве – 2 шт:



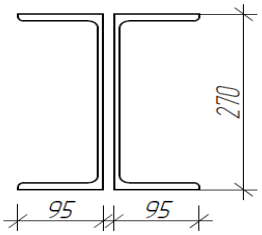
$A_з = 105\ см^2$

3. Подбор сечения стоек. Сжимающее усилие *Fc=1086,2 kH.*
Условие устойчивости продольного изгиба стойки:

$$\frac{F_c}{\varphi_x \cdot A_c} = \frac{1086{,}2\ kH}{0{,}9 \cdot 35{,}6\ см^2} = 90{,}4\ \frac{kH}{см^2} \le \gamma R = 0{,}9 \cdot 20\ \frac{kH}{см^2} = 18\ \frac{kH}{см^2},$$

где $$A_c = \frac{F_c}{\varphi_x \cdot \gamma \cdot R} = \frac{1086{,}2\ kH}{0{,}782 \cdot 0{,}9 \cdot 20\ \frac{kH}{см^2}} = 30 см^2.$$

Для определения коэффициента продольного изгиба φ_x необходимо задаться гибкостью λ. При известном расчетном сопротивлении $R = 20\,\frac{kH}{см^2}$ и $\lambda = 70$ коэффициент продольного изгиба $\varphi_x = 0{,}782$ [20]. Принимаем [20] сечение в виде двух швеллеров 27П с параллельными поясами:



$A_c = 64\ см^2$

4. Подбор сечения перекладины. Усилия $M_{max}=676{,}7\ кНм$, $Q_{max}=868{,}4\ kH$.

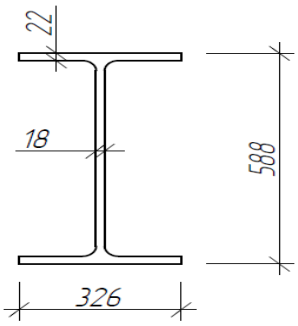
Условие прочности для перекладины:

$$\frac{F_n}{A_n} \le \gamma R, \quad \text{где} \quad A_n = \frac{F_n}{\gamma \cdot R} = \frac{868{,}4\ kH}{0{,}9 \cdot 20\ \frac{kH}{см^2}} = 48{,}2\,см^2 \le \gamma R = 0{,}9 \cdot 20\,\frac{kH}{см^2} = 18\,\frac{kH}{см^2};$$

$$F_n = F_p \cos\alpha = 3093kH \cdot \cos 21° = 2896,$$

где, F_n – усилие в перекладине,

A_n – площадь поперечного сечения перекладины.



Определение напряжений в сечениях и условия прочности (перекладина из широкополочного двутавра 60Ш4)

Напряжение от изгиба определяется по следующей формуле:

$$\sigma_u = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{67670\,kH \cdot см}{6055\ см^3} = 11{,}2\,\frac{kH}{см^2} < \gamma R = 0{,}9 \cdot 24\,\frac{kH}{см^2} = 21{,}6\,\frac{kH}{см^2},$$

где W – момент сопротивления сечения перекладины изгибу.

Напряжение от сжатия:

$$\sigma_{сж} = \frac{F_n}{A_n} = \frac{2896\,kH}{298\ см^2} = 9{,}7\,\frac{kH}{см^2} < \gamma R = 0{,}9 \cdot 24\,\frac{kH}{см^2} = 21{,}6\,\frac{kH}{см^2},$$

где, $F_n = 2896\ kH$ – усилие в перекладине,

A_n – площадь поперечного сечения перекладины.

Касательные напряжения:

$$\tau = \frac{S \cdot Q_{\max}}{I_n \cdot t_{ст}} = \frac{1343см^3 \cdot 868kH}{182500\ см^4 \cdot 2\ см} = 4{,}56\,\frac{kH}{см^2} < \gamma R = 0{,}9 \cdot 24\,\frac{kH}{см^2} = 21{,}6\,\frac{kH}{см^2},$$

где, S – статический момент половины сечения перекладины;

$Q_{\max}$ – максимальная поперечная сила;

I_n – момент инерции перекладины;

$t_{ст}$ – толщина стенки перекладины.

