



Федеральное агентство по рыболовству
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Астраханский государственный технический университет»
Система менеджмента качества в области образования, воспитания, науки и инноваций сертифицирована
ООО «ДКС РУС» по международному стандарту ISO 9001:2015

Институт морских технологий, энергетики и транспорта

Кафедра «Механика и инженерная графика»

РАСЧЕТ СЖАТОГО СТЕРЖНЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
И КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ
ПО КУРСУ «МЕХАНИКА»**

для студентов направлений

21.03.01 Нефтегазовое дело

13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

20.03.02 Природообустройство и водопользование

Астрахань 2023

Хахов А.А.

Расчет сжатого стержня на устойчивость. Методические указания и контрольные задания по курсу «Механика». – Астрахань: АГТУ, 2023. – 30с.

В пособии представлены методики расчета стержней при центральном сжатии.

Пособие предназначено в помощь студентам для подготовки к текущей аттестации по курсам «Механика», «Прикладная механика» и «Сопротивление материалов».

Методическое пособие обсуждено и рекомендовано к изданию на заседании кафедры «Механика и инженерная графика» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»

Протокол заседания кафедры № 3 от 21.03.2023г.

Рецензент: Славин Б.М., заведующий кафедрой «Механика и инженерная графика», к. т. н., доцент.

© Хахов А.А., 2023

© Астраханский государственный
технический университет, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

1. Основные теоретические сведения.....	4
2. Пример расчета сжатого стержня на устойчивость.....	13
3. Контрольные задания.....	18
Список литературы.....	21
Приложения.....	22

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Основные понятия

Наряду с анализом прочности и жесткости необходим анализ устойчивости конструкции. Под устойчивостью понимают способность систем сохранять их состояние равновесия или движения во времени под действием малых возмущений.

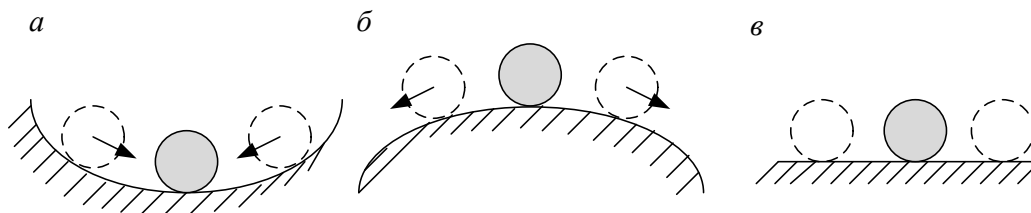


Рисунок 1.1 - Три различных положения равновесия тяжелого шарика:
а – устойчивое, *б* – неустойчивое, *в* – устойчивое безразличное.

Различают три вида равновесия тел: устойчивое, неустойчивое и безразличное (рис. 1.1). Устойчивым называется такое равновесие, при котором тело после малого отклонения от исходного положения возвращается в это положение при устранении воздействия, вызывающего отклонение, неустойчивым – когда тело при малом отклонении не возвращается в исходное положение, а удаляется от него, безразличным – когда тело после отклонения остается в равновесии и в новом положении.

В механике деформируемого твердого тела рассматриваются задачи устойчивости элементов конструкций при их деформировании. Рассмотрим равновесие прямого гибкого упругого стержня, находящегося под действием центрально приложенной сжимающей силы F (рис. 1.2). В зависимости от величины силы стержень может иметь прямолинейную или искривленную формы равновесия. Пока величина силы F меньше некоторого критического значения $F_{кр}$ стержень сохраняет исходную прямолинейную форму равновесия (рис. 1.2, *а*).

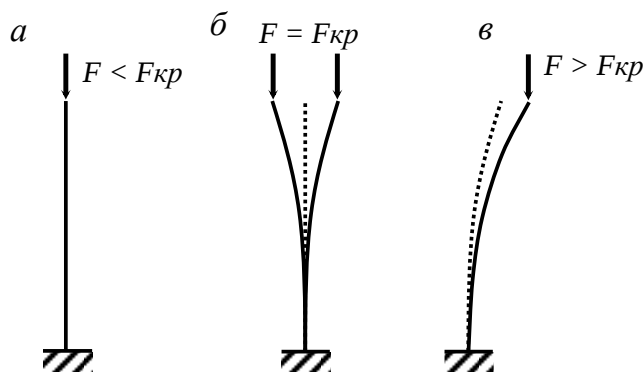


Рисунок 1.2 - Виды равновесия сжатой стойки:
а – устойчивое; *б* – безразличное; *в* – неустойчивое

При решении задач устойчивости может быть использован динамический метод, основанный на исследовании колебаний упругой системы относительно исходного положения равновесия. Если верхний конец стержня слегка отклонить, а затем отпустить, то после ряда колебаний стержень возвратится в первоначальное прямолинейное состояние. Таким образом, при $F < F_{кр}$ прямолинейная форма равновесия стержня является устойчивой. Частота малых колебаний стержня по отношению к исходной прямолинейной форме равновесия зависит от величины сжимающей силы. При возрастании силы частота уменьшается. Когда величина силы достигнет критического значения, частота колебаний обратится в нуль, и стержень придет в состояние безразличного равновесия. Если теперь слегка отклонить стержень от первоначального прямолинейного состояния и затем отпустить, то он останется в изогнутом состоянии (рис. 1.2, б). Таким образом, при $F = F_{кр}$ прямолинейная форма равновесия становится неустойчивой. Происходит раздвоение (бифуркация) форм равновесия, то есть наряду с прямолинейной возможно существование смежной слегка искривленной формы равновесия.

Наименьшая величина нагрузки (в данном случае центрально приложенной сжимающей силы), при которой первоначальная форма равновесия становится неустойчивой, называется критической нагрузкой.

Приложение к стержню силы, равной критической или превышающей ее, приводит к потере устойчивости первоначальной прямолинейной формы равновесия, и стержень изгибается. Это явление называется продольным изгибом. При дальнейшем увеличении сжимающей силы сверх критического значения (рис. 1.2, в) происходит резкое нарастание прогибов и возникновение значительных дополнительных напряжений изгиба. Разрушение конструкции обычно происходит внезапно от изгиба и при малых значениях сжимающих напряжений, когда прочность элемента на сжатие еще далеко не исчерпана.

На рисунке 1.3 приведены примеры потери устойчивости с образованием смежных форм равновесия.

Рама (рис. 1.3, а), в стойках которой возникает только центральное сжатие, при потере устойчивости изгибается, и узлы рамы смещаются по горизонтали. Круглая труба (рис. 1.3, б), находящаяся под действием равномерного внешнего давления, при потере устойчивости приобретает форму эллипса. Тонкая полоса (рис. 1.3, в), работающая на изгиб в вертикальной плоскости, при достижении силой критического значения теряет устойчивость плоской формы изгиба и начинает дополнительно испытывать изгиб в горизонтальной плоскости и кручение.

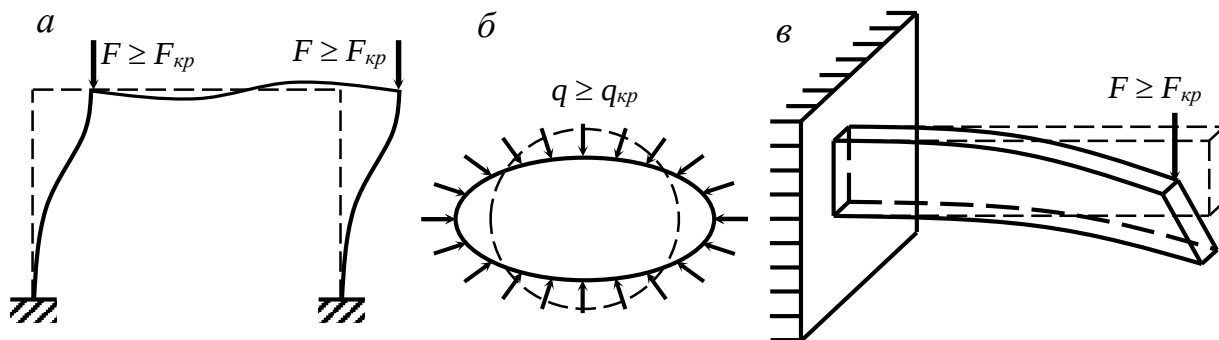


Рисунок 1.3 - Примеры потери устойчивости:
 a – рамы; $б$ – трубы; $в$ – тонкой полосы

1.2. Формула Эйлера для определения критической силы

Рассмотрим решение задачи об устойчивости сжатого стержня силой $F_{кр}$, у которого оба конца закреплены шарнирно (рис. 1.4). Стержень искривился так, что в сечении z прогиб составил y .

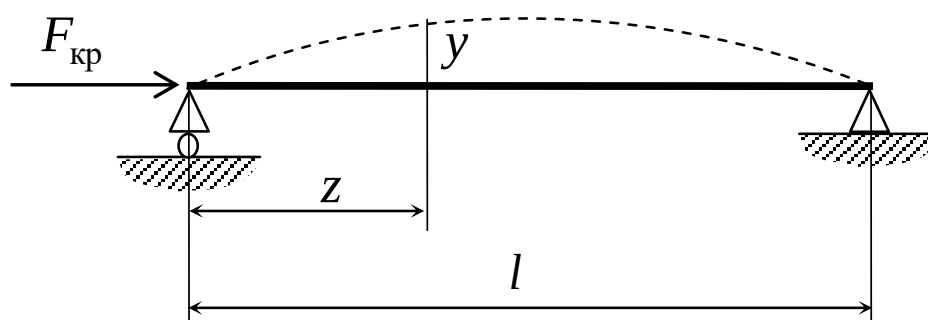


Рисунок 1.4. Продольный изгиб сжатого стержня, шарнирно закрепленного по концам

Записывая дифференциальное уравнение упругой линии балки, и ограничиваясь рассмотрением только малых перемещений, имеем:

$$EI_x y''(z) = M_x(z),$$

где $I_x = I_{\min}$ – минимальный момент инерции сечения.

