Для цитирования: *А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов. Эффективность шпренгельных балок с оптимальными параметрами. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (1):141-154. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-141-154*
For citation: *A. K. Yusupov, H.M. Muselemov, T.O. Ustarhanov. Efficiency of strut-framed beams with optimal parameters. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48(1):141-154. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-141-154*

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.011
DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-1-141-154

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ШПРЕНГЕЛЬНЫХ БАЛОК С ОПТИМАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов
Дагестанский государственный технический университет,
367026 г. Махачкала, пр. И.Шамиля,70, Россия

Резюме. Цель. *На основании теоретических результатов, полученных в статье [17] проведён анализ влияния различных конструктивных параметров на собственный вес и стоимость металла шпренгельной балки с одной стойкой.* ***Метод.*** *Выполняются множество числовых примеров и проводятся вариантное проектирование шпренгельных балок с различными конструктивными характеристиками.* ***Результат.*** *Составлены расчетные таблицы, которые показывают эффективность шпренгельной балки с оптимальными характеристиками. Построенные таблицы позволяет делать вывод об эффективности оптимальных параметров шпренгельных балок с одной стойкой.* ***Вывод.*** *Предлагаемые методика и алгоритм свидетельствуют об эффективности рассматриваемой конструкции. Экономия стали, а также уменьшение стоимости металла шпренгельных балок с одной стойкой по сравнению с обычными балками доходит до 40%.*

Ключевые слова: *шпренгельнаяя балка, упругоподатливая опора, таблицы, стоимость, собственный вес, оптимальные параметры, алгоритм*

EFFICIENCY OF STRUT-FRAMED BEAMS WITH OPTIMAL PARAMETERS

A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, T.O. Ustarhanov
Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. *Based on the theoretical results obtained in the article [17], the analysis of the influence of various design parameters on the sole weight and cost of the metal of a single-strut-framed beam is carried out. Various tables have been compiled that show the efficiency of the strut-framed beam with optimal characteristics.* ***Methods****. Many numerical examples were carried out, and a pilot design of strut-framed beams with different design characteristics was carried out. The corresponding tables were compiled.* ***Results.*** *The constructed tables allow concluding about the effectiveness of the optimal parameters of single-strut-framed beams.* ***Conclusion****. The proposed method and algorithm indicate the effectiveness of the design. Steel savings and a reduction in the metal cost of single-strut-framed beams compared to conventional beams reach up to 40%.*

Keywords*: strut-framed beam, elasto-yielding support, tables, cost, sole weight, optimal parameters, algorithm.*

Введение. В статье [17] мы рассмотрели оптимизацию параметров шпренгельной балки. На основе теоретических исследований были получены условия, которые позволяют вычислять конструктивные параметры шпренгельных балок с одной стойкой. Результаты исследования

были представлены в виде простых лаконичных формул, удобных для пользования. В данной статье мы продолжаем исследования, связанные с оптимизацией конструктивных параметров шпренгельных балок с одной стойкой. Чтобы не повторяться, далее мы будем делать ссылки на формулы, полученные в статье [17].

Постановка задачи. С целью исследования эффективности предлагаемой методики оптимизации параметров нам необходимо рассмотреть конкретные числовые примеры подбора сечения элементов шпренгельных балок с одной стойкой. Необходимо вычислить собственный вес этих конструкций, а также стоимость металла, который тратятся для изготовления этих конструкций. Необходимо выполнить вариантное проектирование шпренгельных балок с одной стойкой.

Введём в рассмотрение 3 марки стали. Характеристики этих сталей приведены ниже в виде табл. 1.

Таблица 1. Характеристики сталей
Table 1. Characteristics of steels

№	Марка стали Steel grade	Стоимость одной тонны стали, руб. Cost of one ton of steel in rubles	Группа стали и расчётное сопротивление Steel group and design resistance
1	ВСт3пс6-1	55000	Сталь обычной прочности, Regular strength steel R_1=220 МПа
2	ВСт3пс н.обр.	40990	Сталь обычной прочности, Regular strength steel R_2=270 МПа
3	15ХСНД	59990	Сталь повышенной прочности, High strength steel R_3=330 МПа

Стоимость сталей в табл. 1 соответствует ценам, установленным на московских биржах на первое января 2020 года.

Методы исследования. Рассмотрим различные варианты прокатного широкополочного двутавра. При этом будем пользоваться сортаментом [9,10,12,13].

Вид сечения перекладины – прокатный широкополочный двутавр.

