

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.011

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-1-156-172

Оригинальная статья/Original Paper

Исследование эффективности шпренгельных балок с двумя стойками

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов

Дагестанский государственный технический университет,
367026 г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является оценка эффективности шпренгельных балок с двумя стойками. **Метод.** Выполняются множество числовых примеров и проводятся варианты проектирования шпренгельных балок с различными конструктивными характеристиками. Составляются соответствующие таблицы. **Результат.** Проведён анализ влияния различных конструктивных параметров на собственный вес и стоимость металла шпренгельной балки с двумя стойками. Составлены различные таблицы, которые показывают эффективность шпренгельной балки с оптимальными характеристиками. Построенные таблицы позволяют делать вывод об эффективности оптимальных параметров шпренгельных балок с двумя стойками. **Вывод.** Предлагаемые методика и алгоритм свидетельствуют об эффективности рассматриваемой конструкции. Экономия стали, а также уменьшение стоимости металла шпренгельных балок с двумя стойками по сравнению с обычными балками достигает до 40-50%.

Ключевые слова: шпренгельная балка, упруго-податливая опора, таблицы, стоимость, собственный вес, оптимальные параметры, алгоритм

Для цитирования: А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов. Исследование эффективности шпренгельных балок с двумя стойками. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49 (1):156-172. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-156-172

Study of the effectiveness of trussed beams with two posts

A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, T.O. Ustarhanov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to evaluate the effectiveness of trussed beams with two posts. **Method.** Many numerical examples are carried out and variant design of trussed beams with various structural characteristics is carried out. Appropriate tables are compiled. **Result.** The analysis of the influence of various design parameters on the own weight and the cost of the metal of a trussed beam with two posts was carried out. Various tables have been compiled that show the effectiveness of a trussed beam with optimal characteristics. The constructed tables allow us to draw a conclusion about the effectiveness of the optimal parameters of trussed beams with two posts. **Conclusion.** The proposed technique and algorithm testify to the effectiveness of the considered design. Saving steel, as well as reducing the cost of metal of trussed beams with two posts compared to conventional beams, reaches 40-50%.

Keywords: trussed beam, elastically compliant support, tables, cost, own weight, optimal parameters, algorithm

For citation: A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, T.O. Ustarhanov. Study of the effectiveness of trussed beams with two posts. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(1): 156-172. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-156-172.

Введение. Данная статья является продолжением результатов проведенных исследований, решающих проблемы оптимизации параметров шпренгельных балок с одной стойкой [1, 2] и оптимизацию параметров шпренгельной балки с двумя стойками [3]. На основе теоретических исследований были получены условия, которые позволяют вычислять конструктивные параметры шпренгельных балок с двумя стойками. Результаты исследования были представлены в виде простых лаконичных формул, удобных для пользования. В настоящей статье мы продолжаем исследования, связанные с оптимизацией конструктивных параметров шпренгельных балок с двумя стойками. Чтобы не повторяться, далее мы будем делать ссылки на рисунки и формулы, полученные в статье [3].

Постановка задачи. Пусть шпренгельная балка [3, рис.1] имеет пролёт $l = 15\text{м}$. Погонная нагрузка – равномерно распределённая: $q = 60 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$.

Рассмотрим три варианта расчётной схемы.

Первый вариант:

расчётная схема – упрощённая [3, рис. 2б]; коэффициент жёсткости $r \rightarrow \infty$, $k = 0$.

Второй вариант:

расчётная схема – уточнённая [3, рис 2а)]; коэффициент жёсткости r определяется по формуле (54) [3] при $k = 0,7 \cdot 10^{-3}$ ($z = 0,362$).

Третий вариант:

расчётная схема – обычная балка без шпренгеля [3, рис. 2в)]; коэффициент жёсткости $r = 0$, $k \rightarrow \infty$.

Для всех трёх вариантов балки, о которых говорилось выше, вычислим изгибающий момент M и поперечную силу Q в расчётном сечении перекладины; определим усилие N в стойке; найдём усилия в затяжке N_k и N_r (обозначения указаны на [3, рис. 5], а так же вычислим осевое усилие сжатия F перекладины [3, рис. 6],

Методы исследования:

Первый вариант, расчётная схема– [3, рис. 2.б):

коэффициент

$$\kappa=0; \quad z = \frac{11}{30} = \frac{1}{2,72};$$

По формуле (39) [3]: $z = \frac{11}{30};$

По формуле (47) [3]: $M = \frac{ql^2}{90};$

Поперечная сила: $Q = -qlz + \frac{ql}{6};$

При $z = \frac{11}{30}$ изгибающий момент:

$$M = -\frac{ql^2}{90} = -\frac{60\text{кН/м} \cdot (15\text{м})^2}{90} = 150 \text{ кНм};$$

Поперечная сила:

$$Q = -ql - \frac{1}{5} = -60 \text{ кН/м} \cdot 15\text{м} \cdot \frac{1}{5} = -180 \text{ кН};$$

По формулам (19-21) [3] и формуле (14) [3], в частном случае по формуле (31) [3], найдём усилие в стойке:

$$N_1 = N_2 = N = \frac{ql}{2,72 + 80k} = \frac{60\text{кН/м} \cdot 15\text{м}}{2,72} = 367 \text{ кН};$$

$N = 367 \text{ Кн};$

$$N_k = \frac{N_1}{\sin \alpha} \cdot \sin \alpha = \frac{h}{\sqrt{\left(\frac{l}{3}\right)^2 + h^2}};$$

Примем $h \approx 0,1 \cdot l = 0,1 \cdot 15\text{м} = 1,5\text{м};$

Тогда: $\sin \alpha = \frac{1,5}{\sqrt{\left(\frac{15M}{3}\right)^2 + (15M)^2}} = 0,285; \quad N_k = \frac{367кН}{0,258} = 1422кН;$

По формуле (20) [3]:

$$N_{\Gamma} = N \cdot \frac{l/3}{h} = N \cdot \frac{l/3}{l/10} = 3,33 \cdot N = 3,33 \cdot 367кН = 1222кН$$

По формуле (21) [3]:

$$F = -N_k \cdot \cos \alpha = -1422кН \cdot 0,952 = -1369,7кН$$

Выпишем все полученные значения усилий :

при $\kappa=0; \quad z = \frac{11}{30};$

$$\left\{ \begin{array}{l} M = 150 кН \cdot м; \\ Q = 180 кН; \\ F = -1369,7 кН; \\ N = 367кН; \\ N_k = 1422кН; \\ N_{\Gamma} = 1222кН. \end{array} \right. \quad (57)$$

расчетная схема – [3, рис. (2.а)];

Второй вариант – оптимизированный:

Коэффициенты

$$\kappa = 0,524 \cdot 10^{-3}; \quad z = 0,362.$$

По формуле (48) [3]:

$$M = \frac{ql^2}{9} (3z - 1) = \frac{60кН/м \cdot 15м}{9} \cdot (3 \cdot 0,367 - 1) = \frac{60 \cdot 225кНм}{104,64} = -129кНм;$$

$$M = -129 кНм;$$

При $z = 0,369$

$$Q = -qlz + \frac{ql}{6} = ql \cdot \left(\frac{1}{6} - z\right) = 60 кН/м \cdot 15м \cdot (0,166 - 0,362) = -966кН \cdot 0,196 = 176,4кН;$$

$$Q = 176,4кН.$$

По формуле (31) [3]:

$$N = \frac{ql}{2,72 + 80\kappa} = \frac{60кН/м \cdot 15м}{2,72 + 80 \cdot 0,524 \cdot 10^{-3}} = \frac{900кН}{2,72 + 4,192 \cdot 10^{-2}} = \frac{900кН}{2,76192} = 322,2кН;$$

$$N = 322,2 кН.$$

$$N_k = \frac{N}{\sin \alpha} = \frac{322,2кН}{0,258} = 1130 кН;$$

$$N_k = 322,2кН.$$

По формуле (20) [3], при $h = \frac{l}{10} :$

$$N_{\Gamma} = N \cdot \frac{l/3}{h} = 322,2кН \cdot 3,33 = 1072,9кН$$

По формуле (21) [3]:

$$F = -N_k \cdot \cos \alpha = -1130кН \cdot 0,952 = -1074,76кН.$$

Выпишем все полученные значения усилий:

при $\kappa = 0,524 \cdot 10^{-3}; \quad z = 0,362.$

$$\left\{ \begin{array}{l} M = -129 кНм; \\ F = -1074,76 кН; \\ N = 322,2 кН; \\ N_k = 1130кН; \\ N_{\Gamma} = 1072,9кН; \end{array} \right. \quad (58)$$

Третий вариант, расчетная схема – [3, рис. 2.в]:

$\kappa \rightarrow \infty$: по формуле (39) [3]: $z = 0$.

Это случай – обычной балки (без шпренгеля). Есть только перекладина (расчетная схема – рис. 2.в) [3].

Изгибающий момент в середине пролета:

$$M = \frac{ql^2}{8} = \frac{60 \text{ кН/м} \cdot (15 \text{ м})^2}{8} = \frac{60 \cdot 225 \text{ кНм}}{8} = 1687,5 \text{ кНм};$$

Поперечная сила на опоре :

$$Q = \frac{ql}{2} = \frac{60 \text{ кН/м} \cdot 15 \text{ м}}{2} = 450 \text{ кН};$$

Усилия N, N_k, N_Γ, F равны нулю.

Выпишем все полученные значения усилий :

При $\kappa \rightarrow \infty$; $z = 0$.

$$\left\{ \begin{array}{l} M = 1687,5 \text{ кНм}; \\ Q = 450 \text{ кН}; \\ F = 0; \\ N = 0; \\ N_k = 0; \\ N_\Gamma = 0; \end{array} \right. \quad (59)$$

Подбор сечения элементов

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

Таблица 1. Характеристики марок сталей

Table 1. Characteristics of steel grades

№	Марка стали Steel grade	Стоимость одной тонны в руб. The cost of one ton in rubles	Группа стали и расчетное сопротивление Steel group and design resistance
1	ВСт3 пс 6-1	55000	Сталь обычной прочности , Regular strength steel R1=220 МПа.
2	ВСт3 псн обр.	40990	Сталь обычной прочности, Regular strength steel R2=270 МПа.
3	15Х СНД	59990	Сталь повышенной прочности, High strength steel R1=330 МПа.

Стоимость стали в табл. 1 соответствует ценам, установленным на московской бирже на первое января 2020 года. Сечение перекладины примем из прокатного широкополочного двутавра

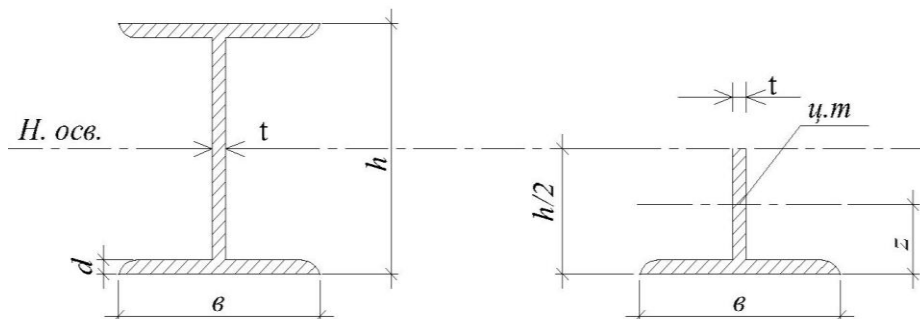


Рис. 1. Сечение прокатного широкополочного двутавра

Fig. 1. Cross section of a rolling wide-shelf I-beam

Приведем расчетные формулы, с помощью которых можно подобрать сечение шпренгельной балки.

В сечении перекладины:

$$\text{напряжения изгиба :} \quad \sigma_{\text{и}} = \frac{M}{W_X}; \quad (60)$$

$$\text{напряжения осевого обжатия:} \quad \sigma_0 = \frac{F}{A}; \quad (61)$$

$$\text{касательные напряжения:} \quad \tau = \frac{Q \cdot S}{t \cdot J_X}; \quad (62)$$

Здесь статический момент половины сечения двутавра (рис. 1) относительно нейтральной оси $x-x$ определяется по формуле

$$S = 0,5A \cdot (0,5h - z_0), \quad (63)$$

где A - площадь сечения;

z_0 - координата центра тяжести половины сечения, рис. 1.

В расчетном сечении $x = \frac{l}{3}$ (рис. 2 [3]), возникают три вида напряжений – формулы (60 – 62), эпюры этих напряжений приведены на рис. (2) :

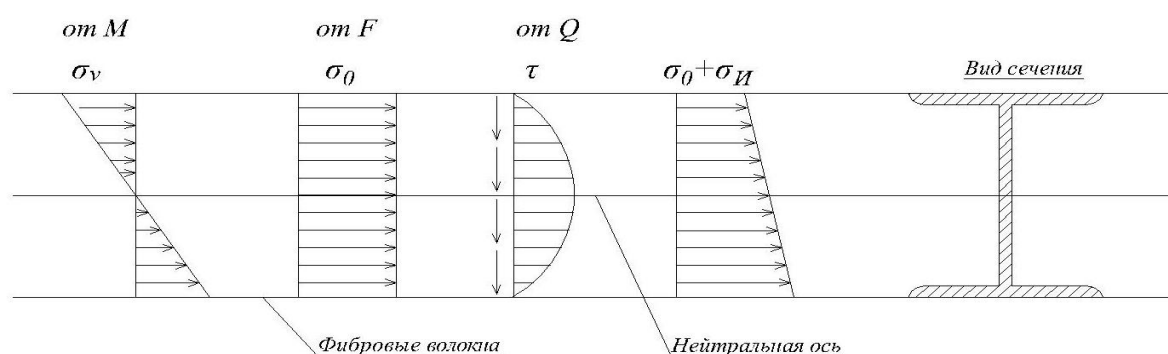


Рис. 2. Эпюры напряжений

Fig. 2. Stress diagrams

Прочность сечения проверяем по IV – ой теории прочности [14] :

$$\sqrt{(\sigma_0 + \sigma_{\text{и}})^2 + 3\tau^2} \leq \gamma \cdot R. \quad (63a)$$