Изгибающий момент $M_x(z)$, действующий в поперечном сечении стержня, расположенного на расстоянии z от начала системы координат, будет равен

$$M_x = -F_{кр} y.$$

При положительном прогибе в выбранной системе координат знак «минус» означает, что момент является отрицательным. Дифференциальное уравнение изогнутой оси балки в направлении минимальной жесткости в этом случае будет иметь вид:

$$EI_{\min} y'' + F_{\text{кр}} y = 0.$$

Обозначая $\frac{F_{\text{кр}}}{EI_x} = k^2$, получим линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка

$$y'' + k^2 y = 0.$$

Общее решение данного уравнения имеет вид

$$y = A \cos kz + B \sin kz,$$

где A и B – постоянные интегрирования.

Постоянные интегрирования определяем из условий равенства нулю прогибов стержня на опорах. В этом случае имеем: при $z=0$, $y=0$, $A=0$; $z=l$, $y=0$, $B \sin kl = 0$.

Последнее соотношение справедливо при $kl = \pi n$ (n – любое целое число).

Откуда

$$k = \frac{\pi n}{l}.$$

С учетом принятого ранее обозначения, получим

$$F_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 I_{\min} E n^2}{l^2}.$$

Минимальное действительное значение критической силы получится при $n=1$

$$F_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 I_{\min} E}{l^2}.$$

Формула впервые была получена Леонардом Эйлером в 1744 г. и называется формулой Эйлера для определения критической силы.

1.3. Влияние способов закрепления концов стержня на критическую силу

Формула Эйлера получена для случая шарнирного закрепления концов стержня, когда потеря устойчивости происходит по одной полуволне. Для других случаев закрепления формула Эйлера принимает вид

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 I_{\min} E}{(\mu l)^2},$$

где μ – коэффициент приведения длины, зависящий от способа закрепления концов стержня (рис. 1.5).

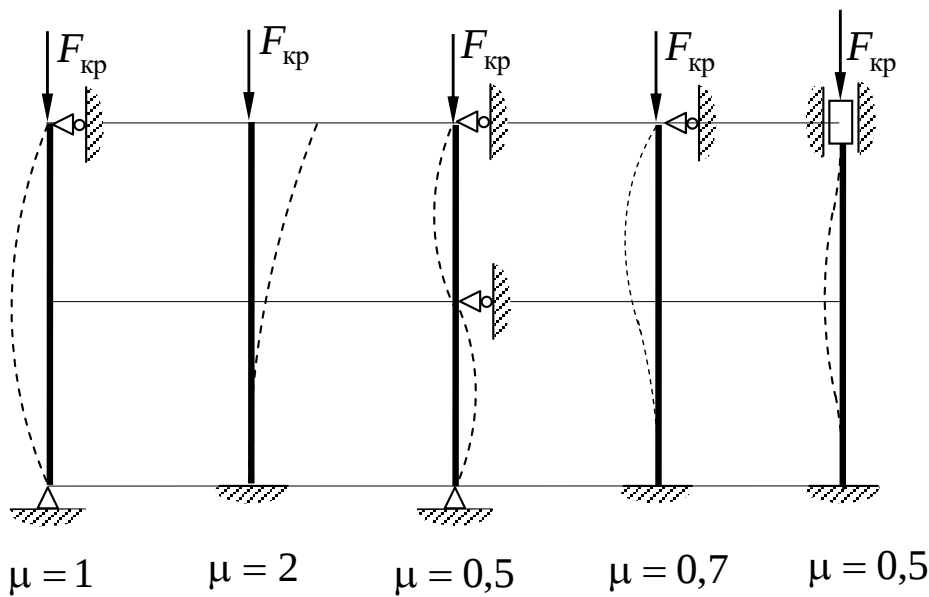


Рисунок 1.5 - Значение коэффициента приведенной длины для сжатых стержней

Критическое напряжение равно

$$\sigma_{кр} = \frac{F_{кр}}{A} = \frac{\pi^2 E I_{\min}}{(\mu l)^2 A} = \frac{\pi^2 E i_{\min}^2}{(\mu l)^2} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{\mu l}{i_{\min}}\right)^2} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2},$$

где $i_{\min} = \sqrt{\frac{I_{\min}}{A}}$ – минимальный радиус инерции;

$\lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}}$ – гибкость стержня.

1.4. Пределы применимости формулы Эйлера

При выводе формулы для критических сил и напряжений, использовалось приближенное дифференциальное уравнение изогнутой оси балки, которое было получено в предположении, что материал стержня подчиняется закону Гука. Таким образом, формулу Эйлера можно применять только для значений напряжений, меньших или равных пределу пропорциональности

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \leq \sigma_{пц} .$$

Откуда

$$\lambda \geq \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{пц}}} .$$

Таким образом, формула Эйлера может применяться при условии

$$\lambda \geq \lambda_{пред} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{пц}}} .$$

Например, для стали марки Ст3 величина $\sigma_{пц}=200..210\text{МПа}$ и $E=2,1 \cdot 10^5\text{МПа}$, предельная гибкость $\lambda_{пр} \approx 100$. Величина предельной гибкости для стали Ст5 $\lambda_{пр} \approx 85$, для дерева может быть принята $\lambda_{пр} \approx 70$, для чугуна $\lambda_{пр} \approx 80$.

В случаях, когда гибкость стержня $\lambda < \lambda_{пред}$ критическое напряжение определяется по эмпирическим зависимостям. В частности, Ф.С.Ясинский предложил следующую формулу для критических по устойчивости напряжений:

$$\sigma_{кр} = a - b\lambda + c\lambda^2 ,$$

где a, b, c - постоянные величины, зависящие от материала стержня.

Для стали Ст3 $a=310\text{МПа}$, $b=1,14\text{МПа}$, $c=0$.

Для стали Ст5 $a=464\text{МПа}$, $b=3,62\text{МПа}$, $c=0$.

Для чугуна СЧ $a=776\text{МПа}$, $b=12\text{МПа}$, $c=0,053$.

Для дерева (сосна при сжатии вдоль волокон) $a=29,3\text{МПа}$, $b=0,194\text{МПа}$, $c=0$.

1.5. Условие устойчивости. Практические расчеты сжатых стержней на устойчивость

При продольном изгибе центрально сжатый стержень теряет несущую способность, когда напряжения в его поперечных сечениях становятся равными критическим. Поэтому необходимо ввести в расчет коэффициент запаса устойчивости n_y по отношению к критическим напряжениям, с помощью которого определяется допускаемое напряжение при расчете на устойчивость

$$[\sigma_y] = \frac{\sigma_{кр}}{n_y}.$$

Условие устойчивости по методу допускаемых напряжений для центрально сжатого стержня записывается в виде, аналогичном условию прочности

$$\sigma = \frac{F}{A} \leq [\sigma_y].$$

Коэффициент запаса устойчивости принимается несколько бóльшим основного коэффициента запаса прочности.

Для пластичных материалов коэффициент запаса прочности

$$n_T = \frac{\sigma_T}{[\sigma]}.$$

Для хрупких материалов коэффициент запаса прочности

$$n_B = \frac{\sigma_B}{[\sigma]}.$$

Для стали $n_y = 1,8 \div 3,0$; для чугуна $n_y = 5,0 \div 5,5$; для дерева $n_y = 2,8 \div 3,2$.

Допускаемое напряжение при расчете на устойчивость можно принять равным некоторой доле от допускаемого напряжения при центральном сжатии

$$[\sigma_y] = \varphi [\sigma].$$

Коэффициент φ , всегда меньший единицы, называется коэффициентом уменьшения допускаемого напряжения при продольном изгибе или коэффициентом продольного изгиба. Он зависит от материала и гибкости стержня. Для пластичного и хрупкого материалов коэффициент уменьшения допускаемого напряжения определяют по формулам:

$$\varphi = \frac{\sigma_{кр} n_T}{\sigma_T n_y};$$

$$\varphi = \frac{\sigma_{кр} n_B}{\sigma_B n_y}.$$

Условие устойчивости при расчете по методу допускаемых напряжений записывают в виде

$$\sigma = \frac{F}{A} \leq \varphi [\sigma] \text{ или } \sigma = \frac{F}{\varphi A} \leq [\sigma].$$

В аналогичном виде может быть представлено условие устойчивости при расчете по методу предельных состояний:

$$\sigma = \frac{F}{A} \leq \varphi \gamma_c R.$$

В этом случае коэффициент продольного изгиба φ называется также коэффициентом уменьшения расчетного сопротивления R при продольном изгибе, γ_c – коэффициент условий работы.

Величины коэффициента φ в зависимости от гибкости λ для различных материалов приводятся в виде таблиц в нормах проектирования. В приложении 1 приведены значения коэффициента продольного изгиба φ для стали, чугуна и дерева.