Условие по 4-й теории прочности [17]:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{(\sigma_и + \sigma_{сж})^2 + 3 \cdot \tau^2}, \; < \gamma R = 21{,}6 \frac{kH}{см^2}.$$

В середине сечения $\sigma_и = 0,$

$$\sigma_{пр} = \sqrt{(\sigma_{сж})^2 + 3 \cdot \tau^2} = \sqrt{\left(9{,}7 \frac{kH}{см^2}\right)^2 + 3 \cdot \left(4{,}56 \frac{kH}{см^2}\right)^2} = 12{,}58 \frac{kH}{см^2}, < \gamma R = 0{,}9 \cdot 24 \frac{kH}{см^2} = 21{,}6 \frac{kH}{см^2}.$$

Касательным напряжения $\tau = 0,$ тогда

$$\sigma_{пр} = \sqrt{(\sigma_и + \sigma_{сж})^2} = 15{,}07 \frac{kH}{см^2} + 0{,}2 \frac{kH}{см^2} = 20{,}9 \frac{kH}{см^2}, < \gamma R = 0{,}9 \cdot 24 \frac{kH}{см^2} = 21{,}6 \frac{kH}{см^2}.$$

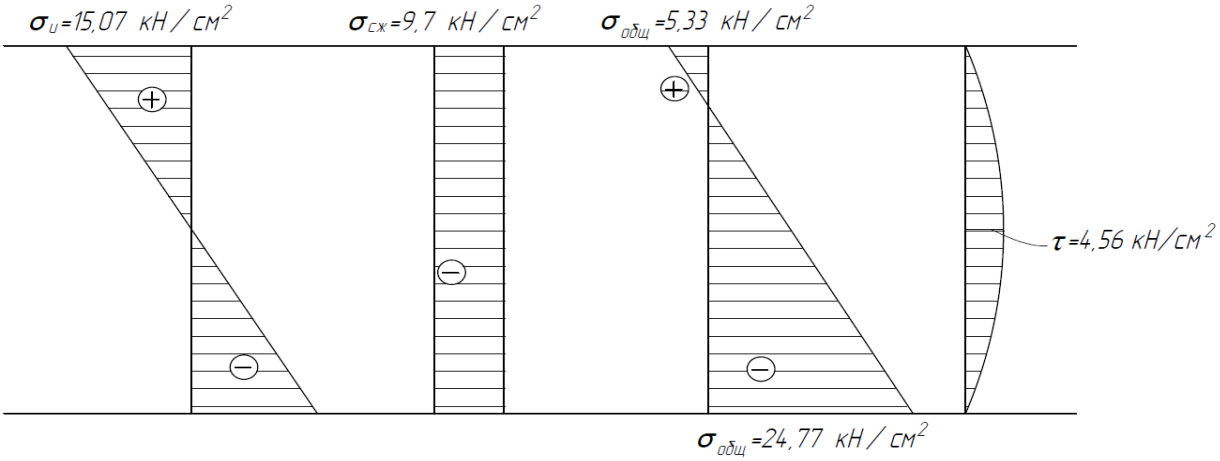


Рис. 8. Эпюра напряжений
Fig. 8. Stress diagram

Для определения массы конструкции находим сумму произведений длин на погонные веса всех элементов балки. Результаты расчета сгруппированны в таблице 3:

$$G_1 = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 12м \cdot 234.2 \frac{кг}{м} + 8м \cdot 31{,}8 \frac{кг}{м} + 8м \cdot 24 \frac{кг}{м} +$$

$$+ 17{,}08м \cdot 36{,}5 \frac{кг}{м} = 3880кг.$$

$$G_2 = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 3880кг.$$

$$G_3 = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 3947кг.$$

$$G_4 = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 4111кг.$$

$$G_5 = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 4016кг.$$

$$G_6 = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 4489кг.$$

$$G_7 = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 4741кг.$$

$$G_8 = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 4538кг.$$

$$G_9 = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 3912кг.$$

$$G_{10} = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 4507кг.$$

Таблица 3. Конструктивные элементы и соответствующие им массы металла
Table 3. Constructional elements and their corresponding metal masses