В соответствии с эпюрами (рис. 2), условие прочности запишем так :

$$\text{На фибровых волокнах:} \quad \sigma_0 + \sigma_{\text{и}} \leq \gamma \cdot R, \quad (64)$$

$$\text{На нейтральной оси :} \quad \sqrt{\sigma_0^2 + 3\tau^2} \leq \gamma \cdot R. \quad (65)$$

В случае обычной балки, когда нет шпренгельных элементов (рис.2.б) [3],
Усилие сжатия равно нулю. Соответственно равно нулю и напряжение σ_0 .
Для этого случая условие прочности сечения балки запишем в виде :

$$\sigma = \frac{M}{W_c} \leq \gamma \cdot R.$$

Отсюда

$$W_{\text{ТР}} \geq \frac{M}{c\gamma R}; \quad (66)$$

Где $W_{\text{ТР}}$ – требуемый момент сопротивления изгибу;

c – коэффициент, учитывающий влияние пластических деформаций. Для двутаврового сечения $c=1,1$.

Далее перейдем к другим элементам шпренгельной балки. Стойка работает на сжатие, однако рассчитывать её на устойчивость продольного изгиба не стоит, поскольку этот элемент имеет небольшую длину, равную

$$h = 0,1 \cdot l = 0,1 \cdot 15\text{м} = 1,5\text{м}.$$

Достаточно подобрать его сечение по прочности $\sigma = \frac{N}{A_{\text{ст}}} \leq \gamma \cdot R$,

где $A_{\text{ст}}$ – площадь сечения стойки.

Отсюда $A_{\text{ст}} \geq \frac{N}{\gamma R_{\text{ст}}}$, (67)

где N – усилие сжатия стойки, γ и $R_{\text{ст}}$ – соответственно коэффициент условия работы и расчетное сопротивление стойки.

Обычно $A_{\text{ст}}$ назначают конструктивно из условия удобства устройства узлов конструкции. Затяжка работает на растяжение.

Условия прочности :

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{N_{\text{к}}}{A_{\text{к, нетто}}} \leq R \cdot \gamma ; \\ \sigma_2 &= \frac{N_{\text{к}}}{A_{\text{к, нетто}}} \leq \frac{R^{\text{вр}}}{1,3} \cdot \gamma . \end{aligned} \quad (68)$$

Здесь: R и $R^{\text{вр}}$ – расчетные сопротивления стали затяжки по $\sigma_{\text{т}}$ и $\sigma_{\text{вр}}$;

γ – коэффициент условия работы;

$A_{\text{к, нетто}}$ – площадь сечения косой затяжки в её слабом сечении;

$N_{\text{к}}$ – усилие, уже приведенное нами и данное формулами (57, 58 и 59).

Условия прочности горизонтальной затяжки записываются также, как неравенства (68), только с заменой усилия $N_{\text{к}}$ усилием $N_{\text{г}}$. Теперь мы располагаем всеми расчетными формулами.

Далее перейдем к непосредственным вычислениям. Начнём с расчетных усилий первого варианта, равенства (57). В качестве перекладины назначим прокатный широкополочный двутавр № 45 Б1: характеристики сечения : $h = 44,54 \text{ см}$, $A = 74,6 \text{ см}^2$, $g = 58,5 \text{ кг/м}$, $J_x = 24690 \text{ см}^4$, $W_x = 1110 \text{ см}^3$, $Z_0 = 5,39$, $t = 0,76 \text{ см}$.

По формуле (60) $\sigma_{\text{и}} = \frac{150 \text{ кН} \cdot \text{м}}{1110 \text{ см}^3} \approx 13,5 \text{ кН/см}^2$;

Статический момент по равенству (63) :

$$S = 0,5 \cdot 74,6 \text{ см}^2 \cdot (0,5 \cdot 44,54 \text{ см} - 5,39 \text{ см}) = 629,624 \text{ см}^3 .$$

По формуле (68):

$$\tau = \frac{180 \text{ кН} \cdot 629,624 \text{ см}^3}{0,76 \text{ см} \cdot 24690 \text{ см}^4} = 6,1 \text{ кН/см}^2 .$$

Осевое напряжение сжатия по формуле (61):

$$\sigma_0 = \frac{1369,7 \text{ кН}}{74,6 \text{ см}^2} = 18,3 \text{ кН/см}^2 .$$

Проверка прочности :

На фибровых волокнах (64):

$$\sigma_0 + \sigma_{\text{и}} = 18,3 \text{ кН/см}^2 + 13,5 \text{ кН/см}^2 = 31,8 \text{ кН/см}^2 = 318 \text{ МПа} < 330 = R_3 .$$

Здесь R_3 дано в табл. 1.

Недонапряжение составляет $3,3\% < 5\%$. На нейтральной оси (65) :

$$\sqrt{(18,3 \text{ кН/см}^2)^2 + 3 \cdot (6,1 \text{ кН/см}^2)^2} \approx 21 \text{ кН/см}^2 = 210 \text{ МПа} < 330 \text{ МПа} = R_3 .$$

Прочность обеспечена.

По расчету для первого варианта (формула 57) в качестве сечения перекладины проходит широкополочный двутавр №45 Б1 $R = R_3 = 330 \text{ МПа}$.

Далее назначим широкополочный двутавр №50 Б1 :

характеристики сечения: $h = 49,51 \text{ см}$, $A = 91,8 \text{ см}^2$, $g = 72,1 \text{ кг/м}$, $J_X = 37670 \text{ см}^4$,
 $W_X = 1520 \text{ см}^3$, $Z_0 = 5,99$, $t = 0,844 \text{ см}$.

Далее мы не будем давать пояснения. По вышеприведенному алгоритму будем проводить только вычисления.

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{150 \text{ кН} \cdot \text{м}}{1520 \text{ см}^3} \approx 10 \text{ кН/см}^2;$$

$$S = 0,5 \cdot 91,8 \text{ см}^2 \cdot (0,5 \cdot 49,51 \text{ см} - 5,99 \text{ см}) = 862,92 \text{ см}^3.$$

$$\tau = \frac{180 \text{ кН} \cdot 862,92 \text{ см}^3}{0,844 \text{ см} \cdot 37670 \text{ см}^4} = 4,8 \text{ кН/см}^2.$$

$$\sigma_0 = \frac{1369,7 \text{ кН}}{91,8 \text{ см}^2} = 15 \text{ кН/см}^2.$$

Проверка прочности на нейтральной оси:

$$\sqrt{(15 \text{ кН/см}^2)^2 + 3 \cdot (4,8 \text{ кН/см}^2)^2} \approx 23,04 \text{ кН/см}^2 = 230,4 \text{ МПа} < 270 \text{ МПа} = R_2.$$

Здесь R_2 дано в табл. № 1.