При расчете сжатых стержней на устойчивость решаются следующие задачи:

1) проверочный расчет на устойчивость

$$\sigma = \frac{F}{\varphi A} \leq [\sigma];$$

2) определение несущей способности, т. е. величины допускаемой нагрузки из условия устойчивости

$$F = \varphi [\sigma] A;$$

3) проектный расчет, т. е. подбор размеров поперечного сечения стойки

$$A = \frac{F}{\varphi [\sigma]}.$$

Из указанных задач более сложной является задача, связанная с подбором сечения, так как в условии прочности на устойчивость содержится две неизвестные величины – площадь поперечного сечения A и коэффициент продольного изгиба φ . Коэффициент φ зависит от гибкости стержня, а гибкость неизвестна, поскольку неизвестны размеры поперечного сечения. Поэтому при подборе сечения приходится использовать метод последовательных приближений. В первом приближении задаются коэффициентом продольного изгиба $\varphi_1 = 0,5 \dots 0,8$. Далее последовательно находятся площадь поперечного сечения A , радиус инерции сечения i , гибкость стержня λ и соответствующее ей действительное значение $\varphi_{\partial 1}$.

Если величины φ_1 и $\varphi_{\partial 1}$ существенно отличаются друг от друга, то во втором приближении принимают

$$\varphi_2 = \frac{\varphi_1 + \varphi_{\partial 1}}{2}.$$

Последующие приближения делаются аналогично. Расчет можно закончить, когда в k -том приближении $\varphi_{\partial k}$ будет превышать φ_k не более чем на 3–5 %. Если $\varphi_{\partial k}$ меньше φ_k то условие устойчивости не выполняется.

Применяется и другой подход, когда во втором и последующих приближениях непосредственно изменяются размеры поперечного сечения и производится проверка условия прочности при продольном изгибе.

2. ПРИМЕР РАСЧЕТА СЖАТОГО СТЕРЖНЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ

Задание

Сжатый стержень (см. рис. 2.1), выполненный из двух швеллеров, нагружен продольной сжимающей силой $F=800\text{кН}$. Длина стержня $l=6\text{м}$. Материал Ст5. Допускаемое напряжение $[\sigma]=200\text{МПа}$. Предел пропорциональности $\sigma_{пц}=280\text{МПа}$.

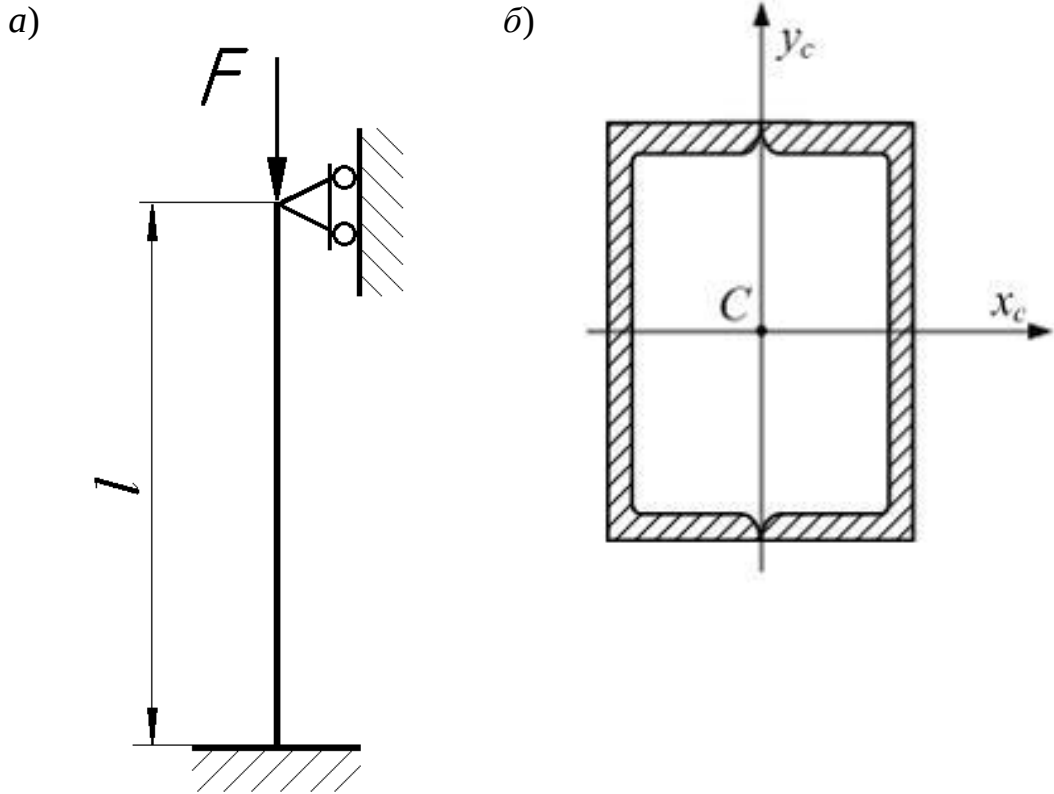


Рисунок 2.1 – Продольно сжатый стержень:
а - расчетная схема; б –поперечное сечение

Требуется:

- 1) подобрать размеры поперечного сечения стержня;
- 2) проверить стержень с принятым сечением на прочность;
- 3) определить критическую силу и коэффициент запаса устойчивости.

Решение

Расчет центрально сжатого стержня на устойчивость производится методом последовательных приближений.

Примем коэффициент продольного изгиба в первом приближении $\varphi_1=0,6$. Выразим из условия устойчивости площадь поперечного сечения стержня

$$A_1 = \frac{F}{\varphi_1[\sigma]} = \frac{800000}{0,6 \cdot 200} = 6666,7 \text{ мм}^2.$$

Требуемая площадь сечения швеллера

$$A_{ув.1} = \frac{A_1}{2} = \frac{6666,7}{2} = 3333,4 \text{ мм}^2 = 33,3 \text{ см}^2.$$

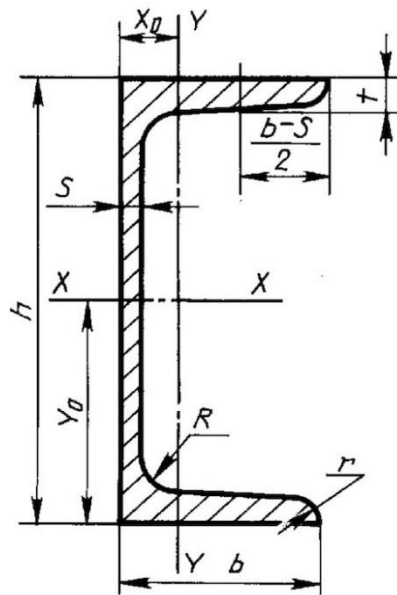


Рисунок 2.2 – Основные геометрические размеры швеллера

Принимаем сечение стержня из двух швеллеров №27, для каждого из которых $h=270\text{мм}$, $b=95\text{мм}$, $A_{ув.1} = 35,2\text{см}^2$, $I_x=4160\text{см}^4$, $I_y=262\text{см}^4$, $x_0=2,47\text{см}$ (см. рис. 2.2)

Для составного сечения:

$$I_{xc} = 2I_x = 2 \cdot 4160 = 8320 \text{ см}^4;$$

$$I_{yc} = 2(I_y + A_{ув.1} \cdot (b - x_0)^2) = 2 \cdot (262 + 35,2 \cdot (9,5 - 2,47)^2) = 4003,2 \text{ см}^4.$$

Так как $I_{yc} < I_{xc}$, то потеря устойчивости будет происходить в плоскости xOz .

Минимальный радиус инерции сечения

$$i_{\min} = i_y = \sqrt{\frac{I_{\min}}{A}} = \sqrt{\frac{I_{yc}}{2A_{ув.1}}} = \sqrt{\frac{4003,2}{2 \cdot 35,2}} = 7,54 \text{ см}.$$

Гибкость стержня

$$\lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}} = \frac{0,7 \cdot 6}{7,54 \cdot 10^{-2}} = 55,7.$$

Методом линейной интерполяции определяем значение коэффициента продольного изгиба φ (см. Приложение 1). При $\lambda = 55,7$ коэффициент $\varphi_{01} = 0,8215$.

Значение φ_{01} существенно отличается от φ_1 . Разница составляет

$$\frac{|0,6 - 0,8215|}{0,6} \cdot 100 \% = 36,9 \%.$$

Проверяем условие устойчивости

$$\sigma = \frac{F}{\varphi_{\partial 1} A_1} \leq [\sigma]$$

или

$$\frac{F}{2A_{ув.1}} \leq \varphi_{\partial 1} [\sigma];$$

$$\frac{800 \cdot 10^3}{2 \cdot 35,2 \cdot 10^2} \leq 0,8215 \cdot 200;$$
$$113,62 \text{ МПа} \leq 164,3 \text{ МПа}.$$

Недонапряжение составляет

$$\frac{164,3 - 113,62}{164,3} \cdot 100\% = 30,8\%,$$

что недопустимо. Необходимо уменьшить сечение.

Примем коэффициент продольного изгиба во втором приближении

$$\varphi_2 = \frac{\varphi_1 + \varphi_{\partial 1}}{2} = \frac{0,6 + 0,8215}{2} = 0,71075.$$

Из условия устойчивости площадь поперечного сечения стержня должна быть не менее

$$A_2 = \frac{F}{\varphi_2 [\sigma]} = \frac{800 \cdot 10^3}{0,71075 \cdot 200} = 5628 \text{ мм}^2.$$

Требуемая площадь сечения швеллера

$$A_{ув.2} = \frac{A_2}{2} = \frac{5628}{2} = 2814 \text{ мм}^2 = 28,14 \text{ см}^2.$$

Принимаем сечение стержня из двух швеллеров №22а, для каждого из которых $A_{ув.2} = 28,8 \text{ см}^2$, $h = 220 \text{ мм}$, $b = 87 \text{ мм}$, $I_x = 2330 \text{ см}^4$, $I_y = 187 \text{ см}^4$, $x_0 = 2,46 \text{ см}$.

