

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

О.В. Новикова
В.Э. Цой

РАСЧЕТЫ НА ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Методические указания к курсовой работе

по дисциплине «Сопротивление материалов»
для студентов, обучающихся по направлению подготовки
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Москва
Издательство МЭИ
2026

УДК 539.4
ББК 30.121
Н 731

*Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ»
в качестве производственно-практического издания*

Подготовлено на кафедре робототехники, мехатроники,
динамики и прочности машин

Рецензент: докт. техн. наук, проф. каф. РМДиПМ Е.В. Позняк

Новикова, О.В.

Н 731 Расчеты на прочность элементов конструкций электротехниче-
ского оборудования: метод. указания / О.В. Новикова, В.Э. Цой. –
М.: Издательство МЭИ, 2026. – 48 с.

Изложены основные требования и указания по выполнению курсо-
вой работы по дисциплине «Соппротивление материалов». Приведены ос-
новные расчетные формулы, контрольные вопросы по дисциплине, спра-
вочные данные и методические указания, необходимые для решения заданий
курсовой работы.

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02
«Электроэнергетика и электротехника». Образовательные программы:
«Электропривод и автоматика», «Электротехнология», «Электрический
транспорт», «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, ор-
ганизаций и учреждений», «Электромеханика, электрические и электронные
аппараты», «Электрооборудование летательных аппаратов и автомоби-
лей», «Инновационные электротехнические материалы и изделия», «Техно-
генная безопасность в электроэнергетике и электротехнике».

**УДК 539.4
ББК 30.121**

© О.В. Новикова, В.Э. Цой, 2026
© Национальный исследовательский
университет «МЭИ», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Указания по выполнению и оформлению курсовой работы	5
Содержание курсовой работы	6
Список рекомендуемой литературы	10
Приложение 1. Основные расчетные формулы	11
Приложение 2. Исходные данные к заданиям курсовой работы	13
Приложение 3. Справочные данные к решению заданий курсовой работы	21
Приложение 4. Методические указания по решению заданий курсовой работы	23
Приложение 5. Сортамент прокатной стали	38
Приложение 6. Прикладные вопросы и задания к защите курсовой работы	45
Приложение 7. Технологическая карта семестра	47

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебным планом подготовки бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» предусмотрено изучение дисциплины «Сопротивление материалов» (СМ) в третьем семестре. Данная дисциплина является одной из фундаментальных в системе инженерного образования, закладывающей основы инженерных подходов к решению прикладных задач. Знания и навыки, полученные при ее освоении, необходимы для успешного изучения специальных дисциплин и дальнейшей профессиональной деятельности.

Неотъемлемой частью изучения дисциплины СМ является выполнение курсовой работы. Ее цель – систематизация, закрепление и углубление теоретических знаний, а также приобретение практических навыков применения инженерных методов к расчету элементов конструкций электротехнического оборудования на прочность, жесткость и устойчивость. Важным аспектом работы является и освоение правил оформления результатов инженерных расчетов.

Курсовая работа включает в себя комплекс заданий, охватывающих ключевые разделы дисциплины: расчеты на прочность при растяжении (сжатии), кручении, изгибе и сложном нагружении.

Настоящие методические указания призваны помочь студенту в последовательном изучении курса и выполнении всех этапов работы. Структура пособия включает как общие положения, так и необходимый справочный материал. В приложениях содержатся основные расчетные формулы (Приложение 1), варианты исходных данных (Приложение 2), справочные данные (Приложение 3), методические указания по решению заданий (Приложение 4), сортамент прокатной стали (Приложение 5), примерный перечень вопросов к защите (Приложение 6), а также технологическая карта семестра (Приложение 7).

Завершающим этапом является защита курсовой работы, требующая не только верно выполненных расчетов, но и осмысления полученных результатов. Таким образом, выполнение данной работы способствует формированию у студента инженерного мышления, умения работать со справочной литературой и принимать обоснованные решения при проведении прочностных расчетов элементов конструкций.

УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

- Курсовая работа содержит девять заданий, каждое из которых выполняется и оформляется отдельно в сроки, указанные преподавателем.
- Текстовая часть работы (отчет) выполняется на листах форматом А4 (210х297) мм и должна представлять последовательное изложение решения предложенных заданий. Бланк задания вкладывается в отчет, после титульного листа.
- Текст пишется четко и аккуратно на одной стороне листа. Слева оставляются поля шириной 30 мм, справа – 15 мм, сверху и снизу – по 20 мм. Запись условий каждого задания обязательна.
- Все схемы, эпюры, графики, рисунки выполняются на отдельных листах бумаги форматом А4 с помощью чертежных инструментов и с соблюдением масштаба. Рисунки должны иметь подрисовочные надписи и порядковый номер. На схемах следует проставлять как буквенные обозначения, так и числовые значения размеров, нагрузок и опорных реакций с указанием соответствующих размерностей.
- Числовые данные для заданий принимаются по таблицам исходных данных (Приложение 2), приводятся в тексте задания при изложении решения и непосредственно на чертежах и рисунках отчета.
- Все расчеты должны выполняться с соблюдением правил приближенных вычислений с точностью до трех значащих цифр. Если вычисления выполняются на ПК, в отчете приводится описание программы, подшиваются текст программы и распечатка числовых результатов.
- После проверки работы преподавателем студент должен внести исправления в соответствии с внесенными замечаниями и сдать их вновь вместе с первым вариантом выполнения. При исправлении проверенной работы не разрешается стирать сделанные преподавателем замечания. Мелкие исправления проводятся в соответствующих местах задания (обязательно другими чернилами), крупные исправления выполняются на отдельных листах и подшиваются к расчету, со ссылкой на них в месте ошибки.
- Использование искусственного интеллекта (ИИ) при решении задач не допускается. Помощью ИИ можно воспользоваться только при написании расчетных программ, в этом случае следует указать текст запроса и тщательно проанализировать программный код.
- Курсовая работа без бланка задания или оформленная с нарушением настоящих указаний не принимается.

СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Часть I. Расчеты стержневых систем при растяжении (сжатии) и кручении

1. Расчет ферменной конструкции

Расчетная схема опоры ЛЭП принята в виде плоской фермы, изготовленной из стержней стандартного прокатного профиля.

1.1. Найти допускаемое значение параметра нагрузки P с учетом возможной потери устойчивости сжатых стержней. Результаты представить в табличной форме (образец заполнения таблицы приведен в Приложении 4).

Указание. Для сжатых стержней допускаемое напряжение уменьшается $[\sigma_k] = \varphi_k \cdot [\sigma]$. Коэффициент снижения допускаемых напряжений φ_k определяется по таблице (Приложение 3) в зависимости от гибкости стержня.

Принять: материал стержней Ст.3, $[\sigma] = 160$ МПа.

2. Расчет стержневых элементов электротехнического оборудования при растяжении (сжатии)

Расчетная схема элемента конструкции представляет собой ступенчатый стержень, находящийся под воздействием осевых сил P и kP .

2.1. Найти значение параметра $P = P_0$, при котором зазор δ перекрывается. Построить эпюры продольных сил N_z , напряжений σ и осевых перемещений Δ при найденном значении P_0 .

2.2. При значении нагрузки $P = 2P_0$ раскрыть статическую неопределимость. Построить эпюры продольных сил N_z , напряжений σ и осевых перемещений Δ . Определить погрешность решения.

2.3. Определить температурные напряжения в стержне при $\Delta T = 30^\circ\text{C}$. Характер температурного нагружения (*нагрев* или *охлаждение*) назначить из условия сохранения статической неопределимости при перекрытии зазора δ . Построить эпюры продольных сил N_z , напряжений σ и осевых перемещений Δ .

2.4. Определить суммарные напряжения при действии нагрузки $P = 2P_0$ и температурном воздействии, вычислить коэффициент запаса прочности n и сделать вывод о прочности системы.

Указание. На схеме заштрихованная часть стержня является абсолютно жесткой.

Принять: $E = 200$ ГПа, $\sigma_T = 240$ МПа, $\alpha_T = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

3. Расчет статически неопределимой стержневой системы

Статически неопределимая стержневая система состоит из стержней круглого поперечного сечения диаметром d , изготовленных с отклонением от заданных размеров, причем начальный зазор δ значительно меньше характерных размеров стержней.

3.1. Найти монтажные усилия и напряжения в стержнях после их сборки.

3.2. Определить температурные усилия и напряжения в стержнях, если температура отмеченного на схеме стержня (стержней) изменяется на ΔT .

3.3. Определить суммарные напряжения в стержнях и сделать вывод о прочности системы.

Принять: $\alpha_T = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $E = 200 \text{ ГПа}$, $[\sigma] = 160 \text{ МПа}$.

4. Расчет стержневых элементов электротехнического оборудования при кручении

Расчетная схема элемента конструкции представляет собой ступенчатый брус, нагруженный крутящими моментами.

4.1. Построить эпюры крутящих моментов M_z , погонных углов закручивания θ и максимальных касательных напряжений $\max \tau$ по длине бруса.

4.2. Из расчетов на прочность и жесткость определить параметр d диаметра бруса. Построить эпюру касательных напряжений в опасном сечении бруса.

4.3. Построить эпюру углов закручивания φ по длине бруса. Определить погрешность решения.

Принять: $G = 80 \text{ ГПа}$, $[\tau] = 40 \text{ МПа}$.

5. Расчет пружин контактора

Механизм контактора электрического аппарата с рабочим ходом контакта δ_0 имеет в составе цилиндрические витые пружины.

5.1. Из условия прочности и условия срабатывания контактора при заданном индексе пружины χ подобрать параметры пружин: диаметр проволоки d , диаметр витка пружины D , требуемое число витков пружин n .

5.2. Для подобранных параметров пружин проверить:

- условие прочности;
- условие малости подъема витков: $h_0 = \frac{\delta}{n} + 1,1 d < 0,5 D$;
- условие устойчивости пружин: $H_0 = (1 + 1,1 n) d + \delta < 2,5 D$.

5.3. Рассчитать жесткость пружин: $c = \frac{G \cdot d^4}{8 D^3 \cdot n}$.

Принять: $G = 80 \text{ ГПа}$, $[\tau] = 200 \text{ МПа}$. Пружины считать одинаковыми (если не указано иное на чертеже).

Часть II. Изгиб и сложное нагружение элементов конструкций

6. Расчет на изгиб опорного элемента электротехнического оборудования

Опорный элемент электротехнического оборудования рассматривается в виде балки с заданной формой поперечного сечения. Балка нагружена поперечной равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью q , сосредоточенными силами и моментами.

6.1. Определить положение центра тяжести и вычислить главные центральные моменты инерции I_x и I_y поперечного сечения балки.

6.2. Определить опорные реакции и построить эпюры поперечных сил Q_y и изгибающих моментов M_x (предварительно записать аналитические выражения для Q_y и M_x через параметр нагрузки q).

6.3. Рассмотреть два варианта расположения поперечного сечения балки (исходное и повернутое на 90°). В каждом варианте для опасного сечения балки построить в долях параметра нагрузки q эпюры нормальных напряжений σ . Выбрать рациональное расположение поперечного сечения.

6.4. Для рационально расположенного поперечного сечения из условия прочности определить допускаемое значение параметра нагрузки $[q]$. Построенные эпюры нормальных напряжений σ (пункт 6.3) выразить в числовом значении при $q = [q]$.

6.5. Определить угол поворота или прогиб выбранного сечения балки с помощью интеграла Максвелла-Мора при $q = [q]$ (при рациональном расположении сечения балки).

Принять: $E = 200$ ГПа, $[\sigma] = 160$ МПа.

7. Расчет плоской рамы

Несущий элемент электротехнической конструкции схематизируется в виде плоской рамы, изготовленной из стержней стандартного прокатного профиля (двутавр или швеллер) и находящейся под действием внешней нагрузки.

7.1. Определить опорные реакции и построить эпюры продольных сил N_z , поперечных сил Q_y и изгибающих моментов M_x как функции параметра нагрузки P .

7.2. Из расчетов на прочность по допускаемым напряжениям изгиба подобрать номер прокатного сечения рамы. Для выбранного профиля построить эпюру нормальных напряжений в опасном сечении рамы.

7.3. Определить угол поворота или прогиб сечения k с помощью интеграла Максвелла-Мора.

Принять: $E = 200$ ГПа, $[\sigma] = 160$ МПа.