На фибровых волокнах (64):

$$\sigma_0 + \sigma_{\text{и}} = 15 \text{ кН/см}^2 + 10 \text{ кН/см}^2 = 25 \text{ кН/см}^2 = 250 \text{ МПа} < 270 = R_2.$$

Недонапряжение составляет 8,7%.

Другие прокатные профили дают больший запас прочности.

Окончательно принимаем в качестве перекладины для 1-го варианта усилий (57) широкополочный двутавр №50 Б1 (при $R = R_2 = 270 \text{ МПа}$).

Далее назначим профиль №55 Б1 : характеристики сечения: $h = 54,52 \text{ см}$, $A = 110 \text{ см}^2$,
 $g = 86,3 \text{ кг/м}$, $J_X = 54480 \text{ см}^4$, $W_X = 2000 \text{ см}^3$, $Z_0 = 6,62$, $t = 0,92 \text{ см}$.

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{150 \text{ кН} \cdot \text{м}}{2000 \text{ см}^3} \approx 7,55 \text{ кН/см}^2;$$

$$S = 0,5 \cdot 110 \text{ см}^2 \cdot (0,5 \cdot 54,52 \text{ см} - 6,62 \text{ см}) = 1135,2 \text{ см}^3.$$

$$\tau = \frac{180 \text{ кН} \cdot 1135,2 \text{ см}^3}{0,92 \text{ см} \cdot 54480 \text{ см}^4} = 4,07 \text{ кН/см}^2.$$

$$\sigma_0 = \frac{1369,7 \text{ кН}}{110 \text{ см}^2} = 12,45 \text{ кН/см}^2.$$

Проверка прочности на нейтральной оси:

$$\sqrt{(12,45 \text{ кН/см}^2)^2 + 3 \cdot (4,07 \text{ кН/см}^2)^2} \approx 14,3 \text{ кН/см}^2 = 143 \text{ МПа} < 220 \text{ МПа} = R_1.$$

Здесь R_1 дано в табл. 1.

На фибровых волокнах (64):

$$\sigma_0 + \sigma_{\text{и}} = 12,45 \text{ кН/см}^2 + 7,55 \text{ кН/см}^2 = 20 \text{ кН/см}^2 = 200 \text{ МПа} < 220 = R_1.$$

Недонапряжение составляет 10%. Другие прокатные профили дают больший запас прочности. Окончательно принимаем в качестве перекладины для 1-го варианта усилий (57) широкополочный двутавр №50 Б1 (при $R = R_1 = 220 \text{ МПа}$).

Перейдём ко второму варианту усилий (58). В качестве перекладины назначим широкополочный прокатный двутавр №40 Б1: характеристики сечения: $h = 39,58 \text{ см}$, $A = 60,1 \text{ см}^2$, $g = 47,2 \text{ кг/м}$, $J_x = 15810 \text{ см}^4$, $W_x = 799 \text{ см}^3$, $Z_0 = 4,73 \text{ см}$, $t = 0,68 \text{ см}$.

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{129 \text{ кН} \cdot \text{м}}{799 \text{ см}^3} \approx 16,2 \text{ кН/см}^2;$$

$$S = 0,5 \cdot 60,1 \text{ см}^2 \cdot (0,5 \cdot 39,58 \text{ см} - 4,73 \text{ см}) = 452,55 \text{ см}^3.$$

$$\tau = \frac{176,4 \text{ кН} \cdot 452,55 \text{ см}^3}{0,68 \text{ см} \cdot 15810 \text{ см}^4} = 7,43 \text{ кН/см}^2.$$

$$\sigma_0 = \frac{1074,76 \text{ кН}}{60,1 \text{ см}^2} = 17,85 \text{ кН/см}^2.$$

Проверка прочности:

На фибровых волокнах (64):

$$\sigma_0 + \sigma_{\text{и}} = 17,85 \text{ кН/см}^2 + 16,2 \text{ кН/см}^2 = 34,05 \text{ кН/см}^2 = 340,5 \text{ МПа} \approx 330 \text{ МПа} = R_3.$$

Перенапряжение составляет – 3%. Здесь R_3 дано в табл. 1. Другие прокатные профили дают неоправданно больший запас прочности !

На нейтральной оси :

$$\sqrt{(17,85 \text{ кН/см}^2)^2 + 3 \cdot (7,43 \text{ кН/см}^2)^2} \approx 22,0 \text{ кН/см}^2 = 220 \text{ МПа} < 330 \text{ МПа} = R_3.$$

Прочность обеспечена.

Окончательно принимаем в качестве перекладины для 2-го варианта усилий (58) широкополочный двутавр №40 Б1 (при $R = R_3 = 330 \text{ МПа}$). Далее, в качестве перекладины назначим прокатный широкополочный двутавр № 45 Б1. Данные этого профиля приведены выше при рассмотрении 1-го варианта.

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{129 \text{ кН} \cdot \text{м}}{1110 \text{ см}^3} \approx 11,6 \text{ кН/см}^2;$$

$$S = 629,624 \text{ см}^3.$$

$$\tau = \frac{176,4 \text{ кН} \cdot 629,624 \text{ см}^3}{0,76 \text{ см} \cdot 24690 \text{ см}^4} = 5,92 \text{ кН/см}^2.$$

$$\sigma_0 = \frac{1074,76 \text{ кН}}{74,6 \text{ см}^2} = 14,407 \text{ кН/см}^2.$$

Проверка прочности:

На фибровых волокнах (64):

$$\sigma_0 + \sigma_{\text{и}} = 14,407 \text{ кН/см}^2 + 11,6 \text{ кН/см}^2 = 26,007 \text{ кН/см}^2 = 260,07 \text{ МПа} < 270 \text{ МПа} = R_2.$$

Здесь R_2 дано в табл. 1. Недонапряжение составляет $\approx 3\%$.

На нейтральной оси :

$$\sqrt{(14,41 \text{ кН/см}^2)^2 + 3 \cdot (5,92 \text{ кН/см}^2)^2} = 17,69 \text{ кН/см}^2 = 177 \text{ МПа} < 270 \text{ МПа} = R_2.$$

Окончательно принимаем в качестве перекладины профиль №45 Б1 при 2 варианте усилий (58) и $R = R_2 = 270 \text{ МПа}$.

Далее в качестве перекладины назначим прокатный широкополочный двутавр № 50 Б1. Данные этого профиля приведены выше при рассмотрении 1-го варианта.

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{129 \text{ кН} \cdot \text{м}}{1520 \text{ см}^3} \approx 8,5 \text{ кН/см}^2;$$

$$S = 862,92 \text{ см}^3.$$

$$\tau = \frac{176,4 \text{ кН} \cdot 862,92 \text{ см}^3}{0,844 \text{ см} \cdot 37670 \text{ см}^4} = 4,79 \text{ кН/см}^2.$$

$$\sigma_0 = \frac{1074,76 \text{ кН}}{91,8 \text{ см}^2} = 11,71 \text{ кН/см}^2.$$

Проверка прочности: На фибровых волокнах(64):

$$\sigma_0 + \sigma_{\text{и}} = 11,71 \text{ кН/см}^2 + 8,5 \text{ кН/см}^2 = 20,21 \text{ кН/см}^2 = 202,1 \text{ МПа} < 220 \text{ МПа} = R_1.$$

Здесь R_2 дано в табл. 1. Недонапряжение составляет $-7,7\%$.