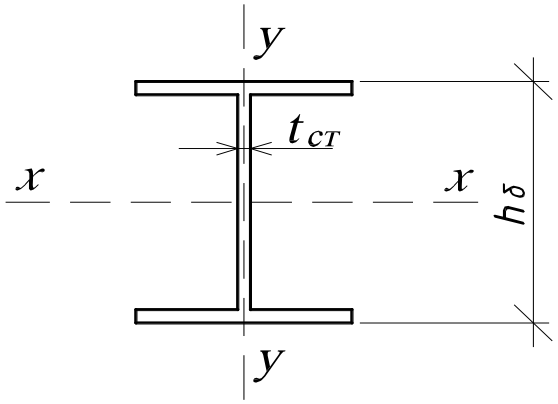

Рис. 1. Прокатный широкополочный двутавр
Fig. 1. Rolled wide-flange I-beam

В практике проектирования строительства чаще всего встречаются равномерно распределённые нагрузки [1, 3-7, 13, 16]. Обычно при расчётах шпренгельных балок используются различные приближённые методы [2, 8, 11]. Формулы, полученные в статье [17], были построены на основания использования точных методов [14, 15],

Для всех ниже рассматриваемых вариантов погонную нагрузку на перекладину примем

равномерно распределённой, q = 60 кН/м, а пролёт шпренгельной балки l = 15м. (Рис.1а и рис.2а по статье [17])

В а р и а н т 1

k = 0 , z = $\frac{5}{4}$;

широкополочный двутавр №55Б1.

Геометрические характеристики сечения:

$h_б$ = 54,52 см, A = 110 см^2 ,

погонный вес g = 86,3 кг/м ,

J_x = 54480 см^4, W_x = 2000 см^3,

статический момент половины сечения относительно нейтральной оси:

S = (27,25 см − 6,62 см) . 55 см^2 = 1134,65 см^3,

толщина стенки $t_{ст}$ = 0,92 см.

Внутренние усилия, вычисленные по формулам (15) , (23) , (24) , (26) по статье [17]:

M = 421,875 кН·м, N = 1406,25 кН, Q = 281,25 кН .

Напряжения:

$$\sigma_u = \frac{M}{W_x} = \frac{421{,}875 \text{ кН} \cdot \text{м}}{2000 \text{ см}^3} = 21{,}09 \ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} ,$$

$$\sigma_0 = \frac{N}{A} = \frac{1406{,}25 \text{ кН}}{110 \text{ см}^3} = 12{,}784 \ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} ,$$

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J_x \cdot t_{ст}} = \frac{281{,}25 \text{ кН} \cdot 1134{,}65 \text{ см}^3}{54480 \text{ см}^4 \cdot 0{,}92 \text{ см}} = 6{,}37 \ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Условие прочности на нейтральной оси (формула 34 по статье [17]):

$$\sqrt{{\sigma_0}^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(12{,}784)^2 + 3 \cdot (6{,}37)^2} = 16{,}89 \ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 33{,}0 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_з .$$

На фибровых точках (условие 35 по статье [17]) ;

$$\sqrt{(\sigma_u + \sigma_0)^2} = \sigma_u + \sigma_0 = 21{,}09 + 12{,}78 = 33{,}87 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \approx 33{,}0 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_з .$$

Перейдём к другим вариантам. Далее мы не будем давать пояснения, будем приводить только вычисления по аналогии с вариантом 1.

В а р и а н т 2

k = 0 , z = $\frac{5}{4}$;

широкополочный двутавр №70Б1.

Геометрические характеристики сечения:

$h_б$ = 69,36 см, A = 162 см^2 ,

погонный вес g = 140 кг/м ,

J_x = 146000 см^4, W_x = 3630 см^3,

S = $\left(\frac{69{,}36}{2} - 8{,}98\right) \text{см} \cdot \frac{162 \text{ см}^2}{2} = 2081{,}7 \text{ см}^3$, $t_{ст}$ = 1,15 см.

Внутренние усилия:

M = 42187,5 кН·см , N = 1406,25 кН , Q = 281,25 кН .

Напряжения:

$$\sigma_u = \frac{M}{W_x} = \frac{42187{,}5 \text{ кН} \cdot \text{см}}{3630 \text{ см}^3} = 11{,}622 \ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} ,$$

$$\sigma_0 = \frac{N}{A} = \frac{1406{,}25\ \text{кН} \cdot \text{м}}{162\ \text{см}^3} = 8{,}68\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}\ ,$$

$\tau = \frac{Q \cdot S}{J_x \cdot t_{\text{ст}}} = \frac{281{,}25\ \text{кН} \cdot 2081{,}7\ \text{см}^3}{146000\ \text{см}^4 \cdot 1{,}15\ \text{см}} = 3{,}487\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$.

Условие прочности на нейтральной оси (формула 34 по статье [17]):

$$\sqrt{{\sigma_0}^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(8{,}68)^2 + 3 \cdot (3{,}487)^2} = 10{,}575\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 22\frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_1\ .$$

На фибровых точках;

$$\sigma_u + \sigma_0 = 11{,}622 + 8{,}68 = 20{,}3\frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 22\frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_3\ .$$

В а р и а н т 3

k = 1,387·10^{-3} , z = $\frac{5}{4{,}2664}$;

широкополочный двутавр №50Б1.

Геометрические характеристики сечения:

$h_б$ = 49,51 см, A = 91,8 см^2 ,

погонный вес ρ = 72,1 кг/м ,

J_x = 37670 см^4, W_x = 1520 см^3,

Статический момент

$S = \left(\frac{49{,}51}{2} - 5{,}99\right)\text{см} \cdot \frac{91{,}8\ \text{см}^2}{2} = 861{,}31\ \text{см}^3$, $t_{\text{ст}}$ = 0,844 см.

Внутренние усилия :

M = 292 кН·м , N = 1318 кН , Q = 246 кН .