8. Сложное нагружение балок

Элемент электротехнической конструкции рассматривается в виде балки, нагруженной пространственной системой сил.

8.1. Определить опорные реакции и построить эпюры изгибающих моментов M_x , M_y и продольных сил N_z .

8.2. Для опасного сечения построить эпюры нормальных напряжений и указать наиболее нагруженные точки (точку) в поперечном сечении. Определить коэффициент запаса прочности n .

8.3. Спроектировать балку круглого поперечного сечения, приняв для нее коэффициент запаса прочности n из п. 8.2.

8.4. Сравнить металлоемкость исходной и спроектированной (пункт 8.3) балок.

Принять: $\sigma_T = 240$ МПа.

9. Расчет промежуточного вала редуктора

Промежуточный вал редуктора вращается с угловой скоростью n_0 и передает мощность N .

9.1. Составить расчетную схему вала, определить действующие на вал нагрузки, реакции опор. Построить эпюры изгибающих и крутящих моментов M_x , M_y , M_z .

9.2. Найти диаметр вала d по заданному критерию прочности без учета циклического изменения напряжений, приняв нормативный коэффициент запаса прочности $[n]$ в пределах $4 \leq [n] \leq 6$.

Полученный диаметр d округлить до ближайшего большего размера из ряда (в мм): 10,0; 10,5; 11,0; 11,5; 12,0; 13,0; 14,0; 15,0; 16,0; 17,0; 18,0; 19,0; 20,0; 21,0; 22,0; 24,0; 25,0; 26,0; 28,0; 30,0; 32,0; 34,0; 36,0; 38,0; 40,0; 42,0; 45,0; 48,0; 50,0; 53,0; 56,0; 60,0; 63,0; 67,0; 71,0; 75,0; 80,0; 85,0; 90,0; 95,0; 100,0; далее через 5 мм.

9.3. Выполнить поверочный расчет вала с учетом изменения нормальных напряжений по симметричному циклу (касательные напряжения считать постоянными). Поверхность вала считать шлифованной ($K_F = 1$). Найденный коэффициент запаса прочности должен находиться в пределах $1,4 \leq n \leq 1,7$.

Указание. При проведении поверочного расчета использовать данные Приложения 3.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основной

1. Москвин, В.Г. Сопротивление материалов. Примеры решения задач: практикум по курсу «Сопротивление материалов» / В.Г. Москвин, О.В. Новикова, С.А. Монин, под ред. В.Е. Хроматова. – М.: Изд-во МЭИ, 2020.

2. Хроматов, В.Е. Лекции по сопротивлению материалов в структурно-логических схемах: учеб. пособие / В.Е. Хроматов, О.В. Новикова, под ред. В.П. Николаева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2017.

Дополнительный

3. Ицкович, Г.М. Сопротивление материалов. Руководство к решению задач. Ч. 1: учеб. пособие / Г.М. Ицкович, Л.С. Минин, А.И. Винокуров, под ред. Л.С. Минина. – 4-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2018.

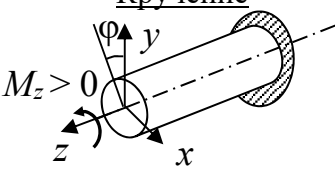
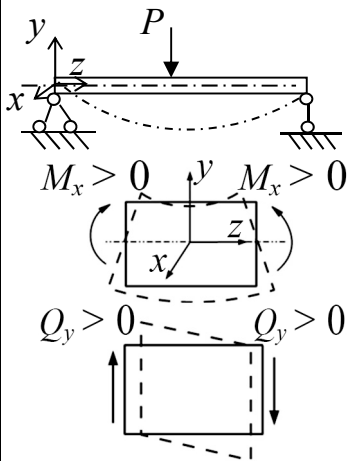
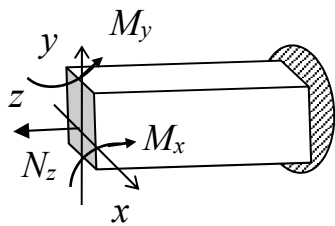
4. Ицкович, Г.М. Сопротивление материалов. Руководство к решению задач. Ч. 2: учеб. пособие / Г.М. Ицкович, Л.С. Минин, А.И. Винокуров, под ред. Л.С. Минина. – 4-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2018.

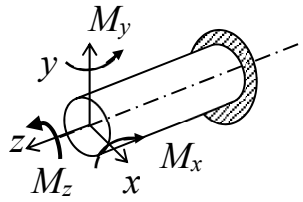
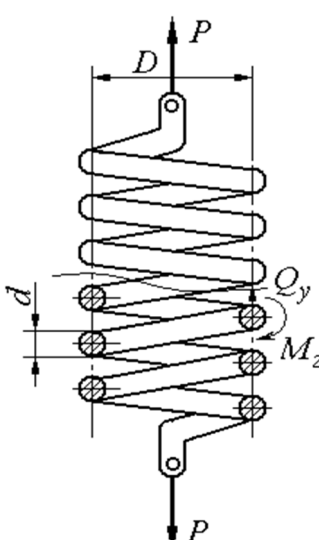
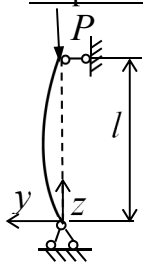
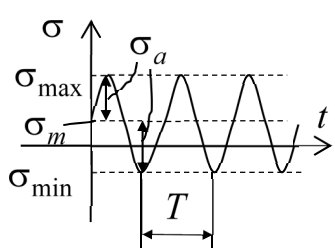
5. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов. В 8 т. Т. 2: учебник / В.И. Феодосьев. – 15-е изд., испр. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Вид деформации стержня	Напряжения, условие прочности	Деформации и/или перемещения
<u>Растяжение/сжатие</u> $N_z > 0$ 	$\sigma_{\max} = \left \frac{N_z}{F} \right \leq [\sigma]$	$\Delta l = \frac{N_z l}{EF}$
<u>Кручение</u> $M_z > 0$ 	$\tau = \frac{M_z r}{I_p}, \tau_{\max} = \left \frac{M_z}{W_p} \right \leq [\tau]$ $I_p = \frac{\pi d^4}{32}, W_p = \frac{\pi d^3}{16}$	$\varphi = \frac{M_z l}{GI_p}$ $\theta = \frac{M_z}{GI_p}$
<u>Изгиб</u> 	$\sigma = -\frac{M_x}{I_x} y$ $\sigma_{\max} = \left -\frac{M_x}{I_x} y_{\max} \right = \left \frac{M_x}{W_x} \right \leq [\sigma],$ $W_x = \frac{I_x}{h/2}$	$\Delta_k = \int_0^l \frac{M_x \bar{M}_k}{EI_x} dz$
Формула Симпсона для численного вычисления интеграла Максвелла-Мора $\Delta_k = \int_0^l \frac{M_x \bar{M}_k}{EI_x} dz = \sum_{j=1}^m \frac{l_j}{6EI_j} \left[M_x(0) \cdot \bar{M}_k(0) + 4M_x\left(\frac{l_j}{2}\right) \cdot \bar{M}_k\left(\frac{l_j}{2}\right) + M_x(l_j) \cdot \bar{M}_k(l_j) \right]_j; \quad l = \sum_{j=1}^m l_j$		
<u>Сложное нагружение</u> 	$\sigma = \sigma_{N_z} + \sigma_{M_x} + \sigma_{M_y} = \frac{N_z}{F} - \frac{M_x}{I_x} y - \frac{M_y}{I_y} x$ $\sigma_{\max} = \left \frac{N_z}{F} \right + \left \frac{M_x}{W_x} \right + \left \frac{M_y}{W_y} \right \leq$	$\Delta_{ky} = \int_0^l \frac{M_x \bar{M}_{kx}}{EI_x} dz,$ $\Delta_{kx} = \int_0^l \frac{M_y \bar{M}_{ky}}{EI_y} dz,$ $\Delta = \sqrt{\Delta_{kx}^2 + \Delta_{ky}^2}$

Вид деформации стержня	Напряжения, условие прочности	Деформации и/или перемещения
<u>Изгиб с кручением</u> 	$\max \sigma_{\text{экв}} = \frac{\max M_{\text{экв}}}{W_{\text{изг}}} =$ $= \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2 + \kappa \cdot M_z^2}}{\pi d^3 / 32} \leq [\sigma]$ $\kappa = \begin{cases} 1 - \text{критерий Сен-Венана} \\ 0,75 - \text{критерий Мизеса} \end{cases}$	$\Delta_k^{\text{изг}} = \int_0^l \frac{M_{\text{изг}} \bar{M}_k}{EI_x} dz,$ $M_{\text{изг}} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}.$ $\varphi = \frac{M_z l}{GI_p}$
<u>Расчет пружин</u> 	$\tau_{\max} = \frac{8PD}{\pi d^3} \leq [\tau]$	$\delta = \frac{8PD^3 n}{Gd^4}$
<u>Устойчивость сжатых стержней</u> 	$P_{\text{кр}} = \begin{cases} P_{\text{э}} = \frac{\pi^2 EI_{\min}}{(\mu l)^2}, & \text{при } \lambda_{\max} > \lambda_{\text{пред}} \text{ (стержни} \\ & \text{большой гибкости)} \\ P_{\text{я}} = (a - b \lambda_{\max}) F, & \text{при } \lambda_{\text{T}} < \lambda < \lambda_{\text{пред}} \\ & \text{(стержни средней гибкости)} \\ P_{\text{T}} = \sigma_{\text{T}} F, & \text{при } \lambda < \lambda_{\text{T}} \text{ (стержни ма-} \\ & \text{лой гибкости)} \end{cases}$ где $\lambda_{\max} = \mu l / i_{\min}$, $\lambda_{\text{пред}} = \pi \sqrt{E / \sigma_{\text{пц}}}$, $\lambda_{\text{T}} \approx 0,3 \div 0,4 \lambda_{\text{пред}}$	
<u>Усталостное разрушение</u> 	$n_{-1} = \frac{\sigma_{-1}}{K \cdot \sigma_a} \geq [n_r]; \quad n_r = \frac{\sigma_{-1}}{K \sigma_a + \Psi_{\sigma} \sigma_m} \geq [n_r];$ $K = \frac{K_{\sigma}}{K_F K_d}; \quad \Psi_{\sigma} = \frac{2 \cdot \sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}.$ Расчет валов (плоское напряженное состояние): $n = \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} \geq [n]$	

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К ЗАДАНИЯМ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Данные к заданию № 1				
№ варианта	a , м	b , м	c , м	Прокатный профиль
1	2,0	1,8	2,5	Швеллер № 22
2	2,0	2,4	1,8	Двутавр № 18У
3	1,8	2,0	1,6	Швеллер № 18
4	2,0	1,7	1,5	Двутавр № 10У
5	1,5	2,2	2,5	Швеллер № 18
6	1,8	2,0	2,0	Двутавр № 20У
7	1,4	1,7	1,6	Швеллер № 22
8	1,8	2,0	1,8	Двутавр № 12У
9	2,0	1,1	1,6	Швеллер № 20
10	1,5	1,8	2,0	Двутавр № 30У
11	1,4	1,5	2,0	Швеллер № 30
12	1,6	2,0	1,5	Двутавр № 18У
13	1,8	1,5	2,0	Швеллер № 40
14	2,0	1,7	1,6	Двутавр № 27У
15	1,5	2,8	1,5	Швеллер № 30
16	2,0	2,0	2,2	Двутавр № 33У
17	2,0	1,8	1,8	Швеллер № 20
18	1,1	2,2	1,6	Двутавр № 24У
19	2,0	2,4	1,8	Швеллер № 36
20	1,0	1,8	1,5	Двутавр № 16У
21	1,4	2,4	2,8	Швеллер № 18
22	1,9	2,0	2,3	Двутавр № 14У
23	1,7	1,0	1,7	Швеллер № 12
24	1,9	2,7	1,7	Двутавр № 10У
25	2,2	2,6	1,9	Швеллер № 27
26	1,8	2,8	1,9	Двутавр № 30У
27	1,7	2,4	2,0	Швеллер № 18
28	1,3	1,6	1,6	Двутавр № 12У
29	1,5	1,9	1,8	Швеллер № 36
30	1,4	2,0	1,7	Двутавр № 36У