Для составного сечения:

$$I_{x_c} = 2I_x = 2 \cdot 2330 = 4660 \text{ см}^4;$$

$$I_{y_c} = 2 \left(I_y + A_{ув.2} \cdot (b - x_0)^2 \right) = 2 \cdot \left(187 + 28,8 \cdot (8,7 - 2,46)^2 \right) = 2616,8 \text{ см}^4.$$

Так как $I_{y_c} < I_{x_c}$, то потеря устойчивости будет происходить в плоскости xOz .

Минимальный радиус инерции сечения

$$i_{\min} = i_y = \sqrt{\frac{I_{\min}}{A}} = \sqrt{\frac{I_{y_c}}{2A_{ув.2}}} = \sqrt{\frac{2616,8}{2 \cdot 28,8}} = 6,74 \text{ см}.$$

Гибкость стержня

$$\lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}} = \frac{0,7 \cdot 6}{6,74 \cdot 10^{-2}} = 62,3.$$

При $\lambda = 62,3$ коэффициент $\varphi_{\partial 2} = 0,7862$ (см. Приложение 1).

Отличие $\varphi_{\partial 2}$ от φ_2 составляет

$$\frac{|0,71075 - 0,7862|}{0,71075} \cdot 100 \% = 10,6 \%$$

Проверяем устойчивость стержня:

$$\begin{aligned} \frac{F}{2A_{шв.2}} &\leq \varphi_{\partial 2}[\sigma]. \\ \frac{800 \cdot 10^3}{2 \cdot 28,8 \cdot 10^2} &\leq 0,7862 \cdot 200. \\ 138,9 \text{ МПа} &\leq 157,2 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Условие устойчивости выполняется, но имеет место небольшое недонапряжение. Недонапряжение составляет

$$\frac{157,2 - 138,9}{157,2} \cdot 100\% = 11,6\%.$$

Примем коэффициент продольного изгиба в третьем приближении

$$\varphi_3 = \frac{\varphi_2 + \varphi_{\partial 2}}{2} = \frac{0,71075 + 0,7862}{2} = 0,7485.$$

Из условия устойчивости площадь поперечного сечения стержня должна быть не менее

$$A_3 = \frac{F}{\varphi_3[\sigma]} = \frac{800000}{0,7485 \cdot 200} = 5344 \text{ мм}^2.$$

Требуемая площадь сечения швеллера

$$A_{шв.3} = \frac{A_3}{2} = \frac{5344}{2} = 2672 \text{ мм}^2 = 26,7 \text{ см}^2.$$

Принимаем сечение стержня из двух швеллеров №22, для каждого из которых $A_{шв.3} = 26,7 \text{ см}^2$, $h = 220 \text{ мм}$, $b = 82 \text{ мм}$, $I_x = 2110 \text{ см}^4$, $I_y = 151 \text{ см}^4$, $x_0 = 2,21 \text{ см}$.

Для составного сечения:

$$\begin{aligned} I_{xc} &= 2I_x = 2 \cdot 2110 = 4220 \text{ см}^4; \\ I_{yc} &= 2(I_y + A_{шв.2} \cdot (b - x_0)^2) = 2 \cdot (151 + 26,7 \cdot (8,2 - 2,21)^2) = 2218 \text{ см}^4. \end{aligned}$$

Так как $I_{yc} < I_{xc}$, то потеря устойчивости будет происходить в плоскости xOz .

Минимальный радиус инерции сечения

$$i_{\min} = i_y = \sqrt{\frac{I_{\min}}{A}} = \sqrt{\frac{I_{yc}}{2A_{шв.2}}} = \sqrt{\frac{2218}{2 \cdot 26,7}} = 6,44 \text{ см}.$$

Гибкость стержня

$$\lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}} = \frac{0,7 \cdot 6}{6,44 \cdot 10^{-2}} = 65,2.$$

При $\lambda = 65,2$ коэффициент $\varphi_{\partial 3} = 0,7688$ (см. Приложение 1).

Отличие $\varphi_{\partial 3}$ от φ_3 составляет

$$\frac{|0,7485 - 0,7688|}{0,7485} \cdot 100 \% = 2,7 \%$$

Проверяем устойчивость стержня:

$$\begin{aligned} \frac{F}{2A_{ув.3}} &\leq \varphi_{\partial 3}[\sigma] \\ \frac{800 \cdot 10^3}{2 \cdot 26,7 \cdot 10^2} &\leq 0,7688 \cdot 200 \\ 149,8 \text{ МПа} &\leq 153,76 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Условие устойчивости выполняется. Недонапряжение составляет

$$\frac{153,76 - 149,8}{153,76} \cdot 100\% = 2,58\%.$$

Окончательно принимаем сечение из двух швеллеров №22, для каждого из которых $A_{ув.} = A_{ув.3} = 26,7 \text{ см}^2$.

Выполним проверку прочности стержня принятого сечения:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{F}{2 A_{ув.}} \leq [\sigma]; \\ \frac{800 \cdot 10^3}{2 \cdot 26,7 \cdot 10^2} &\leq 200; \\ 149,8 \text{ МПа} &\leq 200 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Сечение, принятое из условия устойчивости, удовлетворяет условию прочности.

Предельная гибкость материала стержня

$$\lambda_0 = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{нц}}} = 3,14 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5}{280}} = 83,92.$$

Гибкость стержня принятого сечения $\lambda = 64,6$.

Так как $\lambda < \lambda_0$, то критическую силу определяем по эмпирической зависимости Ясинского

$$\sigma_{кр} = a - b\lambda + c\lambda^2 = 464 - 3,62 \cdot 64,6 + 0 \cdot 64,6^2 = 230,1 \text{ МПа.}$$

$$F_{кр} = \sigma_{кр} \cdot 2A_{ув.} = 230,1 \cdot 2 \cdot 26,7 \cdot 10^2 = 1228734 \text{ Н} = 1228,7 \text{ кН.}$$

Коэффициент запаса устойчивости

$$n_{yc} = \frac{F_{кр}}{F} = \frac{1228,7}{800} = 1,54.$$

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Стержень составного сечения (см. рис. 3.1) нагружен продольной сжимающей силой F . Длина стержня l . Материал стержня Ст3. Допускаемое напряжение $[\sigma]=160\text{МПа}$. Предел пропорциональности $\sigma_{mц} = 200\text{МПа}$. Варианты числовых значений представлены в таблице 3.1.

Требуется:

- 1) подобрать размеры поперечного сечения стержня;
- 2) проверить стержень с принятым сечением на прочность;
- 3) определить критическую силу и коэффициент запаса устойчивости.