№	Значение параметра k	Конструктивные элементы								Общая масса, кг
		Перекладина шпренгельной балки		Затяжка		Стойки		Раскосы		
		Кол-во	Наим-е	Кол-во	Наим-е	Кол-во	Наим-е	Кол-во	Наим-е	
1	0	1	60Ш4	2	30П	2	27П	2	33П	3880
2	0,0001	1	60Ш4	2	30П	2	27П	2	33П	3880
3	0,0005	1	60Ш4	2	33П	2	27П	2	33П	3947
4	0,001	1	60Ш4	2	36П	2	37П	2	33П	4111
5	0,0025	1	60Ш3	2	36П	2	27П	2	33П	4016
6	0,005	1	70Ш4	2	36П	2	27П	2	33П	4489
7	0,01	1	60Ш4	2	30П	2	24П	2	33П	4741
8	0,05	1	Дв. Сост.	2	16П	2	14П	2	18аП	4538
9	0,1	1	Дв. Сост.	2	12П	2	8П	2	12П	3912
10	∞	1	Дв. Сост.	-	-	-	-	-	-	4507

Обозначения, использованные в таблице 3: 60Ш4, 70Ш4…. – двутавр широкополочный; 27П, 30П…. – швеллер с параллельными поясами; Дв.сост. – двутавр составного сечения с параметрами: при k=0,05 $t_р$=20 мм, $t_{ст}$=18 мм, h=1400 мм, b=360 мм; при k=0,1 $t_р$=20 мм, $t_{ст}$=12 мм, h=1400 мм, b=440 мм; при k=∞ $t_р$=20 мм, $t_{ст}$=16 мм, h=1800 мм, b=440 мм, где, $t_р$ – толщина поясов, $t_{ст}$ – толщина стенки, h – высота балки, b – ширина балки.

Обсуждение результатов. Безразмерный параметр k, зависящий от «геометрии» подкрановой балки, сечений её элементов, их размеров, а также от конструктивных особенностей шпренгельной системы, расчетных параметров металла ─ является интегральной характеристикой, удобной для анализа напряженно-деформированного состояния конструкции.

Как показывают составленные нами таблицы и построенные графики, параметр k, меняясь в диапазоне от 0 до бесконечности, позволяет определять внутренние силовые факторы и изменения массы всей конструкции, что очень удобно при проектировании шпренгельных подкрановых балок с двумя стойками.

На основании построенного алгоритма можно проводить исследования напряженно-деформированного состояния шпренгельных подкрановых балок при любом шаге колонн промышленных зданий.

Вывод. В результате проведенных здесь исследований была выявлена зависимость моментов и поперечных сил от безразмерного параметра k, были построены соответствующие графики и вычислена масса подкрановой балки. Наиболее экономичной оказалась шпренгельная подкрановая балка при k=0,0001. Самой неэкономичной – при k=0,05 и k = ∞. Можно сказать, что использование подкрановых шпренгельных балок по сравнению с обычными балками более выгодно. В рассмотренных здесь примерах экономия металла составила 14%. Изложенная здесь методика позволяет выполнять расчет и проектирование шпренгельных подкрановых балок с двумя стойками**.**

Библиографический список:

1. Акаев Н.К., Юсупов А.К. Алгоритм расчета шпренгельных подкрановых балок//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Т.42. - №3, 2016 г.- С.119-131.
2. Ажермачев С.Г. Приближенный метод расчета шпренгельных подкрановых балок. Строительство и техногенная безопасность. Выпуск 37, 2011 г. С.34-39.
3. Егоров В.В. Григорьев П.Н. Колебания шпренгельных систем с составной балкой жесткости. Транспортное, промышленное и гражданское строительство. Известия ПГУПС. №4. 2008. с. 17-24.
4. Егоров В.В. Работа предварительно напряженных шпренгельных систем в условиях динамических воздействий. Материалы VI научно-методической конференции ВИТУ (14 марта 2002 года). – СПб.: ВИТУ, 2002. – С. 86-91.
5. Клыков В.М., Я.М. Лихтарников Расчет стальных конструкций. М.:75г.- С.30-41.
6. Ливандовский Н.Н., Богатырева И.В. Усиление железобетонных балок шпренгельными затяжками и вложенными шпренгелями. XII международная конференция студентов и молодых ученых «перспективы развития фундаментальных наук» Россия, Томск, 21-24 апреля 2015 г. С.1338-1340.
7. Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Юсупов А.К. Разработка и исследование шпренгельных балок новой раскройки. Сб. тр. V Международной научно-практической конференции «Научные исследования: от теории к практике». Технические науки. Том 2. Г. Чебоксары. 2015. С.62-70.
8. «Металлические конструкции» – под редакцией Е.И. Беленя, Москва, Стройиздат, 1986 г. С.382-384.
9. «Металлические конструкции» - под редакцией Ю.И. Кудишина, Москва, Академия, 2011г. С.439-442.
10. Сибгатуллин М.Т. Диссертация. Совершенствование металлодеревянных шпренгельных балок. 2003. - С.114-121.
11. Патент 130333 РФ. МПК E04G 23/02. Шпренгель для усиления и обеспечения живучести изгибаемого железобетонного элемента / В.С. Плевков, Г.И. Однокопылов, И.В. Богатырева. Заявлено 08.02.2013; Опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20. – 5 с.
12. Патент РФ на изобретение №2169242, E04 C 3/08. Шпренгельная ферма / Алексашкин Е.Н., Егоров В.В., Забродин М.П., Сметанин Д.С. Опубл. 20.06. 2001 Бюл. №17.
13. Патент РФ на изобретение №2169243, E04 C 3/10. Предварительно напряженная шпренгельная ферма / Егоров В.В., Алексашкин Е.Н. Опубл. 20.06. 2001 в Бюл. №17.
14. Строительные нормы и правила. Стальные конструкции. Нормы проектирования. СНиП II-23-81*. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. С.48-49.
15. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. СНиП 2.01.07-85*. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 2003. С.6-7.
16. Стальные конструкции. Справочник конструктора. Под ред. Мельникова Н.П. М.: Стройиздат,1980. С.195-196.
17. СНиП II-23-81* «Стальные конструкции». Нормы проектирования - Москва, стройиздат, 1990г. - 95с. С.48-49.
18. СНиП 2-01-07-85* «Нагрузки и возведения». - Москва, стройиздат, 1986г. -105с., с изм. На 1 января 1987г. И 1 июля 1990г., от 5 июля 1993г. И 29 мая 2003г. С.6-7.
19. Смирнов А.А. Развитие однопролетных несущих конструкций. Всероссийский журнал для профессионалов «СтройПРОФИль». Металлические конструкции. №4-11. 2011. С.35-37.
20. Юсупов А.К.Металлические конструкции в вопросах, в ответах и в проектировании». ДГТУ . Махачкала, 2010. С.222-231.
21. Юсупов А.К. Методы прикладной математики в строительной механике. Том 1. ДГТУ . Махачкала, 2008. С.80-82.
22. Ф. Харт (Мюнхен), В. Хенн (Брауншвайг), Х. Зонтаг (Берлин), Москва, Стройиздат, 1977г. «Атлас стальных конструкций». С. 37-84.

References:

1. Akaev N.K., Yusupov A.K. Algoritm rascheta shprengel'nykh podkranovykh balok. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2016;42(3):119-131 [Akaev N.K., Yusupov A.K. Calculation algorithm of strut-framed girders. Herald of Daghestan State Technical University 2016;42(3):119-131 (in Russ.)]