Данные к заданию № 2						
№ варианта	l_1 , см	l_2 , см	F_1 , см ²	F_2 , см ²	δ , мм	k
1	45	30	45	30	0,08	1,5
2	52	28	12	21	0,09	1,3
3	50	50	15	25	0,1	1,5
4	42	60	13	27	0,05	1,7
5	5	50	10	25	0,08	2,0
6	60	60	12	21	0,07	1,4
7	72	45	18	32	0,1	1,1
8	48	32	12	20	0,08	2,0
9	70	35	14	27	0,09	2,1
10	44	70	12	22	0,01	1,5
11	40	62	12	20	0,08	1,7
12	38	45	10	20	0,09	1,4
13	45	40	8	18	0,08	1,5
14	50	60	10	24	0,01	2,4
15	40	35	12	20	0,07	2,3
16	35	45	15	24	0,011	2,5
17	39	62	13	21	0,08	2,3
18	70	43	20	28	0,08	1,4
19	45	55	10	20	0,08	1,3
20	50	35	14	24	0,07	1,7
21	65	38	10	35	0,012	1,3
22	75	75	18	30	0,011	1,4
23	50	42	14	27	0,013	1,3
24	70	50	15	24	0,011	1,3
25	52	47	13	21	0,07	1,7
26	48	45	14	32	0,02	1,2
27	12	26	9	33	0,014	2,2
28	75	51	12	21	0,05	1,8
29	34	38	17	31	0,07	1,8
30	44	62	34	23	0,01	2,2

Данные к заданию № 3						
№ варианта	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$F, \text{см}^2$	$\delta, \text{см}$	$a, \text{м}$	$l, \text{м}$	k
1	–20	28	0,1	1	2	2
2	–30	35	0,05	0,5	3	1,2
3	40	30	0,1	1,5	2,5	0,75
4	60	22	0,12	2	1,8	1
5	70	30	0,15	1,25	2	0,5
6	–30	40	0,05	0,75	2	1,25
7	–60	36	0,08	0,5	1	2
8	80	27	0,2	0,6	1,5	1,5
9	100	25	0,05	1,5	1	1
10	30	20	0,08	0,5	3	1,5
11	–40	26	0,06	2	2,5	2
12	–50	24	0,09	0,7	2	1,2
13	70	27	0,07	0,75	1,5	0,75
14	60	24	0,1	0,5	1,9	1,25
15	50	28	0,15	1,25	2	1,5
16	–40	22	0,1	1,5	1,7	1,25
17	–30	26	0,08	1	1,9	2
18	80	32	0,06	0,5	2,3	1,5
19	–40	29	0,15	0,75	2,5	1,75
20	–30	26	0,2	0,6	2,8	1,6
21	45	25	0,25	0,7	3	1,5
22	50	29	0,3	1,25	2	1,55
23	75	23	0,07	1,5	2,5	2
24	80	28	0,1	1	2,6	1,5
25	100	22	0,15	0,5	3	1,75
26	35	34	0,14	1	2	1,4
27	40	30	0,1	1,5	2,5	0,75
28	60	22	0,12	2	1,8	1
29	70	30	0,15	1,25	2	0,5
30	30	40	0,05	0,75	2	1,25

Данные к заданию № 4					
№ варианта	m , кН·м	a , м	γ	β	$[\theta]$, рад/м
1	10	1,0	1,9	0,80	0,010
2	15	0,7	1,1	0,70	0,015
3	12	0,5	1,2	0,80	0,020
4	13	0,9	1,3	0,72	0,025
5	18	0,8	1,4	0,92	0,030
6	20	1,0	1,5	0,82	0,035
7	19	0,8	1,6	0,84	0,040
8	18	0,6	1,7	0,74	0,045
9	10	0,7	1,8	0,85	0,050
10	11	0,9	1,9	0,75	0,035
11	14	0,7	2,0	0,70	0,030
12	16	0,6	0,9	0,80	0,040
13	18	1,1	0,8	0,75	0,025
14	17	1,0	0,7	0,85	0,020
15	15	0,9	0,6	0,95	0,015
16	20	0,8	0,5	0,78	0,010
17	18	0,7	1,8	0,70	0,030
18	17	0,6	1,1	0,72	0,040
19	14	1,1	1,2	0,75	0,035
20	13	1,0	1,3	0,80	0,020
21	12	0,5	1,0	0,90	0,040
22	15	0,6	1,5	0,85	0,020
23	20	0,8	2,0	0,80	0,030
24	18	0,9	1,8	0,75	0,040
25	20	1,2	1,0	0,70	0,045
26	18	1,3	1,7	0,65	0,035
27	18	1,0	1,5	0,82	0,035
28	15	0,8	1,6	0,84	0,040
29	16	0,6	1,7	0,74	0,045
30	20	0,7	1,8	0,85	0,050

Данные к заданию № 5			
№ варианта	P , Н	δ_0 , мм	Индекс пружины χ
1	60	4	8
2	65	2	12
3	70	2,5	11
4	75	3	10
5	80	3,6	9
6	75	4	8
7	70	4,5	7
8	65	5	6
9	60	5,5	7
10	55	6	8
11	50	5,5	9
12	45	5	10
13	40	4,5	11
14	45	4	12
15	50	3,5	11
16	55	3	10
17	60	2,5	9
18	65	2	8
19	70	2,5	7
20	75	3	6
21	80	3,5	7
22	75	4	8
23	70	4,5	9
24	65	5	10
25	55	3	7
26	70	6	9
27	50	4,5	10
28	75	4	8
29	75	5	8
30	60	6	12

Данные к заданию № 6, 7			
№ варианта	a , м	γ	P , кН (для задания № 7)
1	2	1,9	21
2	1	1,1	31
3	1,5	1,2	15
4	2	1,3	22
5	2,5	1,4	24
6	2	1,5	29
7	2,5	1,6	27
8	2	1,7	23
9	2,5	1,8	20
10	2	1,9	38
11	1,2	2	12
12	1,4	0,9	14
13	1,6	0,8	16
14	1,8	0,6	18
15	2	0,7	30
16	2,2	0,5	32
17	2,4	1,8	36
18	2,6	1,4	26
19	2,8	1,1	22
20	2,7	1,2	19
21	1,6	1	37
22	2	1,5	28
23	2,5	2	29
24	1,5	1,8	33
25	2,5	1	25
26	1,3	2	37
27	1,5	1,2	35
28	2	1,3	22
29	2,5	1,4	34
30	2	1,5	17

Данные к заданию № 8							
№ варианта	Форма сечения		P , кН	α	l , м	c	k
	Двутавр	Прямоугольник $b = \alpha \cdot h$, см					
1	–	16	14	0,50	3	0,3	2
2	22У	–	16	0,60	4	0,4	3
3	–	12	17	0,70	2	0,2	2
4	20У	–	12	0,80	3	0,5	2
5	–	10	14	0,75	4	0,3	3
6	30У	–	16	0,50	3	0,2	2
7	–	16	12	0,65	2	0,5	3
8	24У	–	17	0,60	3	0,3	3
9	–	12	15	0,70	3	0,4	2
10	27У	–	14	0,85	2	0,2	3
11	–	18	16	0,70	4	0,5	2
12	22У	–	17	0,65	3	0,4	3
13	–	10	13	0,70	2	0,2	2
14	24У	–	12	0,60	3	0,6	3
15	–	16	17	0,55	4	0,3	3
16	20У	–	14	0,50	3	0,2	2
17	–	18	13	0,45	2	0,4	2
18	30У	–	15	0,70	2	0,5	3
19	–	12	16	0,80	4	0,3	2
20	24У	–	12	0,65	3	0,4	3
21	–	18	17	0,75	2	0,2	3
22	20У	–	16	0,80	3	0,5	2
23	–	12	14	0,50	4	0,3	2
24	22У	–	15	0,60	3	0,4	3
25	–	16	12	0,70	2	0,5	3
26	18У	–	18	0,40	3	0,7	2
27	–	12	17	0,70	2	0,2	2
28	16У	–	12	0,80	3	0,5	2
29	–	10	14	0,75	4	0,3	3
30	30У	–	16	0,50	3	0,2	2

Данные к заданию № 9								
№ варианта	N , кВт	n , об/мин	Сталь марки	Критерий прочности	γ	a , м	D_1 , м	D_2 , м
1	10	100	10	Сен-Венана	0,5	1,1	0,20	0,35
2	20	200	20	Мизеса	0,6	0,7	0,30	0,40
3	15	250	30	Сен-Венана	0,7	1,3	0,25	0,20
4	14	150	35	Мизеса	0,8	0,8	0,35	0,25
5	16	200	40	Сен-Венана	1,2	0,9	0,25	0,35
6	12	250	45	Мизеса	1,4	1,4	0,30	0,30
7	18	300	50	Сен-Венана	1,5	1,0	0,40	0,40
8	20	400	60	Мизеса	1,6	1,1	0,35	0,45
9	10	200	20	Сен-Венана	0,6	1,2	0,40	0,20
10	17	100	30	Мизеса	0,8	1,6	0,20	0,30
11	15	160	35	Сен-Венана	0,5	1,7	0,25	0,25
12	13	180	50	Мизеса	1,0	1,2	0,35	0,35
13	18	250	45	Сен-Венана	1,5	1,4	0,30	0,30
14	14	200	30	Мизеса	1,4	1,6	0,40	0,40
15	20	300	10	Сен-Венана	1,2	1,3	0,45	0,45
16	14	100	20	Мизеса	0,5	1,5	0,20	0,20
17	16	150	30	Сен-Венана	0,6	1,2	0,25	0,25
18	10	300	35	Мизеса	1,4	1,0	0,30	0,30
19	20	200	40	Сен-Венана	1,2	1,6	0,35	0,35
20	25	150	45	Мизеса	1,1	1,4	0,40	0,40
21	15	300	50	Сен-Венана	0,7	1,5	0,45	0,45
22	22	200	30	Мизеса	0,8	1,3	0,35	0,35
23	24	400	20	Сен-Венана	0,6	1,2	0,25	0,25
24	17	300	40	Мизеса	0,9	1,1	0,20	0,20
25	19	300	45	Сен-Венана	1,4	1,0	0,30	0,30
26	13	350	30	Мизеса	1,5	1,2	0,4	0,6
27	12	260	10	Сен-Венана	0,5	0,7	0,25	0,35
28	14	180	20	Мизеса	0,6	1,3	0,35	0,30
29	16	200	30	Сен-Венана	0,7	0,8	0,25	0,40
30	15	250	40	Мизеса	0,8	0,9	0,30	0,45

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ К РЕШЕНИЮ ЗАДАНИЙ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

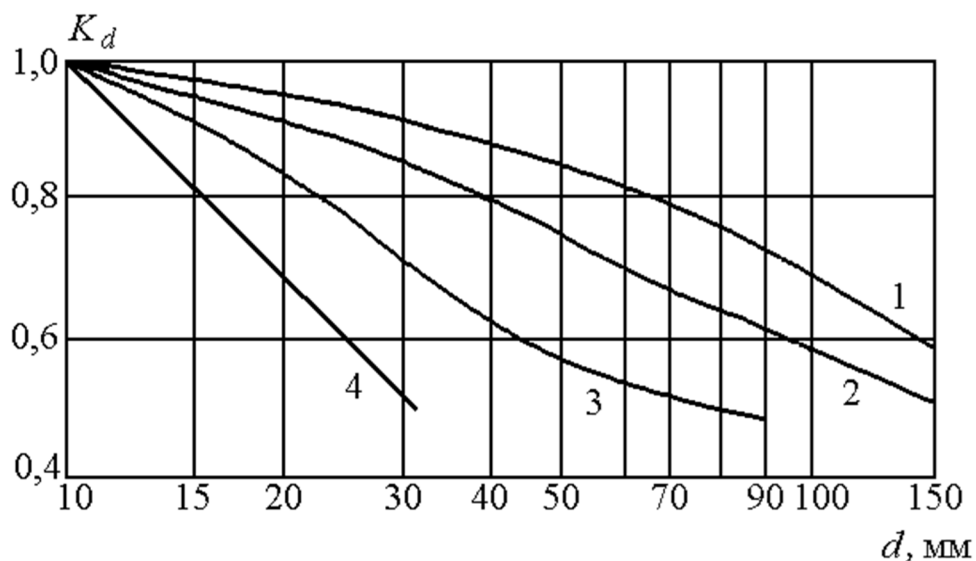
Коэффициент снижения допускаемых напряжений $\varphi(\lambda)$