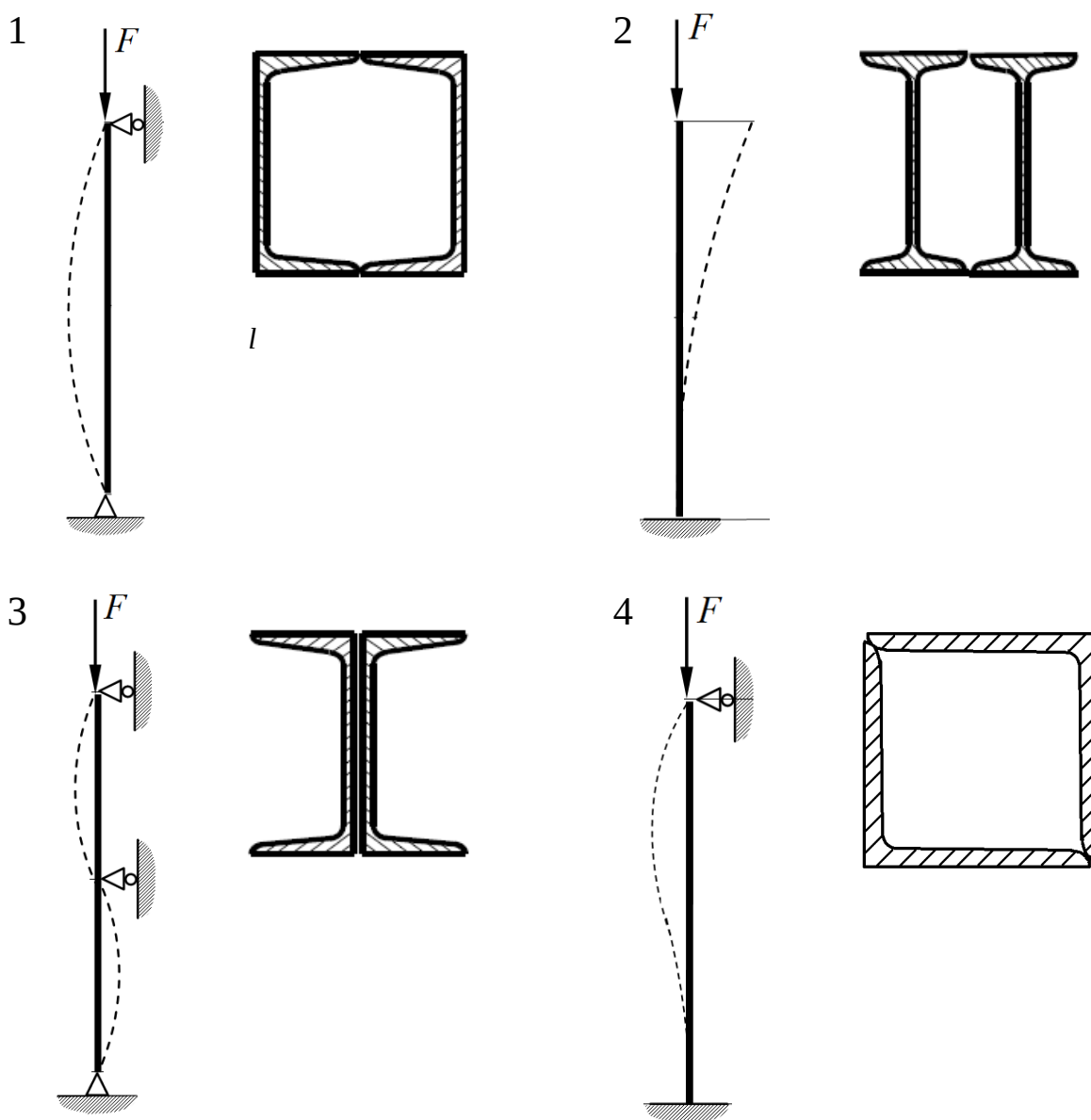


Рис. 3.1. Схемы стержней и виды сечений

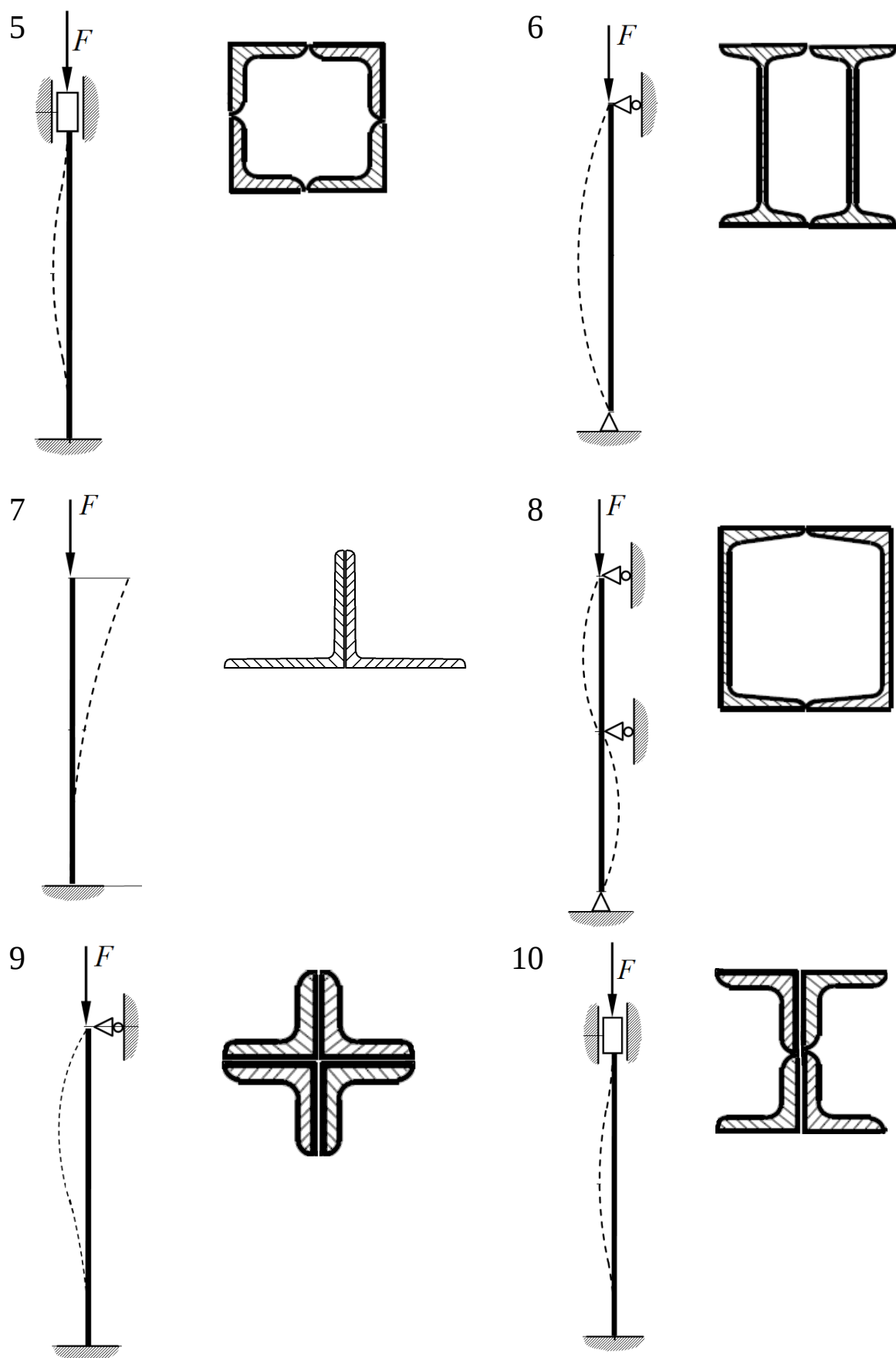


Рис. 3.1. Схемы стержней и виды сечений (продолжение)

Таблица 3.1. Варианты числовых значений

Вариант	Продольная сила F , кН	Длина стержня l , м
1	400	5
2	450	4
3	500	3
4	550	6
5	600	5
6	650	4
7	700	2
8	300	3
9	350	4
10	400	5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

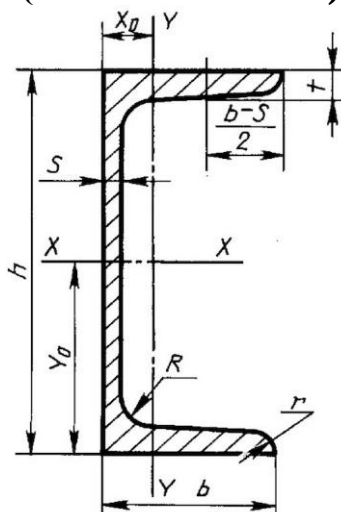
1. Джамай, В.В. Прикладная механика : учебник для академического бакалавриата / В.В. Джамай. Е.А. Самойлов. А.И. Станкевич, Т.Ю. Чуркина : под ред. В.В. Джама. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Издательство Юрайт, 2017. - 360 с. Серия : Бакалавр. Академический курс. - <https://biblio-online.ru/viewer/985F03E6-042F-4BDC-9CBV-CDD56F58461E/prikladnaya-mehanika#page/2>
2. Асадулина, Е.Ю. Сопротивление материалов : учеб. пособие для вузов / Е.Ю. Асадулина. - 2-е изд., испр. и доп. - М. :Издательство Юрайт, 2018.- 279 с. - Серия : Университеты России. <https://biblio-online.ru/viewer/DD3FCFA6-04DF-4243-AC47-9ED8CE306760/soprotivlenie-materialov#page/2>
3. Межецкий, Г.Д. Сопротивление материалов : учебник / Г.Д.Межецкий, Г.Г.Загребин, Н.Н.Решетник. - 5-е изд. - Москва : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2016. - 432 с. : ил. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-394-02628-7; – <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=453911>(24.04.2018).

ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОДОЛЬНОГО ИЗГИБА φ

Гибкость λ	Сталь Ст2, Ст3, Ст4	Сталь Ст5	Чугун СЧ12-28, СЧ15-32, СЧ18-36, СЧ21-40	Дерево
0	1,00	1,00	1,00	1,00
10	0,99	0,98	0,97	0,99
20	0,97	0,96	0,91	0,97
30	0,95	0,93	0,81	0,93
40	0,92	0,90	0,69	0,87
50	0,89	0,85	0,57	0,80
60	0,86	0,80	0,44	0,71
70	0,81	0,74	0,34	0,61
80	0,75	0,67	0,26	0,49
90	0,69	0,59	0,20	0,38
100	0,60	0,50	0,16	0,31
110	0,52	0,43	—	0,25
120	0,45	0,37	—	0,22
130	0,40	0,32	—	0,18
140	0,36	0,28	—	0,16
150	0,32	0,25	—	0,14
160	0,29	0,23	—	0,12
170	0,26	0,21	—	0,11
180	0,23	0,19	—	0,10
190	0,21	0,17	—	0,09
200	0,19	0,15	—	0,08
210	0,17	0,14	—	—
220	0,16	0,13	—	—

ШВЕЛЛЕРЫ СТАЛЬНЫЕ ГОРЯЧЕКАТАНЫЕ

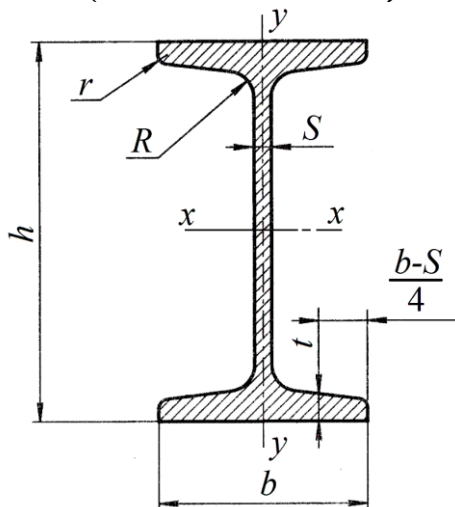
Сортамент
(по ГОСТ 8240–97)