На нейтральной оси :

$$\sqrt{(11,71 \text{ кН/см}^2)^2 + 3 \cdot (4,79 \text{ кН/см}^2)^2} = 14,35 \text{ кН/см}^2 = 143,5 \text{ МПа} < 220 \text{ МПа} = R_1.$$

Окончательно принимаем в качестве перекладины профиль №50 Б1 при 2-м варианте усилий (58). И $R = R_2 = 220 \text{ МПа}$.

Перейдём к рассмотрению третьего варианта усилий (59).

Пользуясь формулой (66) определим требуемый момент сопротивления изгибу для стальных, приведенных в табл.1:

$$\begin{aligned} 1. \quad W_X &= \frac{M}{C_{\gamma R}} = \frac{1687,5 \text{ кН} \cdot 10^2 \text{ см}}{1,1 \cdot 0,9 \cdot 22 \text{ кН/см}^2} = \frac{1687,5 \cdot 10^2 \text{ см}^3}{0,99 \cdot 22} = \frac{1687,5 \cdot 10^2 \text{ см}^3}{21,78} = 77,4 \cdot 10^2 \text{ см}^3 = 7740 \text{ см}^3 \\ 2. \quad W_X &= \frac{M}{C_{\gamma R}} = \frac{1687,5 \text{ кН} \cdot 10^2 \text{ см}}{0,99 \cdot 27} = 63,1 \cdot 10^2 \text{ см}^3 = 6310 \text{ см}^3 \\ 3. \quad W_X &= \frac{M}{C_{\gamma R}} = \frac{1687,5 \text{ кН} \cdot 10^2 \text{ см}}{32,67} = 5160 \text{ см}^3 \end{aligned}$$

По сортаменту [4], [5], подбираем сечение широкополочного прокатного двутавра:

1. №100 Б1 с $W_X = 8940 \text{ см}^3 > 7740 \text{ см}^3$;
 погонный вес балки : $\rho = 227 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 227 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15 \text{ м} = 3405 \text{ кг}$.
2. №90 Б1 с $W_X = 6920 \text{ см}^3 > 6310 \text{ см}^3$;
 погонный вес балки: $\rho = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$;
 общий вес балки : $\rho l = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15 \text{ м} = 2895 \text{ кг}$.
3. №90 Б1 с $W_X = 6920 \text{ см}^3 > 5160 \text{ см}^3$;
 погонный вес балки: $\rho = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки : $\rho l = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15 \text{ м} = 2895 \text{ кг}$.

Итак, мы рассмотрели 9 – вариантов балок.

Обсуждение результатов. Для наглядности подытожим результаты.

Вариант №1.

Обычная, нешпренгельная балка (широкополочный прокатный двутавр):

$$\kappa=0; \quad z = \frac{11}{30};$$

1. №50 Б1, $R_1 = 220 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 86,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 86,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 1294,5\text{кг}$.
2. №55 Б1, $R_2 = 270 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 72,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 72,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 1081,5\text{кг}$.
3. №45 Б1, $R_3 = 330 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 58,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 58,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 877,5\text{кг}$.

Вариант №2.

(оптимизированный вариант).

$$\kappa = 0,524 \cdot 10^{-3}; \quad z = 0,362.$$

1. №50 Б1, $R_1 = 220 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 72,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 72,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 1081,5\text{кг}$.
2. №45 Б1, $R_2 = 270 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 58,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 58,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 877,5\text{кг}$.
3. №40 Б1, $R_3 = 330 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 47,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 47,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 708,0\text{кг}$.

Вариант №3.

$$\kappa \rightarrow \infty; \quad z = 0.$$

1. №100 Б1, $R_1 = 22 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 227 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 227 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 3405\text{кг}$.
2. №90 Б1, $R_1 = 27 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 2895\text{кг}$.
3. №90 Б1, $R_1 = 33 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 2895\text{кг}$.

Далее перейдем к определению веса шпренгельных элементов.

Вариант №1.

$$\kappa=0; \quad z = \frac{11}{30};$$

Воспользуемся усилиями (57):

$$\begin{cases} F = -1369,7 \text{ кН}; \\ N = 367 \text{ кН}; \\ N_k = 1422 \text{ кН}; \\ N_\Gamma = 1222 \text{ кН}. \end{cases}$$

Вычислим длину l_3 косой затяжки (рис. 1). Примем, как и ранее $h = 0,1 \cdot l$.

$$l_3 = \sqrt{\left(\frac{l}{3}\right)^2 + \left(\frac{l}{10}\right)^2} = \frac{1}{3}l \cdot 1,04;$$

По формуле (68):

$$A_{\text{к. нетто}} = \frac{N_k}{R_1 \cdot \gamma} = \frac{1422 \text{ кН}}{22 \text{ кН/см}^2 \cdot 0,9} = 71,81 \text{ см}^2;$$

Это – два уголка, каждая по $A=37,4 \text{ см}^2$: $37,4 \text{ см}^2 \cdot 2 = 74,8 \text{ см}^2 > 71,81 \text{ см}^2$;

$$A_{\text{к. нетто}} = \frac{N_{\text{к}}}{R_1 \cdot \gamma} = \frac{1422 \text{ кН}}{22 \text{ кН/см}^2 \cdot 0,9} = 71,81 \text{ см}^2;$$

$$A_{\text{к. нетто}} = \frac{N_{\text{к}} \cdot 1,3}{R_{\text{вр}} \cdot \gamma} = \frac{1422 \text{ кН} \cdot 1,3}{37 \text{ кН/см}^2 \cdot 0,9} = 55,51 \text{ см}^2 < 74,8 \text{ см}^2;$$

Принимаем 2 равнобоких уголка, каждая по $A = 37,4 \text{ см}^2$,
 погонный вес $\rho = 29,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}};$

Горизонтальная затяжка (рис.1).

$$A_{\text{г. нетто}} = \frac{N_{\text{г}}}{R_1 \cdot \gamma} = \frac{1222 \text{ кН}}{22 \text{ кН/см}^2 \cdot 0,9} = 61,71 \text{ см}^2;$$

Это – 2 уголка, каждая по $A = 31,4 \text{ см}^2$; погонный вес $\rho = 24,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}};$

Стойка по формуле (67):

$$A_{\text{ст}} = \frac{367 \text{ кН}}{22 \text{ кН/см}^2 \cdot 0,9} = 18,53 \text{ см}^2;$$

Сечение стойки назначаем конструктивно из условия удобства устройства узлов.