Гиб- кость, λ	Сталь				Чугун		Де- рево
	Ст2. Ст3. Ст4.	Ст5.	15ГФ, 10Г2С1, 15ХСНД	10 ХСНД	СЧ 15, СЧ 18, СЧ 21	СЧ 24	
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10	0,99	0,98	0,98	0,98	0,97	0,95	0,99
20	0,96	0,96	0,95	0,95	0,91	0,87	0,97
30	0,94	0,93	0,92	0,92	0,81	0,75	0,93
40	0,92	0,89	0,89	0,88	0,69	0,60	0,87
50	0,89	0,85	0,84	0,82	0,57	0,43	0,80
60	0,86	0,80	0,78	0,77	0,44	0,32	0,71
70	0,81	0,74	0,71	0,68	0,34	0,23	0,61
80	0,75	0,67	0,63	0,59	0,26	0,18	0,48
90	0,69	0,59	0,54	0,50	0,20	0,14	0,38
100	0,60	0,50	0,46	0,43	0,16	0,12	0,31
110	0,52	0,43	0,39	0,36	—	—	0,26
120	0,45	0,37	0,33	0,31	—	—	0,22
130	0,40	0,32	0,29	0,27	—	—	0,18
140	0,36	0,28	0,25	0,23	—	—	0,16
150	0,32	0,25	0,23	0,20	—	—	0,14
160	0,29	0,23	0,21	0,18	—	—	0,12
170	0,26	0,21	0,19	0,16	—	—	0,11
180	0,23	0,19	0,17	0,14	—	—	0,10
190	0,21	0,17	0,15	0,12	—	—	0,09
200	0,19	0,15	0,13	0,11	—	—	0,08
210	0,17	0,14	0,12	0,10	—	—	—
220	0,16	0,13	0,11	0,09	—	—	—

Эффективный коэффициент концентрации напряжений K_σ в месте шпоночной канавки при изгибе валов

Поверхность вала	K_σ при значении $\sigma_{пч}$, МПа						
	400	500	600	700	800	900	1000
Шлифованная	1,75	2,0	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7

**График зависимости коэффициента K_d
влияния абсолютных размеров детали от диаметра вала**



Кривые построены для следующих случаев:

1 – углеродистая сталь при отсутствии концентрации напряжений; 2 – легированная сталь при отсутствии концентрации напряжений, углеродистая сталь при умеренной концентрации напряжений; 3 – легированная сталь при умеренной концентрации напряжений; 4 – сталь при высокой концентрации напряжений

Механические характеристики стали

Марка стали	$\sigma_{ПЧ}$, МПа	σ_T , МПа	Изгиб, МПа		Растяжение, МПа		Кручение, МПа		
			σ_{-1}	σ_0	σ_{-1}	σ_0	τ_T	τ_{-1}	τ_0
10	340	210	160	210	120	170	140	80	100
20	420	250	170	250	120	210	160	100	130
30	500	300	200	300	170	250	170	110	150
35	540	320	220	320	170	270	190	130	160
40	580	340	230	340	180	290	210	140	170
45	610	360	250	360	190	300	225	150	180
50	640	380	270	380	200	320	240	160	190
60	690	410	310	410	220	340	260	180	210

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАНИЙ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Методические указания к заданию № 1

После определения (любым способом) внутренних усилий N_k в стержнях фермы в долях от параметра нагрузки P дальнейшее решение представим в табличной форме.

Пример заполнения таблицы к задаче № 1

k	l_k , м	N_k	λ_k	φ_k	$[\sigma_k]$, МПа	P_k , кН	σ_k при $P = [P]$, МПа	η_k , %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1	4,0	$4P$	–	1,0	160	107	29,7	81,6
2	4,12	$-4,12P$	199	0,19	30,4	19,7	–30,4	0
3	1,0	$-2P$	48	0,9	144	193	–14,7	89,7
4	2,24	$4,48P$	–	1,0	160	95,5	33,0	79,3
5	2,0	$-4P$	96	0,64	102,4	68,5	–29,4	71,2
6	4,48	0	–	–	160	–	0	100

Расшифровка названий столбцов таблицы:

(1) – номер k рассматриваемого стержня;
 (2) – длина стержня l_k , м;
 (3) – найденное усилие в k -м стержне в зависимости от параметра нагрузки P , характер нагружения стержня (растяжение или сжатие) определяется знаком усилия;

(4) – гибкость стержня λ_k определяется *только для сжатых стержней* по формуле $\lambda_k = \frac{\mu \cdot l_k}{i_{\min}}$,

где μ – коэффициент приведения длины, для данного случая шарнирного закрепления концов стержней в ферме $\mu = 1$;

$i_{\min}$ – минимальный радиус инерции поперечного сечения стержня (соответствует максимальной гибкости стержня), для прокатного профиля двутавр или швеллер $i_{\min} = i_y$;

(5) – коэффициент снижения допускаемых напряжений (коэффициент продольного изгиба) φ_k зависит от материала стержня и его гибкости, определяется по таблице Приложения 3 ($0 < \varphi_k \leq 1$);

(6) – допускаемое напряжение для рассматриваемого стержня с учетом коэффициента снижения допускаемых напряжений $[\sigma_k] = \varphi_k \cdot [\sigma]$;

(7) – ограничение на нагрузку $P \leq P_k$ для k -го стержня, определяемое из его условия прочности с учетом снижения допускаемых напряжений для сжатых стержней:

$$|\sigma_k| = \left| \frac{N_k}{F} \right| \leq [\sigma_k]; \quad (1)$$

(8) – напряжение σ_k в k -ом стержне при нагрузке, равной допускаемой ($P = [P]$).

Очевидно, что с учетом ограничений (1) допускаемая нагрузка для фермы определяется как минимум ограничений для всех стержней фермы:

$$[P] = \min \{P_1, P_2, \dots, P_s\}, \quad (2)$$

где s – число стержней в ферме;

(9) – недогрузка η стержней фермы при $P = [P]$ определяется по формуле:

$$\eta_k = \frac{[\sigma_k] - |\sigma_k|}{[\sigma_k]} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $|\sigma_k|$ – абсолютное значение напряжения k -го стержня при $P = [P]$.

Рассмотрим расчет строчек таблицы. Для заданного поперечного сечения стержней фермы в виде двутавра № 20У из таблицы прокатных профилей (Приложение 4) имеем: $i_y = 2,07$ см; $F = 26,75$ см².

Стержень № 1 ($k = 1$, работает на растяжение)

$$\varphi_1 = 1, [\sigma_1] = \varphi_1 \cdot [\sigma] = 160 \text{ МПа.}$$

Условие прочности (1) для данного стержня:

$$|\sigma_1| = \left| \frac{N_1}{F} \right| = \frac{4P}{F} \leq [\sigma_1]$$

дает следующее ограничение:

$$P \leq \frac{[\sigma_1] \cdot F}{4} = \frac{160 \cdot 10^6 \cdot 26,75 \cdot 10^{-4}}{4} = 107000 \text{ Н} = 107 \text{ кН} = P_1.$$

Т.е. $P \leq P_1 = 107 \text{ кН}$.

Стержень № 2 ($k = 2$, работает на сжатие)

$$\text{Определяем гибкость } \lambda_2 = \frac{l_2}{i_y} = \frac{412}{2,07} \approx 199.$$

Из таблицы коэффициентов снижения допускаемых напряжений (Приложение 3) следует $\varphi_2(\lambda_2) \approx 0,19$.

$$\text{Тогда: } [\sigma_2] = \varphi_2 \cdot [\sigma] = 0,19 \cdot 160 = 30,4 \text{ МПа.}$$

$$\text{Из условия прочности } |\sigma_2| = \left| \frac{N_2}{F} \right| = \left| \frac{-4,12P}{F} \right| \leq [\sigma_2] \text{ получим}$$

$$P \leq \frac{[\sigma_2] \cdot F}{4,12} = \frac{30,4 \cdot 10^6 \cdot 26,75 \cdot 10^{-4}}{4,12} \approx 19738 \text{ Н} \approx 19,74 \text{ кН} = P_2.$$

Следовательно, $P \leq P_2 = 19,74 \text{ кН}$.

Стержень № 3 ($k = 3$, работает на сжатие)

$$\text{Гибкость } \lambda_3 = \frac{l_3}{i_y} = \frac{100}{2,07} \approx 48.$$

Из таблицы коэффициентов снижения допускаемых напряжений (Приложение 3) следует $\varphi_3(\lambda_3) \approx 0,9$.

$$\text{Тогда: } [\sigma_3] = \varphi_3 \cdot [\sigma] = 0,9 \cdot 160 = 144 \text{ МПа.}$$

$$\text{Из условия прочности } |\sigma_3| = \left| \frac{N_3}{F} \right| = \left| \frac{-2P}{F} \right| \leq [\sigma_3] \text{ получим:}$$

$$P \leq \frac{[\sigma_3] \cdot F}{2} = \frac{144 \cdot 10^6 \cdot 26,75 \cdot 10^{-4}}{2} = 192600 \text{ Н} \approx 193 \text{ кН} = P_3.$$

Следовательно, $P \leq P_3 = 193 \text{ кН}$.

Стержень № 4 ($k = 4$, работает на растяжение)

$$\varphi_4 = 1, [\sigma_4] = \varphi_4 \cdot [\sigma] = 160 \text{ МПа.}$$

Условие прочности (1) для данного стержня

$$|\sigma_4| = \left| \frac{N_4}{F} \right| = \frac{4,48P}{F} \leq [\sigma_4]$$

дает следующее ограничение:

$$P \leq \frac{[\sigma_4] \cdot F}{4,48} = \frac{160 \cdot 10^6 \cdot 26,75 \cdot 10^{-4}}{4,48} \approx 95536 \text{ Н} \approx 95,5 \text{ кН} = P_4.$$

Следовательно, $P \leq P_4 = 95,5 \text{ кН}$.

Стержень № 5 ($k = 5$, работает на сжатие)

$$\text{Гибкость } \lambda_5 = \frac{l_5}{i_y} = \frac{200}{2,07} \approx 96,6.$$

Из таблицы коэффициентов снижения допускаемых напряжений (Приложение 3) следует $\varphi_5(\lambda_5) \approx 0,64$.

$$\text{Тогда: } [\sigma_5] = \varphi_5 \cdot [\sigma] = 0,64 \cdot 160 = 102,4 \text{ МПа.}$$

Из условия прочности $|\sigma_5| = \left| \frac{N_5}{F} \right| = \left| \frac{-4P}{F} \right| \leq [\sigma_5]$ получим:

$$P \leq \frac{[\sigma_5] \cdot F}{4} = \frac{102,4 \cdot 10^6 \cdot 26,75 \cdot 10^{-4}}{4} = 68480 \text{ Н} \approx 68,5 \text{ кН} = P_5.$$

Следовательно, $P \leq P_5 = 68,5 \text{ кН}$.

Заметим, что усилие в стержне № 6 равно нулю, поэтому дальнейшие расчеты для него не проводятся. Однако, этот стержень необходим для сохранения жесткости конструкции.

Таким образом, в 7-м столбце таблицы приведены ограничения на нагрузку P из условий прочности (1) для всех стержней:

$$P \leq P_1 = 107 \text{ кН};$$

$$P \leq P_2 = 19,74 \text{ кН};$$

$$P \leq P_3 = 193 \text{ кН};$$

$$P \leq P_4 = 95,5 \text{ кН};$$

$$P \leq P_5 = 68,5 \text{ кН}.$$

Очевидно, что допускаемое значение нагрузки $[P]$ для всех стержней фермы должно удовлетворять условию (2).

В нашем случае $[P] = 19,74 \text{ кН}$.

Таким образом, наиболее нагруженным оказался стержень № 2, который работает на сжатие, обладает большой гибкостью, что дает для него значительное снижение допускаемого напряжения (сравним $[\sigma_1] = [\sigma_4] = 160 \text{ МПа}$ и $[\sigma_2] = 30,4 \text{ МПа}$).

Заметим, что если не учитывать снижение допускаемых напряжений в сжатых стержнях, то наиболее нагруженным стержнем оказывается стержень № 4, и тогда допускаемая нагрузка будет равна $[P] = 95,5 \text{ кН}$, при которой стержень № 2 и стержень № 5 теряют устойчивость. Это приведет к перераспределению усилий в соседних стержнях, снижению несущей способности и потенциальному разрушению конструкции.