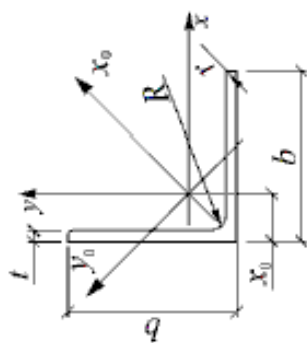
Про- филь	Размеры в мм						Пло- щадь A , см ²	Масса 1 м, кг	I_x , см ⁴	W_x , см ³	i_x , см	S_x , см ³	I_y , см ⁴	W_y , см ³	i_y , см	x_0 , см
	h	b	s	t	R	r										
5	50	32	4,4	7	6	2,5	6,16	4,84	22,8	9,1	1,92	5,59	5,61	2,75	0,95	1,16
6,5	65	36	4,4	7,2	6	2,5	7,51	5,9	48,6	15	2,54	9	8,7	3,68	1,08	1,24
8	80	40	4,5	7,4	6,5	2,5	8,98	7,05	89,4	22,4	3,16	13,3	12,8	4,75	1,19	1,31
10	100	46	4,5	7,6	7	3	10,9	8,59	174	34,8	3,99	20,4	20,4	6,46	1,37	1,44
12	120	52	4,8	7,8	7,5	3	13,3	10,4	304	50,6	4,78	29,6	31,2	8,52	1,53	1,54
14	140	58	4,9	8,1	8	3	15,6	12,3	491	70,2	5,6	40,8	45,4	11	1,7	1,67
14a	140	62	4,9	8,7	8	3	17	13,3	545	77,8	5,66	45,1	57,5	13,3	1,84	1,87
16	160	64	5	8,4	8,5	3,5	18,1	14,2	747	93,4	6,42	54,1	63,3	13,8	1,87	1,8
16a	160	68	5	9	8,5	3,5	19,5	15,3	823	103	6,49	59,4	78,8	16,4	2,01	2
18	180	70	5,1	8,7	9	3,5	20,7	16,3	1090	121	7,24	69,8	86	17	2,04	1,94
18a	180	74	5,1	9,3	9	3,5	22,2	17,4	1190	132	7,32	76,1	105	20	2,18	2,13
20	200	76	5,2	9	9,5	4	23,4	18,4	1520	152	8,07	87,8	113	20,5	2,2	2,07
20a	200	80	5,2	9,7	9,5	4	25,2	19,8	1670	167	8,15	95,9	139	24,2	2,35	2,28
22	220	82	5,4	9,5	10	4	26,7	21	2110	192	8,89	110	151	25,1	2,37	2,21
22a	220	87	5,4	10,2	10	4	28,8	22,6	2330	212	8,99	121	187	30	2,55	2,46
24	240	90	5,6	10	10,5	4	30,6	24	2900	242	9,73	139	208	31,6	2,6	2,42
24a	240	95	5,6	10,7	10,5	4	32,9	25,8	3180	265	9,84	151	254	37,2	2,78	2,67
27	270	95	6	10,5	11	4,5	35,2	27,7	4160	308	10,9	178	262	37,3	2,73	2,47
30	300	100	6,5	11	12	5	40,5	31,8	5810	387	12	224	327	43,6	2,84	2,52
33	330	105	7	11,7	13	5	46,5	36,5	7980	484	13,1	281	410	51,8	2,97	2,59
36	360	110	7,5	12,6	14	6	53,4	41,9	10820	601	14,2	350	513	61,7	3,1	2,68
40	400	115	8	13,5	15	6	61,5	48,3	15220	761	15,7	444	642	73,4	3,23	2,75

ДВУТАВРЫ СТАЛЬНЫЕ ГОРЯЧЕКАТАНЫЕ

Сортамент
(по ГОСТ 8239-89)



Но- мер дву- тавра	Размеры						Пло- щадь сече- ния, см ²	Масса 1 м, кг	Справочные значения для осей								
	h	b	s	t	R	r			x – x				y – y				
					не более						I _x , см ⁴	W _x , см ³	i _x , см	S _x , см ³	I _y , см ⁴	W _y , см ³	i _y , см
мм																	
10	100	55	4,5	7,2	7,0	2,5	12,0	9,46	198	39,7	4,06	23,0	17,9	6,49	1,22		
12	120	64	4,8	7,3	7,5	3,0	14,7	11,5	350	58,4	4,88	33,7	27,9	8,72	1,38		
14	140	73	4,9	7,5	8,0	3,0	17,4	13,7	572	81,7	5,73	46,8	41,9	11,5	1,55		
16	160	81	5,0	7,8	8,5	3,5	20,2	15,9	873	109	6,57	62,3	58,6	14,5	1,70		
18	180	90	5,1	8,1	9,0	3,5	23,4	18,4	1290	143	7,42	81,4	82,6	18,4	1,88		
18a	180	100	5,1	8,3	9,0	3,5	25,4	19,9	1430	159	7,51	89,8	114	22,8	2,12		
20	200	100	5,2	8,4	9,5	4,0	26,8	21,0	1840	184	8,28	104	115	23,1	2,07		
20a	200	110	5,2	8,6	9,5	4,0	28,9	22,7	2030	203	8,37	114	155	28,2	2,32		
22	220	110	5,4	8,7	10,0	4,0	30,6	24,0	2550	232	9,13	131	157	28,6	2,27		
22a	220	120	5,4	8,9	10,0	4,0	32,8	25,8	2790	254	9,22	143	206	34,3	2,5		
24	240	115	5,6	9,5	10,5	4,0	34,8	27,3	3460	289	9,97	163	198	34,5	2,37		
24a	240	125	5,6	9,8	10,5	4,0	37,5	29,4	3800	317	10,1	178	260	41,6	2,63		
27	270	125	6,0	9,8	11,0	4,5	40,2	31,5	5010	371	11,2	210	260	41,5	2,54		
27a	270	135	6,0	10,2	11,0	4,5	43,2	33,9	5500	407	11,3	229	337	50,0	2,80		
30	300	135	6,5	10,2	12,0	5,0	46,5	36,5	7080	472	12,3	268	337	49,9	2,69		
30a	300	145	6,5	10,7	12,0	5,0	49,9	39,2	7780	518	12,5	292	436	60,1	2,95		
33	330	140	7,0	11,2	13,0	5,0	53,8	42,2	9840	597	13,5	339	419	59,9	2,79		
36	360	145	7,5	12,3	14,0	6,0	61,9	48,6	13380	743	14,7	423	516	71,1	2,89		
40	400	155	8,3	13,0	15,0	6,0	72,6	57,0	19062	953	16,2	545	667	86,1	3,03		
45	450	160	9,0	14,2	16,0	7,0	84,7	66,5	27696	1231	18,1	708	808	101	3,09		
50	500	170	10,0	15,2	17,0	7,0	100,0	78,5	39727	1589	19,9	919	1043	123	3,23		
55	550	180	11,0	16,5	18,0	7,0	118,0	92,6	55962	2035	21,8	1181	1356	151	3,39		
60	600	190	12,0	17,8	20,0	8,0	138,0	108	76806	2560	23,6	1491	1725	182	3,54		



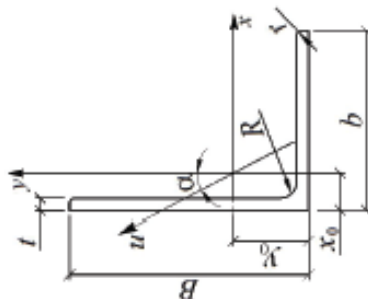
Сортамент равнополочных уголков по ГОСТ 8509—93

Номер уголка	b	t	R	r	A, см ²	Справочные значения величин для осей										Мас- са 1 м, кг	
						x				x ₀		y ₀			I _{xy} , см ⁴		x ₀ , см
						I _x , см ⁴	W _x , см ³	i _x , см	I _{x0 max} , см ⁴	i _{x0 max} , см	I _{y0} , см ⁴	W _{y0} , см ³	i _{y0} , см				
5	50	4	5,5	1,8	3,89	9,21	2,54	1,54	14,63	1,94	3,80	1,95	0,99	5,42	1,38	3,05	
		5	5,5	1,8	4,80	11,20	3,13	1,53	17,77	1,92	4,63	2,30	0,98	6,57	1,42	3,77	
		6	5,5	1,8	5,69	13,07	3,69	1,52	20,72	1,91	5,43	2,63	0,98	7,65	1,46	4,47	
5,6	56	4	6,0	2,0	4,38	13,10	3,21	1,73	20,79	2,18	5,41	2,52	1,11	7,69	1,52	3,44	
		5	6,0	2,0	5,41	15,97	3,96	1,72	25,36	2,16	6,59	2,97	1,10	9,41	1,57	4,25	
6,3	63	4	7,0	2,3	4,96	18,86	4,09	1,95	29,90	2,45	7,81	3,26	1,25	11,00	1,69	3,90	
		5	7,0	2,3	6,13	23,10	5,05	1,94	36,80	2,44	9,52	3,87	1,25	13,70	1,74	4,81	
		6	7,0	2,3	7,28	27,06	5,98	1,93	42,91	2,43	11,18	4,44	1,24	15,90	1,78	5,72	
7	70	4,5	8,0	2,7	6,20	29,04	5,67	2,16	46,03	2,72	12,04	4,53	1,39	17,00	1,88	4,87	
		5	8,0	2,7	6,86	31,94	6,27	2,16	50,67	2,72	13,22	4,92	1,39	18,70	1,90	5,38	
		6	8,0	2,7	8,15	37,58	7,43	2,15	59,64	2,71	15,52	5,66	1,38	22,10	1,94	6,39	
		7	8,0	2,7	9,42	42,98	8,57	2,14	68,19	2,69	17,77	6,31	1,37	25,20	1,99	7,39	
		8	8,0	2,7	10,67	48,16	9,68	2,12	76,35	2,68	19,97	6,99	1,37	28,20	2,02	8,37	
		5	9,0	3,0	7,39	39,53	7,21	2,31	62,65	7,91	16,41	5,74	1,49	23,10	2,02	5,80	
7,5	75	6	9,0	3,0	8,78	46,57	8,57	2,30	73,87	2,90	19,28	6,62	1,48	27,30	2,06	6,89	
		7	9,0	3,0	10,15	53,34	9,89	2,29	84,61	2,89	22,07	7,43	1,47	31,20	2,10	7,96	