Напряжения:

$$\sigma_u = \frac{M}{W_x} = \frac{292\ \text{кН} \cdot \text{м}}{1520\ \text{см}^3} = 19{,}21\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}\ ,$$

$$\sigma_0 = \frac{N}{A} = \frac{1318\ \text{кН}}{91{,}8\ \text{см}^3} = 14{,}36\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}\ ,$$

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J_x \cdot\ t_{\text{ст}}} = \frac{264\ \text{кН} \cdot\ 861{,}31\ \text{см}^3}{37670\ \text{см}^4 \cdot\ 0{,}844\ \text{см}} = 7{,}152\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Условие прочности на нейтральной оси (формула 34 по статье [17]):

$$\sqrt{{\sigma_0}^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(14{,}36)^2 + 3 \cdot (7{,}152)^2} = 18{,}96\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 33\frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_1\ .$$

На фибровых точках ;

$$\sigma_u + \sigma_0 = 19{,}91 + 14{,}36 = 33{,}57\frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 33\frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_3 - \text{приближённо.}$$

В а р и а н т 4

k = 1,387·10^{-3} , z = $\frac{5}{4{,}2664}$;

широкополочный двутавр №55Б1.

Геометрические характеристики сечения:

по первому варианту.

Внутренние усилия :

по третьему варианту.

Напряжения:

$$\sigma_u = \frac{M}{W_x} = \frac{292\ \text{кН} \cdot \text{м}}{2000\ \text{см}^3} = 14{,}6\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}\ ,$$

$$\sigma_0 = \frac{N}{A} = \frac{1318\ \text{кН}}{110\ \text{см}^3} = 11{,}982\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}\ ,$$

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J_x \cdot\ t_{\text{ст}}} = \frac{264\ \text{кН} \cdot\ 1134{,}65\ \text{см}^3}{54480\ \text{см}^4 \cdot\ 0{,}92\ \text{см}} = 5{,}976\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Условие прочности на нейтральной оси :

$$\sqrt{{\sigma_0}^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(11{,}982)^2 + 3 \cdot (5{,}976)^2} = 15{,}834\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 27\frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_2\ .$$

На фибровых точках ;

$$\sigma_u + \sigma_0 = 14{,}6 + 11{,}982 = 26{,}582\frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 27\frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_2\ .$$

В а р и а н т 5

k = 0 , z = $\frac{5}{4}$;

широкополочный двутавр №60Б1.

Геометрические характеристики сечения:

$h_б$ = 59,42 см, A = 131 $см^2$,

погонный вес ρ = 103 кг/м ,

J_x = 77430 $см^4$, W_x = 2610 $см^3$,

Статический момент:

$S = \left(\frac{59{,}42}{2} - 7{,}18\right)\text{см} \cdot \frac{131\ \text{см}^2}{2} = 1468{,}956\ \text{см}^3$, $t_{ст}$ = 1 см.

Внутренние усилия по второму варианту.

Напряжения:

$$\sigma_u = \frac{M}{W_x} = \frac{421\ \text{кН} \cdot \text{м}}{2610\ \text{см}^3} = 16{,}13\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}\ ,$$

$$\sigma_0 = \frac{N}{A} = \frac{1406{,}25\ \text{кН}}{131\ \text{см}^2} = 16{,}13\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}\ ,$$

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J_x \cdot\ t_{\text{ст}}} = \frac{281\ \text{кН} \cdot\ 1468{,}956\ \text{см}^3}{77430\ \text{см}^4 \cdot\ 1\ \text{см}} = 5{,}33\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Условие прочности на нейтральной оси:

$$\sqrt{{\sigma_0}^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(10{,}735)^2 + 3 \cdot (5{,}33)^2} = 14{,}159\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 27\frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_2\ .$$

На фибровых точках ;

$$\sigma_u + \sigma_0 = 16{,}13 + 10{,}735 = 26{,}865\frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 27\frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_2\ .$$

В а р и а н т 6

k = $1{,}387 \cdot 10^{-3}$, z = $\frac{5}{4{,}2664}$;

широкополочный двутавр №60Б1.

Геометрические характеристики сечения:

по варианту 5.

Внутренние усилия по варианту 3.

Напряжения:

$$\sigma_u = \frac{M}{W_x} = \frac{29200\ \text{кН} \cdot \text{см}}{2610\ \text{см}^3} = 11{,}188\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}\ ,$$

$$\sigma_0 = \frac{N}{A} = \frac{1318\ \text{кН}}{131\ \text{см}^2} = 10{,}061\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}\ ,$$

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J_x \cdot t_{\text{ст}}} = \frac{264\ \text{кН} \cdot 1468{,}956\ \text{см}^3}{77430\ \text{см}^4 \cdot 1\ \text{см}} = 5{,}008\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Условие прочности на нейтральной оси:

$$\sqrt{{\sigma_0}^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(10{,}061)^2 + 3 \cdot (5{,}008)^2} = 13{,}284\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 22\frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_1\ .$$

На фибровых точках ;

$$\sigma_u + \sigma_0 = 11{,}188 + 10{,}061 = 21{,}249\frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 22\frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_1\ .$$

Из рис.2в по статье [17] следует, что при коэффициенте жёсткости r = 0 шпренгельная балка переходит в обычную однопролётную балку, то есть отсутствуют стойка и затяжки, показанные на рис.1 по статье [17].