Заполним столбец (8). Найдем напряжения в каждом стержне при $P = [P] = 19,74 \text{ кН}$.

Напряжение в стержне № 1:

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{F} = \frac{4P}{F} \Big|_{P=[P]} = \frac{4 \cdot 19,74 \cdot 10^3}{26,75 \cdot 10^{-4}} \approx 2,95 \cdot 10^7 \text{ Па} = 29,5 \text{ МПа}.$$

Напряжение в стержне № 2:

$$\sigma_2 = \frac{N_2}{F} = \frac{-4,12P}{F} \Big|_{P=[P]} = \frac{-4,12 \cdot 19,74 \cdot 10^3}{26,75 \cdot 10^{-4}} \approx -3,04 \cdot 10^7 \text{ Па} = -30,4 \text{ МПа}.$$

Напряжение в стержне № 3:

$$\sigma_3 = \frac{N_3}{F} = \frac{-2P}{F} \Big|_{P=[P]} = \frac{-2 \cdot 19,74 \cdot 10^3}{26,75 \cdot 10^{-4}} \approx 1,476 \cdot 10^7 \text{ Па} \approx -14,8 \text{ МПа}.$$

Напряжение в стержне № 4:

$$\sigma_4 = \frac{N_4}{F} = \frac{4,48P}{F} \Big|_{P=[P]} = \frac{4,48 \cdot 19,74 \cdot 10^3}{26,75 \cdot 10^{-4}} \approx 3,306 \cdot 10^7 \text{ Па} \approx 33,1 \text{ МПа}.$$

Напряжение в стержне № 5:

$$\sigma_5 = \frac{N_5}{F} = \frac{-4P}{F} \Big|_{P=[P]} = \frac{-4 \cdot 19,74 \cdot 10^3}{26,75 \cdot 10^{-4}} \approx 2,952 \cdot 10^7 \text{ Па} \approx -29,5 \text{ МПа}.$$

Напряжение в стержне № 6 равно нулю, так как $N_6 = 0$.

Недогрузку стержней фермы при $P = [P]$ определим по формуле (3), используя для этого данные из столбцов (6) и (8).

Для стержня № 1:

$$\eta_1 = \frac{160 - 29,5}{160} \cdot 100\% \approx 81,6\%.$$

Для стержня № 2, в котором $[\sigma_2] = |\sigma_2|$, получаем максимальную загрузку, т.е. недогрузка для него равна:

$$\eta_2 = \frac{30,4 - 30,4}{30,4} \cdot 100\% = 0\%.$$

Аналогично вычисляем недогрузку для стержней №№ 3–6:

$$\eta_3 = \frac{144 - 14,8}{144} \cdot 100\% \approx 89,7\%;$$

$$\eta_4 = \frac{160 - 33,1}{160} \cdot 100\% \approx 79,3\%;$$

$$\eta_5 = \frac{102,4 - 29,5}{102,4} \cdot 100\% \approx 71,2\%;$$

$$\eta_6 = \frac{160 - 0}{160} \cdot 100\% = 100\%.$$

Таким образом, столбец (9) показывает способ оптимизации по весу всей конструкции.

Методические указания к заданию № 3

Поясним на примере данной расчетной схемы (рис. 1) принцип составления системы уравнений для нахождения неизвестных *монтажных усилий* в стержнях.

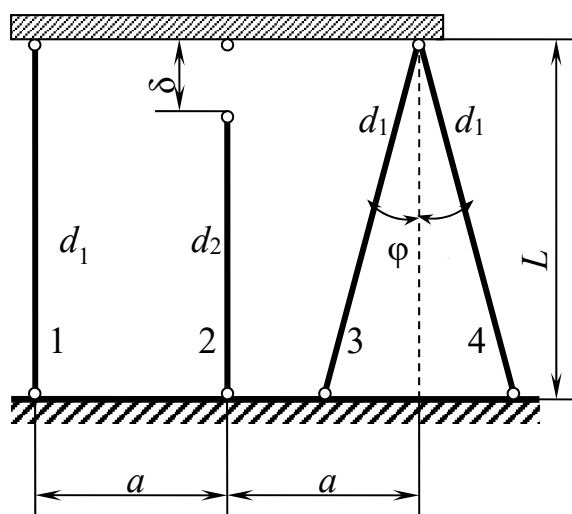


Рис. 1. Расчетная схема стержневой системы

Стержень № 2 оказался короче на величину δ ($\delta \ll l$). Для перекрытия образовавшегося зазора необходимо удлинить стержень № 2 и укоротить остальные стержни, при этом в стержнях № 1, 3, 4 возникнут сжимающие усилия, а в стержне № 2 – растягивающее. Покажем эти усилия на схеме (рис. 2). Для того, чтобы можно было ввести внутренние усилия необходимо провести сечение (в системе с перекрытым зазором) и рассмотреть равновесие любой отсеченной части. Растягивающее усилие направлено от сечения, а сжимающие усилия – по направлению к сечению.

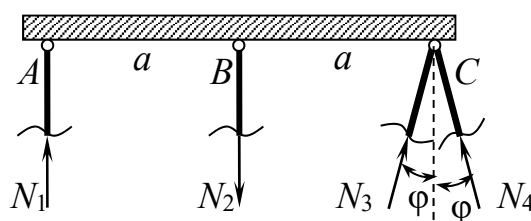


Рис. 2. Диаграмма усилий

Запишем уравнения равновесия для данной системы сил.

Сумма проекций всех сил на горизонтальную ось дает равенство усилий в стержнях № 3 и № 4

$$\sum X = 0 \rightarrow N_3 = N_4. \quad (4)$$

Уравнения суммы моментов всех сил относительно точек C и B дают ещё два уравнения:

$$\begin{aligned}\Sigma \text{mom}_C &= 0 \rightarrow N_2 \cdot a = N_1 \cdot 2a \rightarrow N_2 = 2N_1; \\ \Sigma \text{mom}_B &= 0 \rightarrow N_1 \cdot a = N_3 \cos \varphi \cdot a + N_4 \cos \varphi \cdot a.\end{aligned}\quad (5)$$

С учетом (4) получаем:

$$N_3 = \frac{N_1}{2 \cos \varphi}.$$
(6)

Для определения четырех неизвестных усилий есть только три независимых уравнения равновесия (система статически неопределимая). Для составления недостающего уравнения покажем абсолютные деформации стержней (рис. 3). Жесткая недеформируемая балка ABC опустится в новое положение $A_1B_1C_1$, оставаясь прямой. В стержнях № 1,3,4 возникнет укорочение, а в стержне № 2 для перекрытия зазора возникнет удлинение.

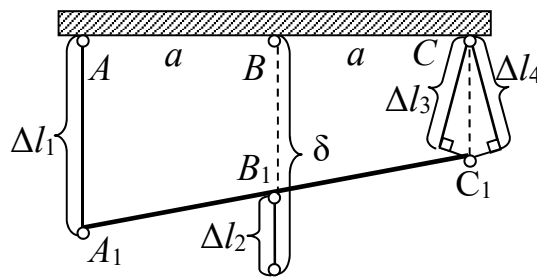


Рис. 3. Диаграмма перемещений

При составлении диаграммы перемещений учтем несколько важных замечаний:

- в силу допущения о малости перемещений и деформаций, деформации стержней много меньше их размеров, но на диаграмме показываем их крупно для наглядности;
- деформация стержня направлена всегда вдоль его оси и первоначально мы считаем, что стержни удлиняются/укорачиваются независимо друг от друга;
- для того, чтобы совместить концы стержней вместе (стержни № 3 и № 4) восстанавливаем перпендикуляры (заменяя дуги касательными к ним в силу малости деформаций).

Запишем геометрическое соотношение, которое следует из диаграммы перемещений. Отрезок BB_1 является средней линией в трапеции A_1ACC_1 , т.е.

$$BB_1 = \frac{AA_1 + CC_1}{2}; \quad \delta - \Delta l_2 = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_3 \cos \varphi}{2}.$$
(7)

Уравнение (7) – уравнение совместности деформаций, которое показывает зависимость между абсолютными деформациями отдельных элементов (стержней). Перепишем его, используя формулу для абсолютной деформации $\Delta l_j = \frac{N_j l_j}{EF_j}$

$$2 \left(\delta - \frac{N_2 l_2}{EF_2} \right) = \frac{N_1 l_1}{EF_1} + \frac{N_3 l_3}{EF_3} \cos \varphi. \quad (8)$$

Мы получили замкнутую систему уравнений (4, 5, 6, 8) для нахождения монтажных усилий N_j .

Напряжения в стержнях определяем по формуле $\sigma_j = \frac{N_j}{F_j}$ с учетом знаков усилий.

Рассмотрим *температурную задачу* (рис. 4). Зазор перекрыт, нагревается стержень № 2.

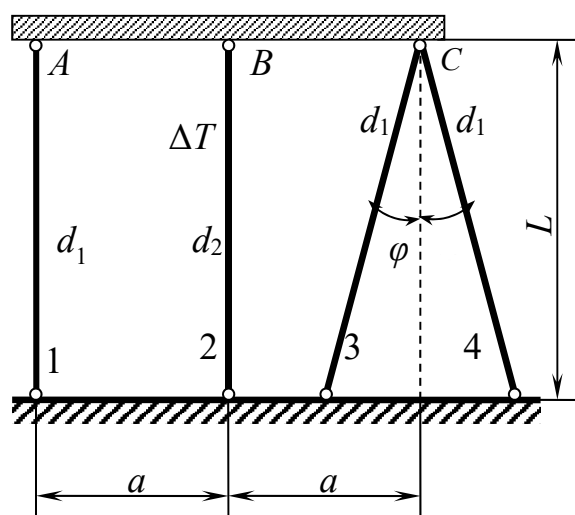


Рис. 4. Расчетная схема к температурной задаче

Отметим, что хотя для перекрытия зазора геометрия системы была нарушена (рис. 3), при последующем решении температурной задачи этим пренебрегают, так как величины возникших перемещений много меньше размеров стержней.

Нагретый стержень № 2 в силу расширения материала удлиняется, что приводит к удлинению остальных стержней и перемещению вверх балки ABC в новое положение $A_1 B_1 C_1$ (оставаясь прямой).

Покажем абсолютные деформации стержней на схеме (рис. 5).

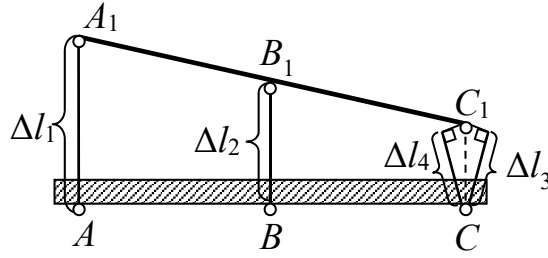


Рис. 5. Диаграмма перемещений

Покажем возникающие при этом усилия в стержнях, для этого проведем сечение и рассмотрим равновесие верхней отсеченной части (рис. 6). В *нагреваемом стержне № 2* возникнет *сжимающее* усилие из-за того, что его удлинение сдерживают остальные стержни связанные посредством балки *ABC*. В стержнях № 1, 3, 4 возникнут *растягивающие* усилия вследствие их удлинения за счет нагрева стержня № 2 (балка *ABC* перемещается вверх).

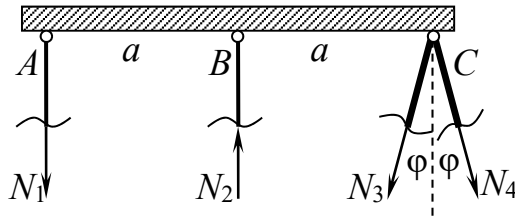


Рис. 6. Диаграмма усилий

Запишем уравнения равновесия для данной системы сил (рис. 6).