Номер уголка	b	t	R	r	A, см ²	Справочные значения величин для осей										Мас- са 1 м, кг	
						x				x ₀		y ₀			I _{xy} , см ⁴		x ₀ , см
						I _x , см ⁴	W _x , см ³	i _x , см	I _{x0 max} , см ⁴	i _{x0 max} , см	I _{y0} , см ⁴	W _{y0} , см ³	i _{y0} , см				
7,5	75	8	9,0	3,0	11,50	59,84	11,18	2,28	94,89	2,87	24,80	8,16	1,47	35,00	2,15	9,02	
		9	9,0	3,0	12,83	66,10	12,43	2,27	104,72	2,86	27,48	8,91	1,46	38,60	2,18	10,07	
	8	80	5,5	9,0	3,0	8,63	52,68	9,03	2,47	83,56	3,11	21,80	7,10	1,59	30,90	2,17	6,78
			6	9,0	3,0	9,38	56,97	9,80	2,47	90,40	3,11	23,54	7,60	1,58	33,40	2,19	7,36
9		90	7	9,0	3,0	10,85	65,31	11,32	2,45	103,60	3,09	26,97	8,55	1,58	38,30	2,23	8,51
			8	9,0	3,0	12,30	73,36	12,80	2,44	116,39	3,08	30,32	9,44	1,57	43,00	2,27	9,65
	10	100	6	10,0	3,3	10,61	82,10	12,49	2,78	130,00	3,50	33,97	9,88	1,79	48,10	2,43	8,33
			7	10,0	3,3	12,28	94,30	14,45	2,77	149,67	3,49	38,94	11,15	1,78	55,40	2,47	9,64
11		110	8	10,0	3,3	13,93	106,11	16,36	2,76	168,42	3,48	43,80	12,34	1,77	62,30	2,51	10,93
			9	10,0	3,3	15,60	118,00	18,29	2,75	186,00	3,46	48,60	13,48	1,77	68,00	2,55	12,20
	12,5	125	6,5	12,0	4,0	12,82	122,10	16,69	3,09	193,46	3,89	50,73	13,38	1,99	71,40	2,68	10,06
			7	12,0	4,0	13,75	130,59	17,90	3,08	207,01	3,88	54,16	14,13	1,98	76,40	2,71	10,79
13,5		135	8	12,0	4,0	15,60	147,19	20,30	3,07	233,46	3,87	60,92	15,66	1,98	86,30	2,75	12,25
			10	12,0	4,0	19,24	178,95	24,97	3,05	283,83	3,84	74,08	18,51	1,96	110,00	2,83	15,10
	14,5	145	12	12,0	4,0	22,80	208,90	29,47	3,03	330,95	3,81	86,84	21,10	1,95	122,00	2,91	17,90
			14	12,0	4,0	26,28	237,15	33,83	3,00	374,98	3,78	99,32	23,49	1,94	138,00	2,99	20,63
15,5		155	16	12,0	4,0	29,68	263,82	38,04	2,98	416,04	3,74	111,61	25,79	1,94	152,00	3,06	23,30
			7	12,0	4,0	15,15	175,61	21,83	3,40	278,54	4,29	72,68	17,36	2,19	106,00	2,96	11,89
	16,5	165	8	12,0	4,0	17,20	198,17	24,77	3,39	314,51	4,28	81,83	19,29	2,18	116,00	3,00	13,50
			8	14,0	4,6	19,69	294,36	32,20	3,87	466,76	4,87	121,98	25,67	2,49	172,00	3,36	15,46
17,5		175	9	14,0	4,6	22,00	327,48	36,00	3,86	520,00	4,86	135,88	28,26	2,48	192,00	3,40	17,30
			10	14,0	4,6	24,33	359,82	39,74	3,85	571,04	4,84	148,59	30,45	2,47	211,00	3,45	19,10

Номер уголка	b	t	R	r	A, см ²	Справочные значения величин для осей											Мас- са 1 м, кг
						x			x ₀			y ₀			I _{xy} , см ⁴	x ₀ , см	
						I _x , см ⁴	W _x , см ³	i _x , см	I _{x0 max} , см ⁴	i _{x0 max} , см	I _{y0} , см ⁴	W _{y0} , см ³	i _{y0} , см				
12,5	125	12	14,0	4,6	28,89	422,23	47,06	3,82	670,02	4,82	174,43	34,94	2,46	248,00	3,53	22,68	
		14	14,0	4,6	33,37	481,76	54,17	3,80	763,90	4,78	199,62	39,10	2,45	282,00	3,61	26,20	
		16	14,0	4,6	37,77	538,56	61,09	3,78	852,84	4,75	224,29	43,10	2,44	315,00	3,68	29,65	
14	140	9	14,0	4,6	24,72	465,72	45,55	4,34	739,42	5,47	192,03	35,92	2,79	274,00	3,76	19,41	
		10	14,0	4,6	27,33	512,29	50,32	4,33	813,62	5,46	210,96	39,05	2,78	301,00	3,82	21,45	
		12	14,0	4,6	32,49	602,49	59,66	4,31	956,98	5,43	248,01	44,97	2,76	354,00	3,90	25,50	
16	160	10	16,0	5,3	31,43	774,24	66,19	4,96	1229,10	6,25	319,33	52,52	3,19	455,00	4,30	24,67	
		11	16,0	5,3	34,42	844,21	72,44	4,95	1340,06	6,24	347,77	56,53	3,18	496,00	4,35	27,02	
		12	16,0	5,3	37,39	912,89	78,62	4,94	1450,00	6,23	375,78	60,53	3,17	537,00	4,39	29,35	
18	180	14	16,0	5,3	43,57	1046,47	90,77	4,92	1662,13	6,20	430,81	68,15	3,16	615,00	4,47	34,20	
		16	16,0	5,3	49,07	1175,19	102,64	4,89	1865,73	6,17	484,64	75,92	3,14	690,00	4,55	38,52	
		18	16,0	5,3	54,79	1290,24	114,24	4,87	2061,03	6,13	537,46	82,08	3,13	771,00	4,63	43,01	
18	180	20	16,0	5,3	60,40	1418,85	125,60	4,85	2248,26	6,10	589,43	90,02	3,12	830,00	4,70	47,41	
		11	16,0	5,3	38,80	1216,44	92,47	5,60	1933,10	7,06	499,78	72,86	3,59	716,00	4,85	30,47	
		12	16,0	5,3	42,19	1316,62	100,41	5,59	2092,78	7,04	540,45	78,15	3,58	776,00	4,89	33,12	
20	200	12	18,0	6,0	47,10	1822,78	124,61	6,22	2896,16	7,84	749,40	98,68	3,99	1073,00	5,37	36,97	
		13	18,0	6,0	50,85	1960,77	134,44	6,21	3116,18	7,83	805,35	105,07	3,98	1156,00	5,42	39,92	
		14	18,0	6,0	54,60	2097,00	144,17	6,20	3333,00	7,81	861,00	111,50	3,97	1236,00	5,46	42,80	
20	200	16	18,0	6,0	61,98	2362,57	163,37	6,17	3755,39	7,78	969,74	123,77	3,96	1393,00	5,54	48,65	
		20	18,0	6,0	76,54	2871,47	200,37	6,12	4860,42	7,72	1181,92	146,62	3,93	1689,00	5,70	60,08	
		25	18,0	6,0	94,29	3466,21	245,59	6,06	5494,04	7,63	1438,38	172,68	3,91	2028,00	5,89	74,02	
		30	18,0	6,0	111,54	4019,60	288,57	6,00	6351,05	7,55	1698,16	193,06	3,89	2332,00	6,07	87,56	