2. Azhermachev S.G. Priblizhennyy metod rascheta shprengel'nykh podkranovykh balok. Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'. 2011;37:34-39. [Azhermachev S.G. Approximate calculation method for strut-framed girders. Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'. 2011;37:34-39. (in Russ.)]
3. Egorov V.V., Grigor'ev P.N. Kolebaniya shprengel'nykh sistem s sostavnoy balkoy zhestkosti. Transportnoe, promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. Izvestiya PGUPS. 2008;4:17-24. [Egorov V.V., Grigor'ev P.N. Vibrations of strut-framed systems with combined stiffening girder. Transportnoe, promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. Izvestiya PGUPS. 2008;4:17-24. (in Russ.)]
4. Egorov V.V. Rabota predvaritel'no napryazhennykh shprengel'nykh sistem v usloviyakh dinamicheskikh vozdeystviy. Materialy VI nauchno-metodicheskoy konferentsii VITU. Sankt-Peterbug; 2002. S. 86-91. [Egorov V.V. Operation of pre-stressed strut-framed systems in the conditions of dynamic impact. Materials of VI scientific-methodological VITU conference. Saint-Petersbug; 2002. P. 86-91. (in Russ.)]
5. Klykov V.M., Likhtarnikov Ya.M. Raschet stal'nykh konstruktsiy. M.;1975. C.30-41. [Klykov V.M., Likhtarnikov Ya.M. Calculation of steel constructions. Moscow;1975. C.30-41. (in Russ.)]
6. Livandovskiy N.N., Bogatyreva I.V. Usilenie zhelezobetonnykh balok shprengel'nymi zatyazhkami i vlozhennymi shprengelyami. Materialy XII Mezhdunarodnaoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh "Perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk". Tomsk; 2015. C.1338-1340. [Livandovskiy N.N., Bogatyreva I.V. Reinforcement of iron-concrete girders by strut-framed grips and inserted struts. Materials of XII International conference of students and young scientists "Development perspectives of fundamental sciences". Tomsk; 2015. C.1338-1340. (in Russ.)]
7. Muselemov Kh.M., Ustarkhanov O.M., Yusupov A.K. Razrabotka i issledovanie shprengel'nykh balok novoy raskroyki. Materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauchnye issledovaniya: ot teorii k praktike". Tom 2. Tekhnicheskie nauki. Cheboksary; 2015. S.62-70. [Muselemov Kh.M., Ustarkhanov O.M., Yusupov A.K. Development and investigation of strut-framed girders of a new cutting mode. Materials of V International scientific-practical conference "Scientific studies: fron theory to practice". Volume 2. Technical Sciences. Cheboksary; 2015. P.62-70. (in Russ.)]
8. Metallicheskie konstruktsii (pod redaktsiey E.I. Belenya). Moskva: Stroyizdat; 1986. S.382-384. [Metallic constructions. Belenya E.I. (Ed.). Moscow: Stroyizdat; 1986. P.382-384. (in Russ.)]
9. Metallicheskie konstruktsii (Pod redaktsiey Yu.I. Kudishina). Moskva: Akademiya; 2011. S. 439-442. [Metallic constructions. Kudishin Yu.I. (Ed.). Moscow: Akademiya; 2011. P. 439-442. (in Russ.)]
10. Sibgatullin M.T. Sovershenstvovanie metalloderevyannykh shprengel'nykh balok. Dissertatsiya. 2003. S.114-121. [Sibgatullin M.T. Improvement of metallic-wooden strut-framed girders. Dissertation. 2003. S.114-121. (in Russ.)]
11. Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Bogatyreva I.V. Shprengel' dlya usileniya i obespecheniya zhivuchesti izgibaemogo zhelezobetonnogo elementa. Patent RF №130333. MPK E04G. Byul. № 20. Opubl. 20.07.2013. [Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Bogatyreva I.V. A strut for reinforcement and durability providing of bending iron-concrete element. Patent RF №130333. MPK E04G. Bull. № 20. Publ. 20.07.2013. (in Russ.)]
12. Aleksashkin E.N., Egorov V.V., Zabrodin M.P., Smetanin D.S. Shprengel'naya ferma. Patent RF №2169242. E04 S 3/08. Byul. №17. Opubl. 20.06. 2001. [Aleksashkin E.N., Egorov V.V., Zabrodin M.P., Smetanin D.S. Strut truss. Patent RF №2169242. E04 S 3/08. Bull. №17. Publ. 20.06. 2001. (in Russ.)]
13. Egorov V.V., Aleksashkin E.N. Predvaritel'no napryazhennaya shprengel'naya ferma. Patent RF №2169243. E04 S 3/10. Byul. №17. Opubl. 20.06. 2001. [Egorov V.V., Aleksashkin E.N. Pre-stressed strut truss. Patent RF №2169243. E04 S 3/10. Bull. №17. Publ. 20.06. 2001. (in Russ.)]
14. Stroitel'nye normy i pravila. Stal'nye konstruktsii. Normy proektirovaniya. SNiP II-23-81. M.: TsITP Gosstroya SSSR; 1990. S. 48-49. [Building standards and rules. Steel constructions. Design standards. SNiP II-23-81. Moscow: TsITP Gosstroya SSSR; 1990. P. 48-49. (in Russ.)]
15. Stroitel'nye normy i pravila. Nagruzki i vozdeystviya. Normy proektirovaniya. SNiP 2.01.07-85. M.: TsITP Gosstroya SSSR; 2003. S. 6-7. [Building standards and rules. Loads and impacts. Design standards. SNiP 2.01.07-85. Moscow: TsITP Gosstroya SSSR; 2003. P. 6-7. (in Russ.)]
16. Stal'nye konstruktsii. Spravochnik konstruktora. Pod red. Mel'nikova N.P. M.: Stroyizdat; 1980. S. 195-196. [Steel constructions. Designer's reference book. Mel'nikov N.P. (Ed.). Moscow: Stroyizdat; 1980. P. 195-196. (in Russ.)]