Вычислим вес одной косой затяжки:

$$2 \cdot \rho l_3 = 2 \cdot 29,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot l_3 = 2 \cdot 29,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 5,2 \text{ м} = 305,8 \text{ кг}$$

Вес 2-х косых затяжек:

$$2 \cdot 305,8 \text{ кг} = 611,6 \text{ кг},$$

Общий вес горизонтальной затяжки :

$$2 \cdot \rho l_{\text{г.з}} = 2 \cdot 24,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot \frac{l}{3} = 2 \cdot 24,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 5 \text{ м} = 247 \text{ кг}.$$

Вес стойки: площадь сечения конструктивно: $A = 25,7 \text{ см}^2 > 18,53 \text{ см}^2 = A_{\text{ст}}.$

Номер прокатного двутавра №25 Б1, $\rho = 20,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}};$

Вес 2-х стоек:

$$2 \cdot \rho h = 2 \cdot 20,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 1,5 \text{ м} = 60,6 \text{ кг}.$$

Общий вес всех шпренгельных элементов по варианту №1:

$$60,6 \text{ кг} + 611,6 \text{ кг} + 247 \text{ кг} = 912,2 \text{ кг}$$

Вариант №2

$$\kappa = 0,524 \cdot 10^{-3}; \quad z = 0,362.$$

Воспользуемся усилиями (58):

$$F = -1074,76 \text{ кН};$$

$$N = 322,2 \text{ кН};$$

$$N_{\text{к}} = 1130 \text{ кН};$$

$$N_{\text{г}} = 1072,9 \text{ кН};$$

Далее мы не приводим пояснения.

$$A_{\text{к. нетто}} = \frac{1130 \text{ кН}}{22 \text{ кН/см}^2 \cdot 0,9} = \frac{1130 \text{ кН}}{19,8 \text{ кН/см}^2} = 57,07 \text{ см}^2;$$

2 уголка, каждая по $A = 31,4 \text{ см}^2$; $31,4 \text{ см}^2 \cdot 2 = 62,8 \text{ см}^2$; погонный вес $\rho = 24,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}};$

Общий вес одной косой затяжки:

$$2 \cdot \rho l = 2 \cdot 31,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot l = 2 \cdot 31,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 5,2 \text{ м} = 326,6 \text{ кг};$$

Вес 2-х косых затяжек:

$$2 \cdot 326,6 \text{ кг} = 653,2 \text{ кг},$$

$$A_{\text{г}} = \frac{N_{\text{г}}}{R \cdot \gamma} = \frac{1072,9 \text{ кН}}{22 \text{ кН/см}^2 \cdot 0,9} = 54,19 \text{ см}^2;$$

2 уголка, каждая по $A=27,3\text{см}^2$; $27,3\text{см}^2 \cdot 2 = 54,6\text{см}^2 > 54,9$;

погонный вес $\rho = 21,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$.

Вес стойки принимаем по первому варианту: 60,6 кг.

Общий вес всех шпренгельных элементов по варианту №2:

$$60,6 \text{ кг} + 21,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 5 \cdot 2 + 653,2 \text{ кг} = 60,6 + 653,2 + 215 = 928,8 \text{ кг}.$$

Это значение веса шпренгельных элементов необходимо уточнить с учетом условия оптимальности (55).

Поскольку модули упругости строительных сталей одинаковы, то формулу (55) можно записать так:

$$\frac{A_3 \cdot h^2}{l_3^3} = \frac{J}{l^3 \cdot 0,7 \cdot 10^{-3}};$$

По второму варианту выше были подобраны 3-вида широкополочного двутавра:

- при $R_1 = 220\text{МПа}$, №50 Б1, момент инерции сечения $J = 37670\text{см}^4$;
- при $R_2 = 270\text{МПа}$, №45 Б1, момент инерции сечения $J = 24690\text{см}^4$
- при $R_3 = 330\text{МПа}$, № 40 Б1, момент инерции сечения $J = 15810\text{см}^4$.

При $h = 0,1 \cdot l$, $l_3 = \sqrt{\left(\frac{l}{3}\right)^2 + h^2}$; $l = 15\text{м}$, и $J = 37670\text{см}^4$;

По формуле (Б) найдем $A_3 = 92\text{см}^2$.

При $J = 24690\text{см}^4$, сохранив все остальные параметры без изменения, из условия (Б) получим:

$$A_3 = 60,26\text{см}^2$$

При $J = 15810\text{см}^4$, сохранив все остальные параметры без изменения, из условия (Б) получим:

$$A_3 = 38,55\text{см}^2$$

По условию прочности:

$$A_3 = A_k = \frac{N_k}{R_1 \cdot \gamma} = \frac{1130\text{кН}}{19,8 \text{ кН/см}^2} = 57,07\text{см}^2.$$

По прочности требуется косая затяжка с меньшей площадью сечения. Но чтобы обеспечить выполнение условия оптимальности (55), окончательно назначаем

$$A_3 = 92\text{см}^2;$$

Если бы по условию прочности требовалась большая площадь, чем по оптимальности, то условие оптимальности можно было обеспечить при незначительной по прочности сечения A_3 , которая входит в формулу (55).

Длина косой затяжки по рис. (1):

$$l_3 = \sqrt{\left(\frac{l}{3}\right)^2 + h^2} = 5,2\text{м};$$

Здесь: $l = 15\text{м}$, $h = 0,1 \cdot l$.

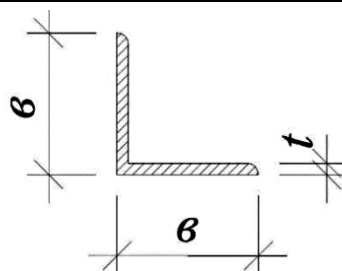


Рис. 3. Профиль равнобокого уголка
Fig. 3. Profile of an equilateral corner

Назначим 2 уголка, каждая по $A=47,1\text{см}^2$;

$$47,1\text{см}^2 \cdot 2 = 94,2\text{см}^2 > 92\text{см}^2;$$

По рис. 3. $b=200\text{мм}$; $t=12\text{мм}$; погонный вес $g = 37 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$.

Общий вес 2-х косых затяжек (4-рѐх уголков):

$$4 \cdot l_3 \cdot g = 4 \cdot 5,2\text{м} \cdot 37 \frac{\text{кг}}{\text{м}} = 769 \text{ кг}.$$

Общий вес всех шпренгельных элементов (когда перекладина №50 Б1):

$$60,6 \text{ кг} + 769\text{кг} + 215\text{кг} = 1044,6 \text{ кг}.$$

Назначим 2 уголка, каждая по $A=31,4\text{см}^2$;

$$31,4\text{см}^2 \cdot 2 = 62,8\text{см}^2 > 60,26\text{см}^2; \quad \text{погонный вес } \rho = 24,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}}.$$

Общий вес 2-х косых затяжек (4-рѐх уголков):

$$4\rho \cdot l_3 = 4 \cdot 24,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 5,2\text{м} = 513,76\text{кг}.$$

Общий вес всех шпренгельных элементов (когда перекладина №45 Б1):

$$60,6 \text{ кг} + 513,76\text{кг} + 215\text{кг} = 789,34 \text{ кг}.$$

Назначим 2 уголка, каждая по $A=19,2\text{см}^2$;

$$2 \cdot 19,2\text{см}^2 = 38,4\text{см}^2 \approx 38,55\text{см}^2;$$

$$\rho = 15,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \quad (b=100\text{мм}; \quad t=10\text{мм}).$$

Общий вес 4-ѐх уголков (2-х косых затяжек):

$$4\rho \cdot l_3 = 4 \cdot 15,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 5,2\text{м} = 314\text{кг}.$$

Общий вес всех шпренгельных элементов (когда а №40 Б1):

$$60,6 \text{ кг} + 314 + 215\text{кг} = 589,6 \text{ кг}.$$

Для наглядности сведем в табл. 2, 3, 4 полученные выше значения.