Из формулы (14) по статье [17] следует при $r \to 0$ коэффициент $k \to \infty$. При $k \to \infty$ (в обычной балке) максимальный изгибающий момент (рис.2в по статье [17]).

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{60\frac{\text{кН}}{\text{м}} \cdot (15\text{м})^2}{8} = 168700\ \text{кН} \cdot \text{см}\ .$$

Моменты сопротивления изгибу сечения широкополочного прокатного двутавра из сталей, приведённых в табл. 1, даны ниже:

1. $W_x = \frac{M}{R_1} = \frac{168700\ \text{кН·см}}{22\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}} = 7213\ \text{см}^3$,

2. $W_x = \frac{M}{R_2} = \frac{168700\ \text{кН·см}}{27\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}} = 6174\ \text{см}^3$,

3. $W_x = \frac{M}{R_1} = \frac{168700\ \text{кН·см}}{33\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}} = 5116\ \text{см}^3$.

По сортаменту [1] , [4] , подбираем сечения (номера) прокатного широкополочного двутавра:

1. №100Б1 с $W_x = 8940\ \text{см}^3 > 7213{,}6\ \text{см}^3$.

Погонный вес $\rho = 227\ \frac{\text{кг}}{\text{м}}$,

общий вес балки $\rho \cdot l = 227\ \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 3405$ кг.

2. №90Б1 с $W_x = 6920\ \text{см}^3 > 6174\ \text{см}^3$.

Погонный вес $\rho = 193\ \frac{\text{кг}}{\text{м}}$,

общий вес балки $\rho \cdot l = 193\ \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 2895$ кг.

3. №90Б1 с $W_x = 6920\ \text{см}^3 > 5116{,}1\ \text{см}^3$.

Погонный вес $\rho = 193\ \frac{\text{кг}}{\text{м}}$,

общий вес балки $\rho \cdot l = 193\ \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 2895$ кг.

Итак, мы рассмотрели 9 вариантов балок. Для наглядности подведем результаты.

Обычная (не шпренгельная) балка (широкополочный прокатный двутавр) :

$k \to \infty$, $z \to 0$.

1. №100Б1 $R_1 = 22\ \text{кН/см}^2$, $\rho = 227$ кг/м.

Общий вес балки 3405 кг.

2. №90Б1 $R_2 = 27\ \text{кН/см}^2$, $\rho = 193$ кг/м.

Общий вес балки 2895 кг.

3. №90Б1 $R_3 = 33\ \text{кН/см}^2$, $\rho = 193$ кг/м.

Общий вес балки 2895 кг.

При k = 0 , z = $\frac{5}{4}$ перекладины шпренгельной балки рассчитываются по упрощённой расчётной схеме (Рис.1в по статье [17]) . На рис.1в пружина − абсолютно жёсткая: балка двухпролётная ($r \to \infty$) .

1. №70Б1 $R_1 = 22$ кН/см^2 , $\rho = 140$ кг/м.

Общий вес перекладины $\rho \cdot l = 140$ кг/м · 15 = 2100 кг.

2. №60Б1 $R_2 = 27$ кН/см^2 , $\rho = 103$ кг/м.

Общий вес перекладины 1545 кг.

3. №55Б1 $R_2 = 33$ кН/см^2 , $\rho = 86{,}3$ кг/м.

Общий вес перекладины 1294,5 кг.

Далее: по рис.1б по статье [17]

Шпренгельная балка имеет оптимизированные параметры:

k = $1{,}387 \cdot 10^{-3}$, z = $\frac{5}{4{,}2664}$;

1. №60Б1 $R_1 = 22$ кН/см^2 , $\rho = 103$ кг/м.

Общий вес перекладины $\rho \cdot l = 103$ кг/м · 15 м = 1545 кг.

2. №55Б1 $R_2 = 27$ кН/см^2 , $\rho = 86{,}3$ кг/м.

Общий вес перекладины 1294,5 кг.

3. №50Б1 $R_2 = 33$ кН/см^2 , $\rho = 72{,}1$ кг/м.

Общий вес перекладины 1081,5 кг.

Теперь перейдём к вычислению массы затяжек и стойки шпренгельной балки (рис.1а по статье [17]) .

Вариант, когда k = 0 , z = $\frac{5}{4}$.

Из формул (15) и (16) по статье [17] следует, что усилие в затяжке

$F_3 = 1.56 \cdot q \cdot l$

Найдём площадь сечения затяжки

$$A_3 = \frac{F_3}{R_2} = \frac{1{,}56 \cdot 60 \ \frac{\text{кН}}{\text{м}} \cdot 15\text{м}}{27 \ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}} = 52 \cdot 10^{-4} \ \text{м}^2 .$$

При k = $1{,}387 \cdot 10^{-3}$, z = $\frac{5}{4{,}2664}$, по формулам (15) и (16) по статье [17] находим $F_3 = 1.46 \cdot q \cdot l$,

$$A_3 = \frac{1.46 \cdot q \cdot l}{R_2} = \frac{1{,}46 \cdot 60 \ \frac{\text{кН}}{\text{м}} \cdot 15\text{м}}{27 \ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}} = 48{,}66 \cdot 10^{-4} \ \text{м}^2 .$$

Аналогично вычисляется площадь сечения затяжки при $R = R_1$ и $R = R_2$.