Сумма проекций всех сил на горизонтальную ось дает равенство усилий в стержнях № 3 и № 4:

$$\sum X = 0 \rightarrow N_3 = N_4. \quad (9)$$

Уравнения суммы моментов всех сил относительно точек *C* и *B* приводят к следующим уравнениям:

$$\sum \text{mom}_C = 0 \rightarrow N_2 \cdot a = N_1 \cdot 2a \rightarrow N_2 = 2N_1; \quad (10)$$

$$\sum \text{mom}_B = 0 \rightarrow N_1 \cdot a = N_3 \cos \varphi \cdot a + N_4 \cos \varphi \cdot a \rightarrow N_3 = \frac{N_1}{2 \cos \varphi}. \quad (11)$$

Запишем уравнение совместности деформаций, которое следует из диаграммы перемещений (рис. 5). Отрезок *BB₁* является средней линией в трапеции *AA₁C₁C*, т.е.

$$BB_1 = \frac{AA_1 + CC_1}{2}; \quad \Delta l_2 = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_3 \cos \varphi}{2}. \quad (12)$$

Перепишем его, используя формулу для абсолютной деформации стержня с учетом температурного воздействия:

$$\Delta l(T, N) = \Delta l_T + \Delta l_N = \alpha \cdot \Delta T \cdot l + \frac{Nl}{EF},$$

где α – температурный коэффициент линейного расширения материала.

Знаки перед слагаемыми в формуле ставятся *по правилу соответствия (или несоответствия) нагрузки и деформации*. Если деформация соответствует внутреннему усилию или температуре, то ставится знак плюс, иначе – минус.

Деформации стержней №1,3,4, на которых нет температурного воздействия вычисляются по формуле $\Delta l_j = \frac{N_j l_j}{EF_j}$ (в них деформация удлинения соответствует введенным растягивающим усилиям).

Если мысленно освободить стержень №2 от связи в шарнире B и нагреть его на ΔT градусов, то его температурное удлинение Δl_T было бы равно $\Delta l_T = \alpha \cdot \Delta T \cdot l_2$. Но под действием сжимающего усилия N_2 стержень укоротится на величину

$$\Delta l_N = \frac{N_2 \cdot l_2}{EF_2}.$$

То есть

$$\Delta l_2 = \alpha \cdot \Delta T \cdot l_2 - \frac{N_2 l_2}{EF_2}.$$

Тогда, уравнение (12) принимает вид:

$$2 \left(\alpha \cdot \Delta T \cdot l_2 - \frac{N_2 l_2}{EF_2} \right) = \frac{N_1 l_1}{EF_1} + \frac{N_3 l_3}{EF_3} \cos \varphi. \quad (13)$$

Мы получили замкнутую систему уравнений (9, 10, 11, 13) для нахождения усилий от температурного воздействия N_j .

Напряжения в стержнях определяются по формуле $\sigma_j = \frac{N_j}{F_j}$ с учетом знаков усилий.

Методические указания к заданию № 6

При построении эпюр поперечных сил Q_y и изгибающих моментов M_x используются дифференциальные зависимости при изгибе:

$$\frac{dM_x}{dz} = Q_y; \quad \frac{dQ_y}{dz} = q; \quad \frac{d^2 M_x}{dz^2} = q \quad (14)$$

и правило знаков для Q_y и M_x .

Поперечная сила Q_y в сечении считается положительной, если она вызывает сдвиг элемента балки по часовой стрелке.

Изгибающий момент M_x в сечении считается положительным, если он вызывает сжатие верхних волокон балки.

Эпюра – графическое отображение изменения силового фактора вдоль оси бруса.

Рассмотрим пример построения эпюр поперечных сил Q_y и изгибающих моментов M_x как функций параметра внешней нагрузки q для балки, изображенной на рис. 7.

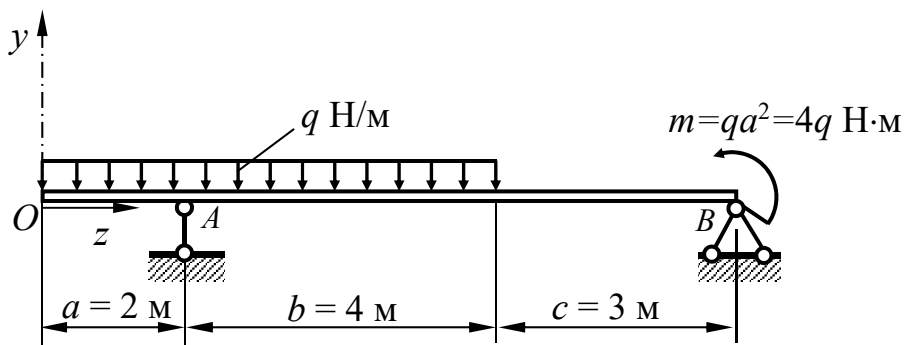


Рис. 7. Расчетная схема балки

1. Определим опорные реакции.

В сечениях A и B расположены опоры. Из уравнения равновесия $\sum z = 0$ следует, что горизонтальная реакция $B_z = 0$. Предположим, что другие опорные реакции A_y и B_y направлены вверх (рис. 8, a).

Составим уравнения статики как суммы моментов всех сил относительно точек A и B :

$$\sum \text{mom}_A = 0, \quad q \cdot a \cdot \frac{a}{2} - q \cdot b \cdot \frac{b}{2} + m + B_y \cdot (b + c) = 0 \rightarrow B_y = 0,286q;$$

$$\sum \text{mom}_B = 0, \quad q \cdot (a + b) \cdot \left(\frac{a + b}{2} + c \right) + m - A_y \cdot (b + c) = 0 \rightarrow A_y = 5,714q.$$

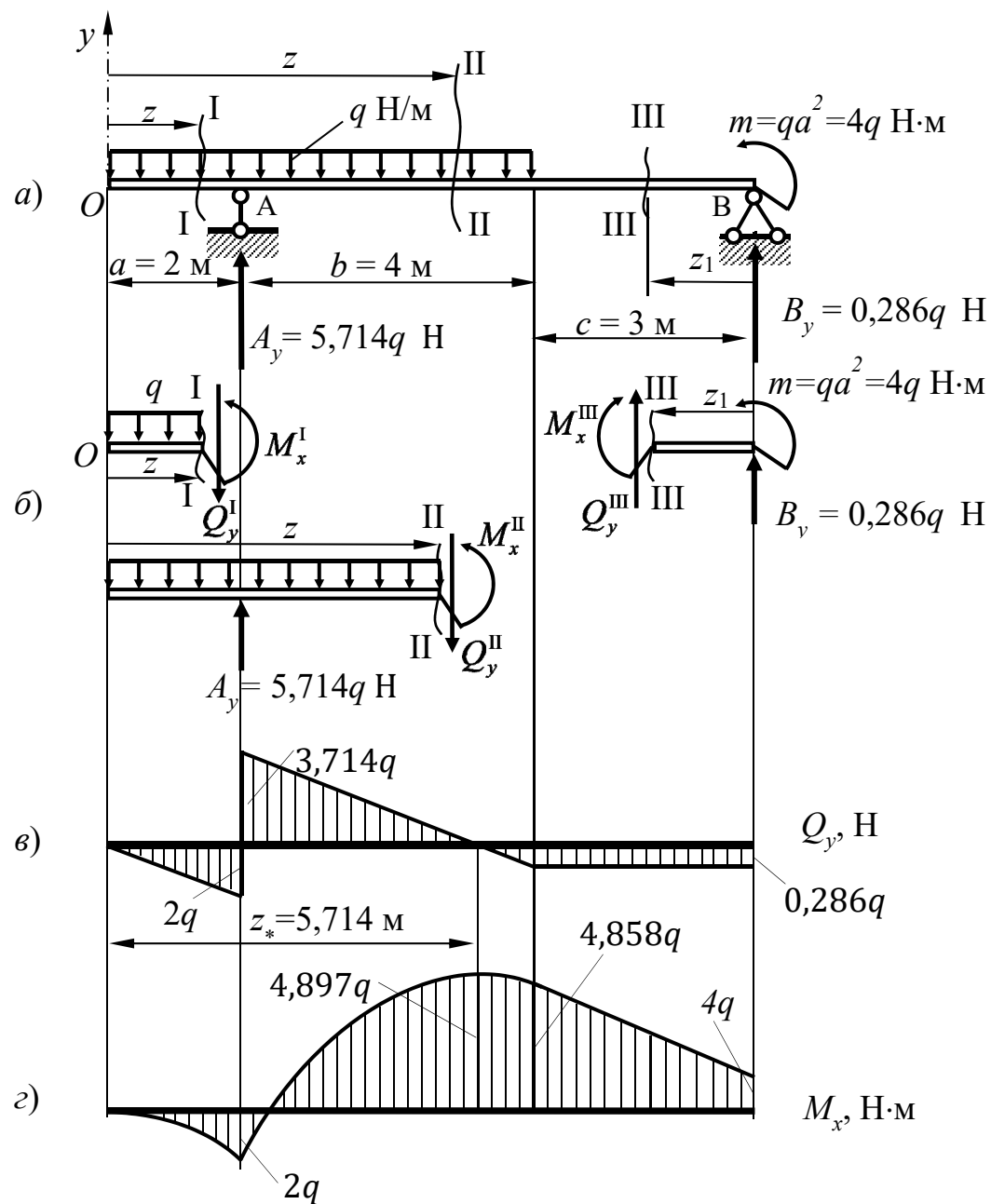


Рис. 8. Схема балки и эпюры:

- a* – схема балки с указанными внешними силами и реакциями;
б – схемы отсеченных частей; *в* – эпюра поперечных сил Q_y ;
г – эпюра изгибающих моментов M_x

Проверим правильность вычисления опорных реакций. Для этого запишем сумму проекций всех сил на вертикальную ось

$$\sum y = A_y + B_y - q \cdot (a + b) = 5,714q + 0,286q - q(2 + 4) \equiv 0.$$

2. Построение эпюр Q_y и M_x .

Для построения эпюр поперечных сил и изгибающих моментов разобьем балку на три характерных участка, в пределах каждого из которых Q_y и M_x изменяются по определенным законам. Проведем произвольные поперечные сечения в пределах каждого участка I–I, II–II и III–III. Для первых двух сечений определение Q_y и M_x проведем через внешние силы, расположенные слева от этих сечений. Для третьего сечения удобнее рассмотреть правую отсеченную часть балки (направив ось z_1 справа налево от опоры B). Схемы отсеченных частей показаны на рис. 8 б).

Запишем аналитические выражения (закон изменения внутреннего силового фактора в зависимости от координаты z) для Q_y и M_x по участкам.

Сечение I–I, левая отсеченная часть $0 \leq z \leq 2$ м.

$Q_y^I(z) = -q \cdot z$ – линейная зависимость. Для построения эпюры достаточно вычислить значения в начале и в конце участка $Q_y^I(0) = 0$ Н, $Q_y^I(2\text{м}) = -2q$ Н.

$M_x^I(z) = -q \cdot z \cdot \frac{z}{2} = -\frac{qz^2}{2}$ – квадратичная зависимость. Для построения эпюры вычислим значения в начале и в конце участка $M_x^I(0) = 0$ Н, $M_x^I(2\text{м}) = -\frac{q \cdot 2^2}{2} = -2q$ Н·м, строим параболу так, что ветви параболы направлены вниз.

Сечение II–II, левая отсеченная часть $2 \text{ м} \leq z \leq 6$ м.

К распределенной нагрузке, действующей как на первом, так и на втором участке, добавилась опорная реакция A_y , приложенная в сечении A на расстоянии $a = 2$ м от левого края балки.

$Q_y^{II}(z) = -q \cdot z + A_y = -q \cdot z + 5,714q$ – линейная зависимость. Вычислим значения в начале и в конце участка $Q_y^{II}(2\text{м}) = -q \cdot 2 + 5,714q = 3,714q$ Н, $Q_y^{II}(6\text{м}) = -q \cdot 6 + 5,714q = -0,286q$ Н.

На этом участке есть сечение, где поперечная сила равно нулю. В силу дифференциальной зависимости $Q_y = \frac{dM_x}{dz}$ изгибающий момент в этой точке имеет экстремум. Обозначим координату этого сечения z_* и определим её, приравняв к нулю выражение для Q_y :

$$Q_y^{\text{II}}(z_*) = -q \cdot z_* + 5,714 q = 0 \rightarrow z_* = 5,714 \text{ м.}$$

$M_x^{\text{II}}(z) = -q \cdot z \cdot \frac{z}{2} + A_y \cdot (z - a) = -\frac{qz^2}{2} + 5,714 \cdot (z - 2)$ – квадратичная зависимость.