Номер уголка	b	t	R	r	A, см ²	Справочные значения величин для осей										Мас- са 1 м, кг		
						x				x ₀		y ₀					I _{xy} , см ⁴	x ₀ , см
						I _x , см ⁴	W _x , см ³	i _x , см	I _{x0 max} , см ⁴	i _{x0 max} , см	I _{y0} , см ⁴	W _{y0} , см ³	i _{y0} , см					
22	220	14	21,0	7,0	60,38	2814,36	175,18	6,83	4470,15	8,60	1158,56	138,62	4,38	1655,00	5,91	47,40		
		16	21,0	7,0	68,58	3175,44	198,71	6,80	5045,37	8,58	1305,52	153,34	4,36	1869,00	6,02	53,83		
		16	24,0	8,0	78,40	4717,10	258,43	7,76	7492,10	9,78	1942,09	203,45	4,98	2775,00	6,75	61,55		
		18	24,0	8,0	87,72	5247,24	288,82	7,73	8336,69	9,75	2157,78	223,39	4,96	3089,00	6,83	68,86		
25	250	20	24,0	8,0	96,96	5764,87	318,76	7,71	9159,73	9,72	2370,01	242,52	4,94	3395,00	6,91	76,11		
		22	24,0	8,0	106,12	6270,32	348,26	7,69	9961,30	9,69	2579,04	260,52	4,93	3691,00	7,00	83,31		
		25	24,0	8,0	119,71	7006,39	391,72	7,65	11125,52	9,64	2887,26	287,14	4,91	4119,00	7,11	93,97		
		28	24,0	8,0	133,12	7716,86	434,25	7,61	12243,84	9,59	3189,89	311,98	4,90	4527,00	7,23	104,50		
		30	24,0	8,0	141,96	8176,82	462,11	7,59	12964,66	9,56	3388,98	327,82	4,89	4788,00	7,31	111,44		
		35	24,0	8,0	163,71	9281,05	530,11	7,53	14682,73	9,47	3879,37	366,13	4,87	5401,68	7,53	128,51		



Сортамент уголков неравнополочных по ГОСТ 8510—86*

Номер уголка	Справочные величины для осей					A_{x^2} см ²	и										x_0 см	y_0 см	I_{xy^4} см ⁴	tg α	Масса 1 м уголка, кг
	мм			х			у			и											
	B	b	t	R	r		I_{x^4} см ⁴	W_{x^3} см ³	i_{x^2} см	I_{y^4} см ⁴	W_{y^3} см ³	i_{y^2} см	I_{u^4} см ⁴	W_{u^3} см ³	i_{u^2} см						
6,5/5*	65	50	5	6,0	2,0	5,56	23,41	5,20	2,05	12,08	3,23	1,47	6,41	2,68	1,07	1,26	2,00	9,77	0,576	4,36	
			6			6,60	27,46	6,16	2,04	14,12	3,82	1,46	7,52	3,15	1,07	1,30	2,04	11,46	0,575	5,18	
			7			7,62	31,32	7,08	2,03	16,05	4,38	1,45	8,60	3,59	1,06	1,34	2,08	12,94	0,571	5,98	
			8			8,62	35,00	7,99	2,02	18,88	4,93	1,44	9,65	4,02	1,06	1,37	2,12	13,61	0,570	6,77	
7/4,5	70	45	5	7,5	2,5	5,59	27,76	5,88	2,23	9,05	2,62	1,27	5,34	2,20	0,98	1,05	2,28	9,12	0,406	4,39	
			5			6,11	34,81	6,81	2,39	12,47	3,25	1,43	7,24	2,73	1,09	1,17	2,39	12,00	0,436	4,79	
			6			7,25	40,92	8,08	2,38	14,60	3,85	1,42	8,48	3,21	1,08	1,21	2,44	14,10	0,435	5,69	
			7*			8,37	46,77	9,31	2,36	16,61	4,43	1,41	9,69	3,69	1,08	1,25	2,48	16,18	0,435	6,57	
7,5/5	75	60	8	8,0	2,7	9,47	52,38	10,52	2,35	18,52	4,88	1,40	10,87	4,14	1,07	1,29	2,52	17,80	0,430	7,43	
			5			6,36	41,64	7,71	2,56	12,68	3,28	1,41	7,57	2,75	1,00	1,13	2,60	13,20	0,387	4,49	
			6			7,55	46,98	9,15	2,55	14,85	3,88	1,40	8,88	3,24	1,08	1,17	2,65	15,50	0,386	5,92	
			6			8,15	52,06	9,42	2,53	25,18	5,58	1,76	13,61	4,66	1,29	1,49	2,47	20,98	0,547	6,39	
8/6*	80	60	7	8,0	2,7	9,42	59,61	10,87	2,52	28,74	6,43	1,75	15,58	5,34	1,29	1,53	2,52	24,01	0,546	7,39	
			8			10,67	66,88	12,38	2,50	32,15	7,26	1,74	17,49	5,99	1,28	1,57	2,56	26,83	0,544	8,37	
			5,5			7,86	65,28	10,74	2,88	19,67	4,53	1,58	11,77	3,81	1,22	1,26	2,92	20,54	0,384	6,17	
			6			8,54	70,58	11,66	2,88	21,22	4,91	1,58	12,70	4,12	1,22	1,28	2,95	22,23	0,384	6,70	
9/5,6	90	56	8	9,0	3,0	11,18	90,87	15,24	2,85	27,08	6,39	1,56	16,29	5,32	1,21	1,36	3,04	28,33	0,380	8,77	

Номер уголка	B	b	t	R	r	A _x , см ²	Справочные величины для осей										x ₀ , см	y ₀ , см	I _{xy} , см ⁴	tg α	Масса 1 м уголка, кг
							X			Y			И								
							I _x , см ⁴	W _x , см ³	i _x , см	I _y , см ⁴	W _y , см ³	i _y , см	I _u , см ⁴	W _u , см ³	i _u , см						
10/6,3			6		—	9,58	98,29	14,52	3,20	30,58	6,27	1,79	18,20	5,27	1,38	1,42	3,23	31,50	0,393	7,53	
	100	63	7	—	—	11,09	112,86	16,78	3,19	34,99	7,23	1,78	20,83	6,06	1,37	1,46	3,28	36,10	0,392	8,70	
			8			12,57	126,96	19,01	3,18	39,21	8,17	1,77	23,38	6,82	1,36	1,50	3,32	40,50	0,391	9,87	
			10			15,47	153,95	23,32	3,15	47,18	9,99	1,75	28,34	8,31	1,35	1,58	3,40	48,60	0,387	12,14	
10/6,5*	100	65	7	10,0	3,3	11,23	114,05	16,87	3,19	38,32	7,70	1,85	22,77	6,43	1,41	1,52	3,24	38,00	0,415	8,81	
			8			12,73	128,31	19,11	3,18	42,96	8,70	1,84	25,24	7,26	1,41	1,56	3,28	42,64	0,414	9,99	
			10			15,67	155,52	23,45	3,15	51,68	10,64	1,82	30,60	8,83	1,40	1,64	3,37	51,18	0,410	12,30	
11/7	110	70	6,5	—	—	11,45	142,42	19,11	3,53	45,61	8,42	2,00	26,94	7,05	1,53	1,58	3,55	46,80	0,402	8,98	
			8			13,93	171,54	23,22	3,51	54,64	10,20	1,98	32,31	8,50	1,52	1,64	3,61	55,90	0,400	10,93	
12,5/8			7	11,0	3,7	14,06	226,53	26,67	4,01	73,73	11,89	2,29	43,40	9,96	1,76	1,80	4,01	74,70	0,407	11,04	
	125	60	8			15,98	225,62	30,26	4,00	80,95	13,47	2,28	48,82	11,25	1,75	1,84	4,05	84,10	0,406	12,53	
			10			19,70	311,61	37,27	3,98	100,47	16,52	2,26	59,33	13,74	1,74	1,92	4,14	102,00	0,404	15,47	
			12			23,36	364,79	44,07	3,95	116,84	19,46	2,24	69,47	16,11	1,72	2,00	4,22	118,00	0,400	18,34	
14/9	140	90	8	12,0	4,0	18,00	363,68	38,25	4,49	119,79	17,19	2,58	70,27	14,39	1,58	2,03	4,49	121,00	0,411	4,13	
			10			22,24	444,45	47,19	4,47	145,54	21,14	2,58	85,51	17,58	1,96	2,12	4,58	147,00	0,400	17,46	
16/10			9	13,0	4,3	22,87	605,97	56,04	5,15	186,03	23,96	2,85	110,40	20,01	2,20	2,24	5,19	194,00	0,391	17,96	
	160	100	10			25,28	666,59	61,91	5,13	204,09	26,42	2,84	121,16	22,02	2,19	2,28	5,23	213,00	0,390	19,85	
			12			30,04	784,22	73,42	5,11	238,75	31,23	2,82	142,14	25,93	2,18	2,36	5,32	249,00	0,388	23,58	
			14			34,72	897,19	84,65	5,08	271,60	35,89	2,80	162,49	29,75	2,16	2,43	5,40	282,00	0,385	27,26	
18/11	180	110	10	—	—	28,33	952,28	78,59	5,80	276,37	32,27	3,12	165,44	26,96	2,42	2,44	5,83	295,00	0,376	22,20	
			12			33,69	1122,56	93,33	5,77	324,09	38,20	3,10	194,28	31,83	2,40	2,52	5,97	348,00	0,374	26,40	
20/12,5			11	14,0	4,7	34,87	1449,02	107,31	6,45	446,36	45,98	3,58	263,84	38,27	2,75	2,79	6,50	465,00	0,392	27,37	
	200	125	12			37,89	1568,19	116,51	6,43	481,93	49,85	3,57	285,04	41,45	2,74	2,83	6,54	503,00	0,392	29,74	
			14			43,87	1800,83	134,64	6,41	550,77	57,43	3,54	326,54	47,57	2,73	2,91	6,62	575,00	0,390	34,43	
								16	49,77	2026,08	152,41	6,38	616,66	64,83	3,52	366,99	53,56	2,72	2,99	6,71	643,00