Геометрическая длина l_3 одной затяжки (по рис.1а по статье [17])

$$l_3 = \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + h^2} = \sqrt{\left(\frac{15\text{м}}{2}\right)^2 + (0{,}1 \cdot 15\text{м})^2} = 7{,}65\text{м}.$$

Длина двух затяжек $2 \cdot l_3 = 15{,}3$м.

При k = 0 вес двух затяжек равен

$2 \cdot l_3 \cdot A_3 \cdot 7850$ кг/м^3 = 15,3 м · 52 · 10^{-4} м^2 · 7850 кг/м^3 = 0,6245 т = 624,5кг.

При k = $1{,}387 \cdot 10^{-3}$ вес двух затяжек

$2 \cdot l_3 \cdot A_3 \cdot 7850$ кг/м^3 = 15,3 м · 48,66 · 10^{-4} м^2 · 7850 кг/м^3 = 0,5845 т = =584,5кг.

Стойка.

Длина стойки (рис.1а по статье [17]) $l_{ст} \approx h$.

По конструктивным соображениям выше было принято $\frac{h}{l} = 0{,}1$.

С учётом этого определим длину стойки $l_{ст} = 0{,}1 \cdot l = 0.1 \cdot 15$м .

Из условия равновесия узла (рис.3 по статье [17]) следует, что усилие в стойке

$$F_0 = 2 \cdot F_3 \cdot sin\alpha = 2 \cdot F_3 \cdot \frac{h}{\frac{l}{2}} = 4 \cdot F_3 \cdot \frac{h}{l} = 4 \cdot F_3 \cdot 0{,}1 = 0{,}4 \cdot F_3 .$$

Как было показано выше, усилие в затяжке: при k = 0
$F_3 = 1.56 \cdot q \cdot l$, при k = $1{,}387 \cdot 10^{-3}$ $F_3 = 1.46 \cdot q \cdot l$.

С учётом этого усилие в стойке найдём в двух вариантах:

при k = 0 $F_0 = 0{,}4 \cdot 1{,}56 \cdot q \cdot l$;
при k = $1{,}387 \cdot 10^{-3}$

$$F_0 = 0{,}4 \cdot F_3 = 0{,}4 \cdot 1{,}56 \cdot q \cdot l = 0{,}4 \cdot 1{,}56 \cdot 60 \frac{\text{кН}}{\text{м}} \cdot 15 \text{ м} = 525{,}6\text{кН}$$

Площадь сечения стойки при k = 0

$$A_{ст} = \frac{F_0}{R_2} = \frac{561.6 \text{ кН}}{27 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}} \approx 21 \text{ см}^2 ,$$

при k = $1{,}387 \cdot 10^{-3}$

$$A_{ст} = \frac{F_0}{R_2} = \frac{525{,}6 \text{ кН}}{27 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}} \approx 19 \text{ см}^2 .$$

Сечение стойки удобно назначать по конструктивным соображениям. Поэтому примем приближённо $A_{ст} \approx 52 \text{ см}^2 = 52 \cdot 10^{-4} \text{м}^2$

Поскольку длина стойки $l_{ст} \approx h$ – незначительна, то принятая выше площадь не окажет влияния на сравнительный анализ.

Вес стойки:

$$l_{ст} \cdot A_{ст} \cdot 7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 0{,}1 \cdot 15 \text{ м} \cdot 52 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 61{,}2 \text{ кг}$$

Общий вес двух затяжек и стойки при k = 0
0,6245 т + 61,2 кг = 0,6857 т ;
при k = $1{,}387 \cdot 10^{-3}$
0,5845 т + 61,2 кг = 0,6457 т .

Обсуждение результатов. На основании приведённых выше примеров ниже составлены таблицы (2-7), которые позволяют проводить анализ рассмотренных выше вариантов. По расчётной схеме рис.1б. по статье [17] k = $1{,}387 \cdot 10^{-3}$, z = $\frac{5}{4{,}2664}$

Таблица 2. Характеристики шпренгельных балок
Table 2. Characteristics of truss beams

№	Марка стали Steel grade	Стоимость одной тонны стали, руб. Cost of one ton of steel in rubles	Группа стали и расчётное сопротивление Steel group and design resistance	Номер широкополочного двутавра Wide beam I-beam number	Вес одного погонного метра и общий вес перекладины Weight of one running meter and total weight of the crossbar	Стоимость одного погонного метра и общая стоимость перекладины, руб. The cost of one running meter and the total cost of the crossbar
1	ВСт3пс6-1	55000	Сталь обычной прочности, Regular strength steel R_1=220 МПа	60Б1	103 кг/м. 103 · 15 = 1545кг	5665 84975
2	ВСт3пс6-2 н.обр	41000	Сталь обычной прочности, Regular strength steel R_2=270 МПа	55Б1	86,3 кг/м. 86,3 · 15 = =1294,3 кг	3638,3. 54574,5
3	15ХСНД	60000	Сталь повышенной прочности, High strength steel R_3=330 МПа	50Б1	72,1 кг/м. 72,1 · 15 = =1081,5 кг	4326 64890

С учётом веса и стоимости стойки и затяжек табл. 2 уточняем (табл. 3).