Будем строить эпюру на этом участке по трем точкам: в начале и в конце участка, и в сечении при $z = z_*$

$$M_x^{\text{II}}(2\text{м}) = -\frac{q \cdot 2^2}{2} + 5,714 \cdot (2 - 2) = -2q \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_x^{\text{II}}(6\text{м}) = -\frac{q \cdot 6^2}{2} + 5,714 \cdot (6 - 2) = 4,858q \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_x^{\text{II}}(z_* = 5,714 \text{ м}) = -\frac{q \cdot 5,714^2}{2} + 5,714 \cdot (5,714 - 2) = 4,897q \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Вычислим значение $M_x^{\text{II}}(z_*)$ используя ранее построенную эпюру Q_y . Проинтегрировав зависимость $dM_x/dz = Q_y$ на участке балки от z_1 до z_2 , получим формулу $M_x(z_2) = \int_{z_1}^{z_2} Q_y dz + C_1$. Постоянная интегрирования C_1 имеет смысл момента $M_x(z_1)$ в начале участка интегрирования, а интеграл равен части площади на эпюре Q_y , ограниченной координатами z_1 и z_2 , т.е. $M_x(z_2) = M_x(z_1) + \int_{z_1}^{z_2} Q_y dz$.

$$\begin{aligned} M_x(z_*) &= M_x(a) + \int_a^{z_*} Q_y dz = -2q + \frac{1}{2} \cdot 3,714q \cdot (z_* - a) = \\ &= -2q + \frac{1}{2} \cdot 3,714q \cdot (5,714 - 2) = 4,897q \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Сечение III–III, правая отсеченная часть $0\text{м} \leq z_1 \leq 3\text{м}$.

$Q_y^{\text{III}}(z_1) = -B_y = -0,286 q \text{ Н}$ – не зависит от координаты, постоянная величина на всем участке.

$M_x^{\text{III}}(z_1) = B_y \cdot z_1 + m = 0,286q \cdot z_1 + 4q$ – линейная зависимость. Для построения эпюры достаточно вычислить значения в начале и в конце участка $M_x^{\text{III}}(0) = 4q \text{ Н} \cdot \text{м}$, $M_x^{\text{III}}(3\text{м}) = 0,286q \cdot 3 + 4q = 4,858q \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Эпюры поперечных сил Q_y и изгибающих моментов M_x показаны на рис. 8в, г) соответственно. Проанализируем эпюры.

Скачок на эпюре Q_y в сечении A соответствует приложенной в этом сечении опорной реакции A_y .

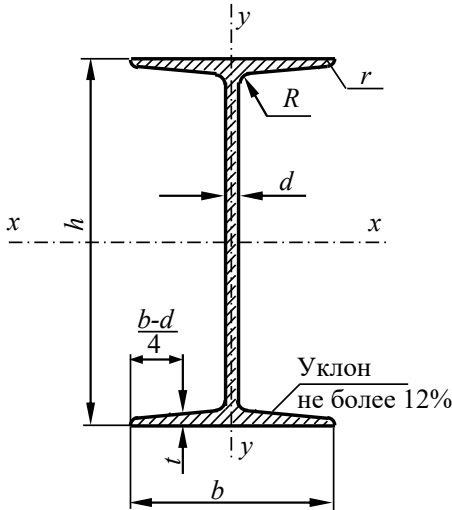
В отсечённых частях сечений I–I и II–II присутствует распределенная нагрузка и как следует из дифференциальных зависимостей при изгибе (14) эпюра поперечных сил Q_y – линейная функция, а эпюра изгибающих моментов M_x – квадратическая.

В правой отсеченной части сечения III–III распределенная нагрузка отсутствует, есть сосредоточенная сила (опорная реакция B_y) и сосредоточенный момент (внешний момент m). Эпюра поперечных сил постоянная и равна значению приложенной силы B_y с учетом правила знаков для поперечных сил. Эпюра изгибающих моментов – линейная функция, равная в начале отсчета значению приложенного внешнего момента m .

По всей длине балки сосредоточенные моменты отсутствуют следовательно эпюра изгибающих моментов M_x непрерывная, без разрывов и скачков.

СОРТАМЕНТ ПРОКАТНОЙ СТАЛИ

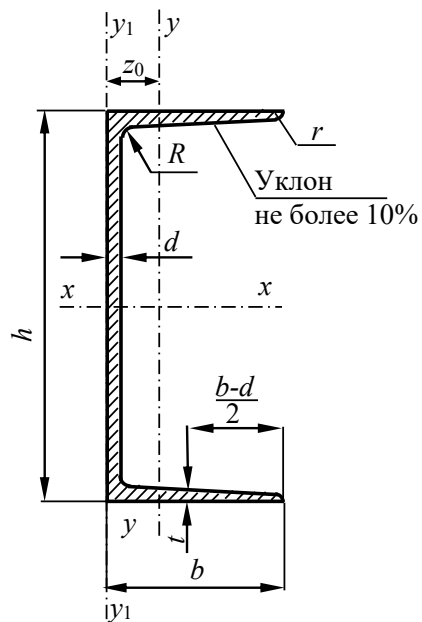
Сталь горячекатаная. Балки двутавровые с уклоном внутренних
граней полков (ГОСТ 35087–2024)



- Обозначения:**
h – высота балки;
b – ширина полки;
d – толщина стенки;
t – средняя толщина полки;
R – радиус внутреннего закругления;
r – радиус закругления полки;
J – момент инерции;
W – момент сопротивления;
S – статический момент полусечения;
i – радиус инерции

Но- мер балки	<i>h</i> , мм	<i>b</i> , мм	<i>d</i> , мм	<i>t</i> , мм	Пло- щадь сече- ния, см ²	Масса 1 м, кг	<i>I_x</i> , см ⁴	<i>W_x</i> , см ³	<i>i_x</i> , см	<i>S_x</i> , см ³	<i>I_y</i> , см ⁴	<i>W_y</i> , см ³	<i>i_y</i> , см
10У	100	55	4,5	7,2	12,05	9,46	198	39,7	4,06	23,0	17,9	6,49	1,22
12У	120	64	4,8	7,3	14,65	11,50	350	58,4	4,88	33,7	27,9	8,72	1,38
14У	140	73	4,9	7,5	17,45	13,70	572	81,7	5,73	46,8	41,9	11,50	1,55
16У	160	81	5,0	7,8	20,25	15,90	873	109,0	6,57	62,3	58,6	14,50	1,70
18У	180	90	5,1	8,1	23,44	18,40	1290	143,0	7,42	81,4	82,6	18,40	1,88
20У	200	100	5,2	8,4	26,75	21,00	1840	184,0	8,28	104,0	115,0	23,10	2,07
22У	220	110	5,4	8,7	30,57	24,00	2550	232,0	9,13	131,0	157,0	28,60	2,27
24У	240	115	5,6	9,5	34,78	27,30	3460	289,0	9,97	163,0	198,0	34,50	2,37
27У	270	125	6,0	9,8	40,13	31,50	5010	371,0	11,20	210,0	260,0	41,50	2,54
30У	300	135	6,5	10,2	46,50	36,50	7080	472,0	12,30	268,0	227,0	49,90	2,69
33У	330	140	7,0	11,2	53,76	42,20	9840	597,0	13,50	339,0	419,0	59,90	2,79
36У	360	145	7,5	12,3	61,91	48,60	13380	743,0	14,70	423,0	516,0	71,10	2,89
40У	400	155	8,3	13,0	72,61	57,00	19062	953,0	16,20	545,0	667,0	86,10	3,03
45У	450	160	9,0	14,2	84,71	66,50	27696	1231,0	18,10	708,0	808,0	101,00	3,09
50У	500	170	10,0	15,2	100,00	78,50	39727	1589,0	19,90	919,0	1043,0	123,00	3,23
55У	550	180	11,0	16,5	117,96	92,60	55962	2035,0	21,80	1181,0	1356,0	151,00	3,39
60У	600	190	12,0	17,8	137,58	108,00	76806	2560,0	23,60	1491,0	1725,0	182,00	3,54

Сталь горячекатаная. Швеллеры (ГОСТ 8240–97)

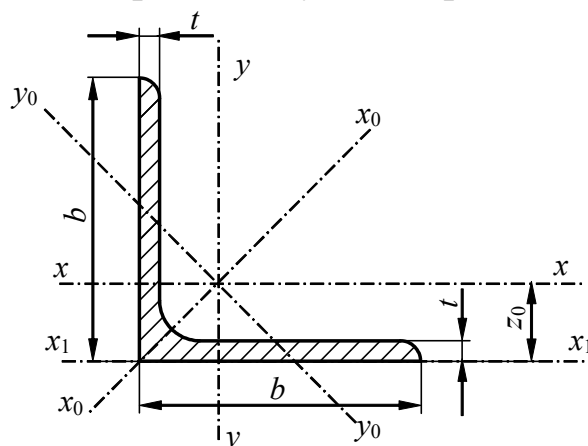


Обозначения:

h – высота балки;
 b – ширина полки;
 d – толщина стенки;
 t – средняя толщина полки;
 R – радиус внутреннего закругления;
 J – момент инерции;
 W – момент сопротивления;
 S – статический момент полусечения;
 i – радиус инерции;
 r – радиус закругления полки;
 z_0 – расстояние от оси $y - y$ до наружной грани стенки

Номер балки	h , мм	b , мм	d , мм	t , мм	Площадь сечения, 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	z_0 , см
5	50	32	4,4	7	6,16	4,84	22,8	9,1	1,92	5,59	5,61	2,75	0,954	1,16
6,5	65	36	4,4	7,2	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	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	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	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	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	17	13,3	545	77,8	5,66	45,1	57,5	13,3	1,84	1,87
16	160	64	5	8,4	18,1	14,2	747	93,4	6,42	54,1	63,3	13,8	1,87	1,8
16a	160	68	5	9	19,5	15,3	823	103	6,49	59,4	78,8	16,4	2,01	2
18	180	70	5,1	9,7	20,7	16,3	1090	121	7,24	69,8	86	17	2,04	1,94
18a	180	74	5,1	9,3	22,2	17,4	1190	132	7,32	76,1	105	20	2,18	2,13
20	200	76	5,2	9	23,4	18,4	1520	152	8,07	87,8	113	20,5	2,2	2,07
20a	200	80	5,2	9,7	25,2	19,8	1670	167	8,15	95,9	139	24,2	2,35	2,28
22	220	82	5,4	9,5	26,7	21	2110	192	8,89	110	151	25,1	2,37	2,21
22a	220	87	5,4	10	28,8	22,6	2330	212	8,99	121	187	30	2,55	2,46
24	240	90	5,6	10	30,6	24	2900	242	9,73	139	208	31,6	2,6	2,42
24a	240	95	5,6	11	32,9	25,8	3180	265	9,84	151	254	37,2	2,79	2,67
27	270	95	6	11	35,2	27,7	4160	308	10,9	178	262	37,3	2,73	2,47
30	300	100	6,5	11	40,5	31,8	5810	387	12	224	327	43,6	2,84	2,52
33	330	105	7	12	46,5	36,5	7980	484	13,1	281	410	51,8	2,97	2,59
36	360	110	7,5	13	53,4	41,9	10820	601	14,2	350	513	61,7	3,1	2,68
40	400	115	8	14	61,5	48,3	15220	761	15,7	444	642	73,4	3,23	2,75

Сталь прокатная угловая равнополочная (ГОСТ 8509–93)



Обозначения:

b – ширина полки;
 t – толщина полки;
 J – момент инерции;
 i – радиус инерции;
 z_0 – расстояние от центра тяжести до наружной грани полки