17. SNiP II-23-81 “Stal'nye konstruktsii”. Normy proektirovaniya. Moskva: Stroyizdat; 1990. S. 48-49. [SNiP II-23-81 “Steel constructions”. Design standards. Moscow: Stroyizdat; 1990. P. 48-49. (in Russ.)]
18. SNiP 2-01-07-85 “Nagruzki i vozvedeniya”. Moskva: Stroyizdat; 1986. 105 s., s izm. na 1.01.1987 i 1.07.1990, ot 5.07.1993 i 29.05.2003. S.6-7. [SNiP 2-01-07-85 “Loads and erections”. Moscow: Stroyizdat; 1986. 105 s., with changes form 1.01.1987 and 1.07.1990, from 5.07.1993 and 29.05.2003. P. 6-7. (in Russ.)]
19. Smirnov A.A. Razvitie odnoproletnykh nesushchikh konstruktsiy. StroyPROFIl'. 2011;4-11:35-37. [Smirnov A.A. Development of single-span loadbearing construction. StroyPROFIl'. 2011;4-11:35-37. (in Russ.)]
20. Yusupov A.K. Metallicheskie konstruktsii v voprosakh, v otvetakh i v proektirovanii. Makhachkala: DGTU; 2010. C. 222-231. [Yusupov A.K. Metallic constructions in questions, answers and design. Makhachkala: DGTU; 2010. P. 222-231. (in Russ.)]
21. Yusupov A.K. Metody prikladnoy matematiki v stroitel'noy mekhanike. Tom 1. Makhachkala: DGTU; 2008. C. 80-82. [Yusupov A.K. Methods of applied mathematics in building mechanics. Volume 1. Makhachkala: DGTU; 2008. P. 80-82. (in Russ.)]
22. Khart F., Khenn V., Zontag Kh. Atlas stal'nykh konstruktsiy. Moskva: Stroyizdat; 1977. S. 37-84. [Khart F., Khenn V., Zontag Kh. Atlas of steel constructions. Moscow: Stroyizdat; 1977. P. 37-84. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Муселемов Хайрулла Магомедмурадович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры строительных конструкций и гидротехнических сооружений.

Устарханов Осман Магомедович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций и гидротехнических сооружений.

Юсупров Абусупьян Курашевич – доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций и гидротехнических сооружений.

Information about the authors:

Khayrulla M. Muselemov – Cand. Sci.(Technical), Senior Lecturer, Department of structures and hydraulic structures.

Osman M. Ustarhanov – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of structures and hydraulic structures, faculty of architecture and construction.

Abusupyan K.Yusupov – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of structures and hydraulic structures, faculty of architecture and construction.

Конфликт интересов.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.
The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 27.05.2017.
Принята в печать 16.06.2017.

Received 27.05.2017.
Accepted for publication 16.06.2017.