По расчетной схеме (рис. 2.б)[3] $\kappa=0$; $z = \frac{11}{30}$;

Таблица 2. Результаты расчета
Table 2. Calculation results

№	Марка стали Steel grade	Стоимость 1 тонны в руб. The cost of one ton in rubles	Группа стали и расчетное сопротивление Steel group and design resistance	Номер широкополочного двутавра Number of wide-shelf I-beam	Вес 1 погонного метра; Общий вес перекладины Weight of one linear meter; Total weight of the crossbar	Стоимость 1 погонного метра; Общий вес перекладины Price one linear meter; Total weight of the crossbar
1	ВСт3 пс 6-1	55000	Сталь обычной прочности, R1=220 МПа. Regular strength steel	№55 Б1	$86,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$ 1294,5 кг.	4745,5 71197,5
2	ВСт3 пс 6-2 н. обр.	41000	Сталь обычной прочности, R2=270 МПа. Regular strength steel	№50 Б1	$72,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$ 1081,5 кг.	2956,1 44485
3	15X СНД	60000	Сталь повышенной прочности, R1=330 МПа. High strength steel	№45 Б1	$58,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$ 877,5 кг.	3510 52650

С учетом веса и стоимости шпренгельных элементов табл. 2 уточняем в табл. 2а.

Шпренгельные элементы выполняются из стали марки ВСт3 пс 6-1, R1=220 МПа.

Таблица 2.а Вес и стоимость шпренгельной балки
Table 2.a Weight and cost of a trussed beam

№	Вес шпренгельной балки Truss beam weight	Стоимость металла шпренгельной балки The cost of the metal of the trussed beam
1	1294,5кг + 980,8кг = 2275,3кг.	1,2945т · 55000р + 0,9808т · 55000р = 125141р
2	1081,5кг + 980кг = 2061,5кг	1,0815т · 41000р + 0,9808т · 55000р = 98241,5р
3	877,5кг + 980кг = 1857,5кг	0,8775т · 60000р + 0,9808т · 55000р = 106550р

По расчетной схеме (рис. 2.а) [3] $K = 0,7 \cdot 10^{-3}$; $z = 0,362$.

Таблица 3. Результаты расчета
Table 3. Calculation results

№	Марка стали Steel grade	Стоимость 1 тонны в руб. The cost of one ton in rubles	Группа стали и расчетное сопротивление Steel group and design resistance	Номер широкополочного двутавра Number of wide-shelf I-beam	Вес 1 погонного метра; Общий вес перекладины Weight of one linear meter; Total weight of the crossbar	Стоимость 1 погонного метра; Общий вес перекладины Price one linear meter; Total weight of the crossbar
1	ВСт3 пс 6-1	55000	Сталь обычной прочности, R1=220 МПа. Regular strength steel	№50 Б1	$72,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$ 11081,5 кг.	3965,5р 59482,5
2	ВСт3 пс 6-2 н. обр.	41000	Сталь обычной прочности, R2=270 МПа. Regular strength steel	№45 Б1	$58,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$ 877,5 кг.	2398,5 35977,5
3	15X СНД	60000	Сталь повышенной прочности, R1=330 МПа. High strength steel	№40 Б1	$47,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$ 708,0кг.	2832 42480

С учетом веса и стоимости шпренгельных элементов табл. 3 уточняем в табл. 3.а.

Шпренгельные элементы выполняются из стали марки ВСт3 пс 6-1, R1=220 МПа.

Таблица 3.а Вес и стоимость шпренгельной балки
Table 3.a Weight and cost of a trussed beam

№	Вес шпренгельной балки Truss beam weight	Стоимость металла шпренгельной балки The cost of the metal of the trussed beam
1	1081,5кг+1044,6 кг=2126,1 кг.	1,0815т·55000р+1,0446т·55000р=116935,5
2	877,5кг+789,3кг=1666,8 кг	0,8775т·41000р+0,789т·55000р=79372,5р
3	708,0кг+589,6кг=1297,6 кг	0,708т·60000р+0,5896т·55000р=74909,0р

По расчетной схеме (рис. 2.в)) [3] $\kappa \rightarrow \infty$; $z \rightarrow \infty$; (обычная, нешпренгельная балка).

Таблица 4. Результаты расчета
Table 4. Calculation results

№	Марка стали Steel grade	Стоимость 1 тонны в руб. The cost of one ton in rubles	Группа стали и расчетное сопротивление Steel group and design resistance	Номер широкополочного двутавра Number of wide-shelf I-beam	Вес 1 погонного метра; Общий вес перекладины Weight of one linear meter; Total weight of the crossbar	Стоимость 1 погонного метра; Общий вес перекладины Price one linear meter; Total weight of the crossbar
1	ВСт3 пс 6-1	55000	Сталь обычной прочности, R1=220 МПа. Regular strength steel	№100 Б1	227 $\frac{\text{кг}}{\text{м}}$. 3405 кг.	12485 187275
2	ВСт3 пс 6-2 н. обр.	41000	Сталь обычной прочности, R2=270 МПа. Regular strength steel	№90 Б1	193 $\frac{\text{кг}}{\text{м}}$. 2895 кг.	7913 118695
3	15Х СНД	60000	Сталь повышенной прочности, R1=330 МПа. High strength steel	№90 Б1	195 $\frac{\text{кг}}{\text{м}}$. 2895кг.	11700 173700

На основании таблиц 2.а, 3.а и 4 составим сводную табл.5:

Таблица 5. Сводная таблица расчетов
Table 5. Summary table of calculations

№	Марка стали Steel grade	Значение коэффициента К The value of the coefficient	Вес конструкции в целом, в кг. The weight of the structure as a whole, in kg.	Стоимость металла всей конструкции в руб. The cost of the metal of the entire structure in rubles.	Процентное соотношение в весе % Percentage in weight %	Процентное соотношение в стоимости % Percentage in cost %
1	ВСт3 пс 6-1 R1=220 МПа.	K = 0	2275	125141	67	67
		K = 0,7 · 10 ⁻³	2126	116935,5	62	62
		K → ∞	3405	187275	100	100
2	ВСт3 пс 6-2 н. обр. R2=270 МПа	K = 0	2061	98241,5	71	83
		K = 0,7 · 10 ⁻³	1667	79372,5	58	67
		K → ∞	2895	118695,0	100	100
3	15Х СНД R1=330 МПа.	K = 0	1857	106555	64	61
		K = 0,7 · 10 ⁻³	1298	74909,0	45	43
		K → ∞	2895	173700,0	100	100

Вывод. Из сводной табл. 5 следует вывод: оптимизация параметров, которая обеспечивается при $K = 0,7 \cdot 10^{-3}$, приводит к существенной экономии металла и снижению его стоимости. Такая экономия находится в пределах 40-50 % по сравнению с обычными балками.