Таблица 3. Вес и стоимость шпренгельной балки
Table 3. Weight and cost of truss girder

№	Вес шпренгельной балки, кг Truss beam weight, kg	Стоимость шпренгельной балки, руб. Truss beam cost, rub
1	2191	111448
2	1938	81048,2
3	1727	91364

По расчётной схеме рис.1в. по статье [17] k = 0, z = $\frac{5}{4}$

Таблица 4. Характеристики шпренгельных балок
Table 4. Characteristics of truss beams

№	Марка стали Steel grade	Стоимость одной тонны стали, руб. Cost of one ton of steel in rubles	Группа стали и расчётное сопротивление Steel group and design resistance	Номер широкополочного двутавра Wide beam I-beam number	Вес одного погонного метра и общий вес перекладины Weight of one running meter and total weight of the crossbar	Стоимость одного погонного метра и общая стоимость перекладины, руб. The cost of one running meter and the total cost of the crossbar
1	ВСт3пс6-1	55000	Сталь обычной прочности, Regular strength steel R_1=220 МПа	60Б1	103 кг/м. 1545кг	5665. 84975.
2	ВСт3пс6-2 н.обр	41000	Сталь обычной прочности, Regular strength steel R_2=270 МПа	55Б1	86,3 кг/м. 1294,3 кг	3638,3. 54574,5.
3	15ХСНД	60000	Сталь повышенной прочности, High strength steel R_3=330 МПа	50Б1	72,1 кг/м. 1081,5 кг	4326. 64890.

С учётом веса и стоимости стойки и затяжек табл. 4 уточняем (табл. 5)

Таблица 5. Вес и стоимость шпренгельной балки
Table 5. Weight and cost of truss girder

№	Вес шпренгельной балки, кг Truss beam weight, kg	Стоимость шпренгельной балки, руб. Truss beam cost, rub
1	2785,7	144664
2	2231	91459
3	1980	111784

По расчётной схеме рис.1г. по статье [17] $k \to \infty$, $r \to 0$

Таблица 6. Характеристики шпренгельных балок
Table 6. Characteristics of truss beams

№/№	Марка стали Steel grade	Стоимость одной тонны стали, руб. Cost of one ton of steel in rubles	Группа стали и расчётное сопротивление Steel group and design resistance	Номер широкополочного двутавра Wide beam I-beam number	Вес одного погонного метра и общий вес перекладины Weight of one running meter and total weight of the crossbar	Стоимость одного погонного метра и общая стоимость перекладины, руб. The cost of one running meter and the total cost of the crossbar
1	ВСт3пс6-1	55000	Сталь обычной прочности, Regular strength steel R_1=220 МПа	100Б1	227 кг/м. 3405кг	12485 187275
2	ВСт3пс6-2 н.обр	41000	Сталь обычной прочности, Regular strength steel R_2=270 МПа	90Б1	193 кг/м. 2895 кг	8913,0. 133695.
3	15ХСНД	60000	Сталь повышенной прочности, High strength steel R_3=330 МПа	90Б1	193 кг/м. 2895 кг	11580 173700

На основании составленных выше вычислений скомпонуем сводную табл. 7.

Таблица 7. Эффективность шпренгельных балок с оптимизированным значением
Table 7. Efficiency of truss girders with optimized value

№	Марка стали Steel grade	Значение коэффициента Coefficient value "K"	Вес конструкции в целом в кг Weight of the structure as a whole in kg	Стоимость металла всей конструкции в руб. Cost of the metal of the entire structure	Процентное соотношение в весе Percentage in weight, %	Процентное соотношение в стоимости % Percentage in value %
1	ВСт3пс6-1 R_1=220 МПа	k = 0	2785,7	144664	81,8	77,25
		$1{,}387 \cdot 10^{-3}$	**2191**	**111448**	**64,35**	**59,50**
		$k \to \infty$	3405	187275	100	100
2	ВСт3пс6-2 н.обр R_2=270 МПа	k = 0	2231	91459	77,1	68,3
		$1{,}387 \cdot 10^{-3}$	**1938**	**81048**	**68,2**	**60,2**
		$k \to \infty$	2895	133695	100	100
3	15ХСНД R_3=330 МПа	k = 0	1980	111784	69,39	67,8
		$1{,}387 \cdot 10^{-3}$	**1727**	**91364**	**59,65**	**52,6**
		$k \to \infty$	2895	173700	100	100

Вывод. Из табл. 7 видно, что шпренгельные балки с оптимизированным значением коэффициента «k» ($k = 1{,}387 \cdot 10^{-3}$) рациональны как по затрате металла, так и по стоимости.

Шпренгельные балки с оптимизированными параметрами легче и дешевле по расходу металла примерно на 40% по сравнению с обычными балками**.** Причём это наблюдается для всех марок сталей, рассмотренных выше. Поэтому мы рекомендуем проектировать шпренгельные балки, для которых коэффициент $k = 1{,}387 \cdot 10^{-3}$.