Кроме этого, сравнение результатов исследования работы шпренгельных балок с одной стойкой [1, 2] и с двумя стойками говорит о рациональности шпренгельных балок с двумя стойками на пролётах $l = (12 - 18)\text{м}$.

Приведенная в статье методика исследования эффективности работы шпренгельных балок с двумя стойками, а также их расчет могут найти широкое применение при проектировании шпренгельных балочных конструкций.

Библиографический список:

1. Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О. Оптимизация параметров шпренгельной балки. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47(4): 119-131. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-119-131.
2. Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О. Эффективность шпренгельных балок с оптимальными параметрами. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (1):141-153. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-141-153
3. Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О. Оптимизация параметров шпренгельных балок с двумя стойками. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 48, №3, 2021 г. С.117-132. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-117-132.
4. Акаев Н.К., Юсупов А.К. Алгоритм расчета шпренгельных подкрановых балок. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016; 42(3): 119-131. DOI:10.21822/2073-6185-2016-42-3-119-131.
5. Ажермачев С.Г. Приближенный метод расчета шпренгельных подкрановых балок. Строительство и техногенная безопасность. Выпуск 37, 2011 г. С.34-39.
6. Клыков В.М., Я.М. Лихтарников. Расчет стальных конструкций. М–75г. С.30-41.
7. Ливановский 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.
8. Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Юсупов А.К. Разработка и исследование шпренгельных балок новой раскройки. V Международная научно-практической конференции "Научные исследования: от теории к практике". Технические науки. Том 2. Г. Чебоксары. 2015. С.62-70.
9. Металлические конструкции. под ред. Е.И. Беленя, Москва, Стройиздат, 1986 г. С.382-384.
10. Металлические конструкции. под ред. Ю.И. Кудишина, Москва, Академия, 2011г. С.439-442.
11. 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; Оpubл. 20.07.2013, Бюл. № 20. – 5 с.
12. Стальные конструкции. Справочник конструктора. Под ред. Мельникова Н.П. М.: Стройиздат, 1980. С.195-196.
13. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». М.: Стандартинформ, 2017. АО "НИЦ "Строительство" – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 92 с.
14. Устарханов О.М., Юсупов А.К., Муселемов Х.М. Шпренгельные подкрановые балки. Махачкала: ДГТУ, 2016. 120 с.
15. Ф. Харт (Мюнхен), В. Хенн (Брауншвайг), Х. Зонтаг (Берлин), Москва, Стройиздат, 1977г. «Атлас стальных конструкций». С. 37-84
16. Юсупов А.К. «Металлические конструкции в вопросах, в ответах и в проектировании». Махачкала, Дагестанский государственный технический университет. ГУП «Типография ДНЦ РАН», 2010.
17. Юсупов А.К. «Методы прикладной математики в строительной механике», том 1. Махачкала, Дагестанский государственный технический университет. ГУП «Типография ДНЦ РАН», 2008.
18. Юсупов А.К. «Методы прикладной математики в строительной механике», том 4. Махачкала, Дагестанский государственный технический университет. ГУП «Типография ДНЦ РАН», 2008.
19. Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О., Джалалов Ш.Г. «Исследование металлодеревянной балки». «Вестник Машиностроения», №12, 2019

References:

1. Yusupov A.K., Muselemov K.H.M., Ustarkhanov T.O. Optimizatsiya parametrov shprengel'noy balki. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki, [Yusupov A.K., Muselemov H.M., Ustarkhanov T.O. Optimization of truss beam parameters. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47(4): 119-131. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-119-131. (In Russ)]
2. Yusupov A.K., Muselemov K.H.M., Ustarkhanov T.O. Efficiency of strut-framed beams with optimal parameters. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48(1):141-153. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-141-153. (In Russ)]

3. Yusupov A.K., Muselemov Kh.M., Ustarkhanov T.O. Optimization of the parameters of trussed beams with two posts. Bulletin of the Daghestan State Technical University. Technical science. Volume 48, No. 3, 2021 C.117-132. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-117-132.
4. Akayev N.K., Yusupov A.K. [Vestnik Daghestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskije nauki] Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016; 42(3): 119-131. DOI:10.21822/2073-6185-2016-42-3-119-131. (In Russ)]
5. Azharmachev S.G. Approximate method for calculating truss crane beams. [Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost]. Construction and man-made safety. 2011; 37: 34-39. (In Russ)]
6. Klykov V.M., YA.M. Likhtarnikov Calculation of steel structures M.:75; 30-41. (In Russ)
7. Livandovskiy 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;1338-1340. (In Russ)
8. 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. G. Cheboksary. 2015; 2:62-70. (In Russ)
9. Metal structures. Edited by E.I. Belenya, Moscow, Stroyizdat, 1986; 382-384. (In Russ)
10. Metal structures. Edited by Yu.I. Kudishina, Moscow, Academy, 2011; 439-442. (In Russ)
11. Pat. 130333 RF. MPK E04G 23/02. Shprengel' dlya usileniya i obespecheniya zhivuchesti izgibayemogo zhelezobetonno 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; 20: 5 p. (In Russ)]
12. Steel structures. Constructor reference. Ed. Melnikova N.P. M.: Stroyizdat, 1980;195-196. (In Russ)
13. SP 16.13330.2017 "Steel structures". M.: Standartinform, JSC "Research Center" Construction "- TsNIISK named after V.A.Kucherenko, 2017; 92. (In Russ)
14. Ustarkhanov OM, Yusupov AK, Muselemov Kh.M. Sprengel crane beams. Makhachkala: DSTU, 2016; 120. (In Russ)]
15. F. Hart (Munich), W. Henn (Braunschweig), H. Sontag (Berlin), Moscow, Stroyizdat, [Atlas stal'nykh konstruktsiy.]. Atlas of Steel Structures. 1977; 37-84 (In Russ)]
16. 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)]
17. Yusupov A.K. Daghestanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet. GUP «Tipografiya DNTS RAN» [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)]
18. Yusupov A.K. Methods of Applied Mathematics in Structural Mechanics, Daghestan State Technical University. State Unitary Enterprise "Printing House of the DSC RAS", 2008; 4. (In Russ)]
19. Yusupov A.K., Muselemov KH.M., Ustarkhanov T.O., Dzhalalov SH.G. Vestnik Mashinostroyeniya, [Yusupov A.K., Muselemov H.M., Ustarkhanov T.O., Dzhalalov Sh.G. "Study of a metal-wood beam". "Bulletin of Mechanical Engineering", 2019; 12: 112 (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».

Information about the authors:

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

Khairulla M.Muselemov, Cand.Sci. (Eng.), 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.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 02.02.2022.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 20.02.2022.

Принята в печать /Accepted for publication 20.02.2022.