Результаты исследования работы шпренгельных балок, приведенные в статье [17] и в настоящей методике, могут найти широкое применение при проектировании таких конструкций.

Библиографический список:

1. Акаев Н.К., Юсупов А.К. Алгоритм расчета шпренгельных подкрановых балок. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 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. Клыков В.М., Я.М. Лихтарников Расчет стальных конструкций. М.:75г. С.30-41.
4. 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.
5. Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Юсупов А.К. Разработка и исследование шпренгельных балок новой раскройки. Сб.V Международной научно-практической конференции "Научные исследования: от теории к практике". Технические науки. Том 2. Г. Чебоксары. 2015. С.62-70.
6. Металлические конструкции. Под редакцией Е.И. Беленя, Москва, Стройиздат, 1986 г. С.382-384.
7. Металлические конструкции. Под редакцией Ю.И. Кудишина, Москва, Академия, 2011г. С.439-442.
8. Пат. 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.
9. Стальные конструкции. Справочник конструктора. Под ред. Мельникова Н.П. М.: Стройиздат,1980. С.195-196.
10. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». М.: Стандартинформ, 2017. АО "НИЦ "Строительство" – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 92 с.
11. Устарханов О.М., Юсупов А.К., Муселемов Х.М. Шпренгельные подкрановые балки. Махачкала: ДГТУ, 2016. 120 с.
12. Ф. Харт (Мюнхен), В. Хенн (Брауншвайг), Х. Зонтаг (Берлин), Москва, Стройиздат, 1977г. «Атлас стальных конструкций». С. 37-84
13. Юсупов А.К. «Металлические конструкции в вопросах, в ответах и в проектировании». Махачкала, Дагестанский государственный технический университет. ГУП «Типография ДНЦ РАН» , 2010.
14. Юсупов А.К. «Методы прикладной математики в строительной механике», том 1. Махачкала, Дагестанский государственный технический университет. ГУП «Типография ДНЦ РАН» , 2008.
15. Юсупов А.К. «Методы прикладной математики в строительной механике», том 4. Махачкала, Дагестанский государственный технический университет. ГУП «Типография ДНЦ РАН» , 2008.
16. Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О., Джалалов Ш.Г. «Исследование металлодеревянной балки». «Вестник Машиностроения», №12, 2019.
17. Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О. Оптимизация параметров шпренгельной балки. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки, Том 47, №4, 2020 г. С.119-131.

References:

1. Akayev N.K., Yusupov A.K. Algoritm rascheta shprengel'nykh podkranovykh balok. VESTNIK DGTU, Tom 42, №3, 2016 g. C.119-131. [Akaev N.K., Yusupov A.K. Algorithm for calculating truss crane beams. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences, Vol.42, No. 3, 2016. pp.119-131. (In Russ)]
2. Azhermachev S.G. Priblizhennyy metod rascheta shprengel'nykh podkranovykh balok. Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'. Vypusk 37, 2011 g. C.34-39. [Azhermachev S.G. Approximate method for calculating truss crane beams. Construction and man-made safety. Issue 37, 2011. pp.34-39. (In Russ)]
3. Klykov V.M., YA.M. Likhtarnikov Raschet stal'nykh konstruktsiy. M–75g. C.30-41. [Klykov VM, Ya.M. Likhtarnikov Calculation of steel structures. M.:75g. pp.30-41. (In Russ)]

4. Livandovskiy N.N., Bogatyreva I.V. Usileniye zhelezobetonnykh balok shprengel'nymi zatyazhkami i vlozhennymi shprengelyami. XII mezhdunarodnaya konferentsiya studentov i molodykh uchenykh «perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk» Rossiya, Tomsk, 21-24 aprelya 2015 g. S.1338-1340. [Livandovsky N.N., Bogatyreva I.V. Reinforcement of reinforced concrete beams with truss ties and embedded trusses. XII International Conference of Students and Young Scientists "Prospects for the Development of Fundamental Sciences" Russia, Tomsk, April 21-24, 2015. pp.1338-1340. (In Russ)]
5. Muselemov KH.M., Ustarkhanov O.M., Yusupov A.K. Razrabotka i issledovaniye shprengel'nykh balok novoy raskroyki. V Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauchnyye issledovaniya: ot teorii k praktike". Tekhnicheskiye nauki. Tom 2. G. Cheboksary. 2015. s.62-70. [Muselemov Kh.M., Ustarkhanov O.M., Yusupov A.K. Development and research of new cut truss beams. V International scientific-practical conference "Scientific research: from theory to practice". Technical science. Vol. 2.G. Cheboksary. 2015. pp.62-70. (In Russ)]
6. Metallicheskiye konstruktsii» – pod redaktsiyey Ye.I. Belenya, Moskva, Stroyizdat, 1986 g. C.382-384. [Metal structures. Edited by E.I. Belenya, Moscow, Stroyizdat, 1986, pp. 382-384. (In Russ)]
7. Metallicheskiye konstruktsii» - pod redaktsiyey YU.I. Kudishina, Moskva, Akademiya, 2011g. C.439-442. [Metal structures. Edited by Yu.I. Kudishina, Moscow, Academy, 2011 pp.439-442. (In Russ)]
8. Pat. 130333 RF. MPK E04G 23/02. Shprengel' dlya usileniya i obespecheniya zhivuchesti izgibayemogo zhelezobetonnogo elementa / V.S. Plevkov, G.I. Odnokopylov, I.V. Bogatyreva. Zayavleno 08.02.2013; Opubl. 20.07.2013, Byul. № 20. 5 s. [Pat. 130333 RF. IPC E04G 23/02. Sprengel for strengthening and ensuring the survivability of a bent reinforced concrete element / V.S. Plevkov, G.I. Odnokopylov, I.V. Bogatyrev. Stated 02/08/2013; Publ. 20.07.2013, Bul. No. 20. 5 p. (In Russ)]
9. Stal'nyye konstruktsii. Spravochnik konstruktora. Pod red. Mel'nikova N.P. M.: Stroyizdat,1980. C.195-196. [Steel structures. Constructor reference. Ed. Melnikova N.P. M .: Stroyizdat, 1980. pp.195-196. (In Russ)]
10. SP 16.13330.2017 «Stal'nyye konstruktsii». M.: Standartinform, 2017. AO "NITS "Stroitel'stvo" TSNIISK im. V.A. Kucherenko, 92 s. [SP 16.13330.2017 "Steel structures". M .: Standartinform, 2017. JSC "Research Center" Construction "- TsNIISK named after V.A.Kucherenko, 92 p. (In Russ)]
11. Ustarkhanov O.M., Yusupov A.K., Muselemov KH.M. Shprengel'nyye podkranovyye balki. Makhachkala: DGTU, 2016. 120 s. [Ustarkhanov OM, Yusupov AK, Muselemov Kh.M. Sprengel crane beams. Makhachkala: DSTU, 2016.120 p. (In Russ)]
12. F. Khart (Myunkhen), V. Khenn (Braunshvayg), KH. Zontag (Berlin), Moskva, Stroyizdat, 1977g. «Atlas stal'nykh konstruktsiy». S. 37-84 [F. Hart (Munich), W. Henn (Braunschweig), H. Sontag (Berlin), Moscow, Stroyizdat, 1977. "Atlas of Steel Structures". pp. 37-84 (In Russ)]
13. Yusupov A.K. «Metallicheskiye konstruktsii v voprosakh, v otvetakh i v proyektirovanii». Makhachkala, Dagestanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet. GUP «Tipografiya DNTS RAN» , 2010. [Yusupov A.K. "Metal structures in questions, answers and design." Makhachkala, Daghestan State Technical University. State Unitary Enterprise "Printing House of the DSC RAS", 2010. (In Russ)]
14. Yusupov A.K. «Metody prikladnoy matematiki v stroitel'noy mekhanike», tom 1. Makhachkala, Dagestanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet. GUP «Tipografiya DNTS RAN» , 2008. [Yusupov A.K. "Methods of Applied Mathematics in Structural Mechanics", Volume 1. Makhachkala, Daghestan State Technical University. State Unitary Enterprise "Printing House of the DSC RAS", 2008. (In Russ)]
15. Yusupov A.K. «Metody prikladnoy matematiki v stroitel'noy mekhanike», tom 4. Makhachkala, Dagestanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet. GUP «Tipografiya DNTS RAN» , 2008. [Yusupov A.K. "Methods of Applied Mathematics in Structural Mechanics", Volume 4. Makhachkala, Daghestan State Technical University. State Unitary Enterprise "Printing House of the DSC RAS", 2008. (In Russ)]
16. Yusupov A.K., Muselemov KH.M., Ustarkhanov T.O., Dzhalalov SH.G. «Issledovaniye metalloderevyannoy balki». «Vestnik Mashinostroyeniya», №12, 2019 [Yusupov A.K., Muselemov H.M., Ustarkhanov T.O., Dzhalalov Sh.G. "Study of a metal-wood beam". "Bulletin of Mechanical Engineering", No. 12, 2019. (In Russ)]
17. Yusupov A.K., Muselemov KH.M., Ustarkhanov T.O. Optimizatsiya parametrov shprengel'noy balki. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki, Tom 47, №4, 2020. s.119-131.[Yusupov A.K., Muselemov H.M., Ustarkhanov T.O. Optimization of truss beam parameters. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences, Vol. 47, No. 4, 2020 pp.119-131(In Russ)]

Сведения об авторах:

Юсупов Абусупян Курашевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; e-mail: hairulla213@mail.ru

Муселемов Хайрулла Магомедмурадович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; e-mail: hairulla213@mail.ru

Устарханов Тагир Османович, ассистент, кафедра «Строительные материалы и инженерные сети»; e-mail: hairulla213@mail.ru

Information about the authors:

Abusupyan K.Yusupov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures, e-mail: hairulla213@mail.ru

Khairulla M.Muselemov, Cand.Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures, e-mail: hairulla213@mail.ru

Tagir O. Ustarkhanov, Assistant, Department of Building Materials and Engineering Networks, e-mail: hairulla213@mail.ru

Конфликт интересов.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Поступила в редакцию 29.11.2020.
Принята в печать 19.01.2021.

Conflict of interest.
The authors declare no conflict of interest.
Received 29.11.2020.
Accepted for publication 19.01.2021.