Номер уголка	b , мм	t , мм	Площадь сечения, см ²	Масса 1 м уголка, кг	I_x , см ⁴	i_x , см	I_{x0max} , см ⁴	i_{x0max} , см	I_{y0min} , см ⁴	i_{y0min} , см	z_0 , см
2	20	3	1,13	0,89	0,4	0,59	0,63	0,75	0,17	0,39	0,6
		4	1,46	1,15	0,5	0,58	0,78	0,73	0,22	0,38	0,64
2,5	25	3	1,43	1,12	0,81	0,75	1,29	0,95	0,34	0,49	0,73
		4	1,86	1,46	1,03	0,74	1,62	0,93	0,44	0,48	0,76
2,8	28	3	1,62	1,27	1,16	0,85	1,84	1,07	0,48	0,55	0,8
3	30	3	1,74	1,36	1,45	0,91	2,3	1,15	0,6	0,59	0,85
		4	2,27	1,78	1,84	0,8	2,92	1,13	0,77	0,58	0,89
3,2	32	3	1,86	1,46	1,77	0,97	2,8	1,23	0,74	0,63	0,89
		4	2,43	1,91	2,26	0,96	3,58	1,21	0,94	0,62	0,94
3,5	35	3	2,04	1,6	2,35	1,07	3,72	1,35	0,97	0,69	0,97
		4	2,17	2,1	3,01	1,06	4,76	1,33	1,25	0,68	1,01
		5	3,28	2,58	3,61	1,05	5,71	1,32	1,52	0,68	1,05
4	40	3	2,35	1,85	3,55	1,23	5,63	1,55	1,47	0,79	1,09
		4	3,08	2,42	4,58	1,22	7,26	1,53	1,9	0,78	1,13
		5	3,79	2,98	5,53	1,21	8,75	1,52	2,3	0,78	1,17
4,5	45	3	2,65	2,08	5,13	1,39	8,13	1,75	2,12	0,89	1,21
		4	3,48	2,73	6,63	1,38	10,52	1,74	2,74	0,89	1,26
		5	4,29	3,37	8,03	1,37	12,74	1,72	3,33	0,88	1,3
5	50	3	2,96	2,32	7,11	1,55	11,27	1,95	2,95	1	1,33
		4	3,89	3,05	9,21	1,54	14,63	1,94	3,8	0,99	1,38
		5	4,8	3,77	11,2	1,53	17,77	1,92	4,63	0,98	1,42
		6	5,69	4,47	13,07	1,52	20,72	1,91	5,43	0,98	1,46
5,6	56	4	4,38	3,44	13,1	1,73	20,79	2,18	5,41	1,11	1,52
		5	5,41	4,25	15,97	1,72	25,36	2,16	6,59	1,1	1,57
6	60	4	4,72	3,71	16,21	1,85	25,69	2,33	6,72	1,19	1,62
		5	5,83	4,58	19,79	1,84	31,4	2,32	8,18	1,18	1,66
		6	6,92	5,43	23,21	1,83	36,81	2,31	9,6	1,18	1,7
		8	9,04	7,1	29,55	1,81	46,77	2,27	12,34	1,17	1,78
		10	11,08	8,7	35,32	1,79	55,64	2,24	15	1,16	1,85
6,3	63	4	4,96	3,9	18,86	1,95	29,9	2,45	7,81	1,25	1,69
		5	6,13	4,81	23,1	1,94	36,8	2,44	9,52	1,25	1,74
		6	7,28	5,72	27,06	1,93	42,91	2,43	11,18	1,24	1,78

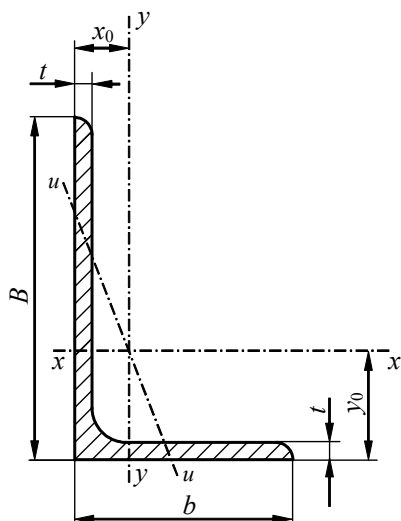
Продолжение табл.

Номер уголка	b , мм	t , мм	Пло- щадь се- чения, см ²	Масса 1 м уголка, кг	I_x , см ⁴	i_x , см	I_{x0max} , см ⁴	i_{x0max} , см	I_{y0min} , см ⁴	i_{y0min} , см	z_0 , см
7	70	4,5	6,2	4,87	29,04	2,16	46,03	2,72	12,04	1,39	1,88
		5	6,86	5,38	31,94	2,16	50,67	2,72	13,22	1,39	1,9
		6	8,15	6,39	37,58	2,15	59,64	2,71	15,52	1,38	1,94
		7	9,42	7,39	42,98	2,14	68,19	2,69	17,77	1,37	1,99
		8	10,67	8,37	48,16	2,12	76,35	2,68	19,97	1,37	2,02
7,5	75	5	7,39	5,8	39,53	2,31	62,65	2,91	16,41	1,49	2,02
		6	8,78	6,89	46,57	2,3	73,87	2,9	19,28	1,48	2,06
		7	10,15	7,96	53,34	2,29	84,61	2,89	22,07	1,47	2,1
		8	11,5	9,02	59,84	2,28	94,89	2,87	24,8	1,47	2,15
		9	12,83	10,07	66,1	2,27	104,72	2,86	27,48	1,46	2,18
8	80	5,5	8,63	6,78	52,68	2,47	83,56	3,11	21,8	1,59	2,17
		6	9,38	7,36	56,97	2,47	90,4	3,11	23,54	1,58	2,19
		7	10,85	8,51	65,31	2,45	103,6	3,09	26,97	1,58	2,23
		8	12,3	9,65	73,36	2,44	116,39	3,08	30,32	1,57	2,27
9	90	6	10,61	8,33	82,1	2,78	130	3,5	33,87	1,79	2,43
		7	12,28	9,64	94,3	2,77	149,67	3,49	38,94	1,78	2,47
		8	13,93	10,93	106,1	2,76	168,42	3,48	43,8	1,77	2,51
		9	15,6	12,2	118	2,75	186	3,46	48,6	1,77	2,55
10	100	6,5	12,82	10,06	122,1	3,09	193,46	3,89	50,73	1,99	2,68
		7	13,75	10,79	130,6	3,08	207,01	3,88	54,16	1,98	2,71
		8	15,6	12,25	147,2	3,07	233,46	3,87	60,92	1,98	2,75
		10	19,24	15,1	179	3,05	283,83	3,84	74,08	1,96	2,83
		12	22,8	17,9	208,9	3,03	330,95	3,81	86,84	1,95	2,91
		14	26,28	20,63	237,2	3	374,98	3,78	99,32	1,94	2,99
		16	29,68	23,3	263,8	2,98	416,04	3,74	111,61	1,94	3,06
11	110	7	15,15	11,89	175,6	3,4	278,54	4,29	72,68	2,19	2,96
		8	17,2	13,5	198,2	3,39	314,51	4,28	81,83	2,18	3
12	120	8	18,8	14,76	259,8	3,72	412,45	4,68	107,04	2,39	3,25
		9	23,24	18,24	317,2	3,69	503,79	4,66	130,54	2,37	3,33
		10	27,6	21,67	371,8	3,67	590,28	4,62	153,33	2,36	3,41
		15	33,99	26,68	448,9	3,63	711,32	4,57	186,48	2,34	3,53
12,5	125	8	19,69	15,46	294,4	3,87	466,76	4,87	121,98	2,49	3,36
		9	22	17,3	327,5	3,86	520	4,86	135,88	2,48	3,4
		10	24,33	19,1	359,8	3,85	571,04	4,84	148,59	2,47	3,45
		12	28,89	22,68	422,2	3,82	670,02	4,82	174,43	2,46	3,53
		14	33,37	26,2	481,8	3,8	763,9	4,78	199,62	2,45	3,61
		16	37,77	29,65	538,6	3,78	852,84	4,75	224,29	2,44	3,68
14	140	9	24,72	19,41	465,7	4,34	739,42	5,47	192,03	2,79	3,78
		10	27,33	21,45	512,3	4,33	813,62	5,46	210,96	2,78	3,82
		12	32,49	25,5	602,5	4,31	956,98	5,43	248,01	2,76	3,9

Окончание табл.

Номер уголка	b , мм	t , мм	Пло- щадь сече- ния, см ²	Масса 1 м уголка, кг	I_x , см ⁴	i_x , см	I_{x0max} , см ⁴	i_{x0max} , см	I_{y0min} , см ⁴	i_{y0min} , см	z_0 , см
15	150	10	29,33	23,02	634,8	4,65	1008,56	5,86	260,97	2,98	4,07
		12	34,89	27,39	747,5	4,63	1187,86	5,83	307,09	2,97	4,15
		15	43,08	33,82	908,4	4,59	1442,6	5,79	374,17	2,95	4,27
		18	51,09	40,11	1060	4,56	1680,92	5,74	438,24	2,93	4,38
16	160	10	31,43	24,67	774,2	4,96	1229,1	6,25	319,38	3,19	4,3
		11	34,42	27,02	844,2	4,95	1340,06	6,24	347,77	3,18	4,35
		12	37,39	28,35	912,9	4,94	1450	6,23	357,78	3,17	4,39
		14	43,57	33,97	1046	4,92	1662,13	6,2	430,81	3,16	4,47
		16	49,07	38,52	1175	4,89	1865,73	6,17	484,64	3,14	4,55
		18	54,79	43,01	1290	4,87	2061,03	6,13	537,46	3,13	4,63
		20	60,4	47,44	1419	4,85	2248,26	6,1	589,43	3,12	4,7
18	180	11	38,8	30,47	1216	5,6	1933,1	7,06	499,78	3,59	4,85
		12	42,19	33,12	1317	5,59	2092,78	7,04	540,45	3,58	4,89
20	200	12	47,1	36,97	1823	6,22	2896,16	7,84	749,4	3,99	5,37
		13	50,85	39,92	1961	6,21	3116,18	7,83	805,35	3,98	5,42
		14	54,6	42,8	2097	6,2	3333	7,81	861	3,97	5,46
		16	61,98	48,65	2363	6,17	3755,39	7,78	969,74	3,96	5,54
		20	76,54	60,08	2871	6,12	4560,42	7,72	1181,92	3,93	5,7
		25	94,29	74,02	3466	6,06	5494,04	7,63	1438,38	3,91	5,89
		30	111,54	87,56	4020	6	6351,05	7,55	1698,16	3,89	6,07
22	220	14	60,38	47,4	2814	6,83	4470,15	8,6	1158,56	4,38	5,91
		16	68,58	53,83	3175	6,8	5045,37	8,58	1305,52	4,36	6,02
25	250	16	78,4	61,55	4717	7,76	7492,1	9,78	1942,09	4,98	6,75
		18	87,72	68,86	5247	7,73	8336,69	9,75	2157,78	4,96	6,83
		20	96,96	76,11	5765	7,71	9159,73	9,72	2370,01	4,94	6,91
		22	106,12	83,31	6270	7,09	9961,6	9,69	2579,04	4,93	7
		25	119,71	93,97	7006	7,65	11125,5	9,64	2887,26	4,91	7,11
		28	133,12	104,5	7717	7,61	12243,8	9,59	3189,89	4,9	7,23
		30	141,96	111,44	8177	7,59	12964,7	9,56	3388,98	4,89	7,31

Сталь прокатная угловая не равнополочная (ГОСТ 8510–86)



Обозначения:

B – ширина большей полки;

b – ширина меньшей полки;

t – толщина полки;

J – момент инерции;

i – радиус инерции;

x_0, y_0 – расстояние от центра до
наружных граней полок

Номер уголка	B , мм	b , мм	t , мм	Пло- щадь сече- ния, см ²	Масса 1 м уголка, кг	I_x , см ⁴	i_x , см	I_y , см ⁴	i_y , см	I_u min, см ⁴	i_u min, см	x_0 , см	y_0 , см	$\text{tg}\alpha$
2,5/1,6	25	16	3	1,16	0,91	0,7	0,78	0,22	0,44	0,13	0,34	0,42	0,86	0,392
3/2*	30	20	3	1,43	1,12	1,27	0,94	0,45	0,56	0,26	0,43	0,51	1	0,427
			4	1,86	1,46	1,61	0,93	0,56	0,55	0,34	0,43	0,54	1,04	0,421
3,2/2	32	20	3	1,49	1,17	1,52	1,01	0,46	0,55	0,28	0,43	0,49	1,08	0,382
			4	1,94	1,52	1,93	1	0,57	0,54	0,35	0,43	0,53	1,12	0,374
4/2,5	40	25	3	1,89	1,48	3,06	1,27	0,93	0,7	0,56	0,54	0,59	1,32	0,385
			4	2,47	1,94	3,93	1,26	1,18	0,69	0,71	0,54	0,63	1,37	0,281
			5	3,03	2,37	4,73	1,25	1,41	0,68	0,86	0,53	0,66	1,41	0,374
4/3*	40	30	4	2,67	2,26	4,18	1,25	2,01	0,87	1,09	0,64	0,78	1,28	0,544
			5	3,28	2,46	5,04	1,24	2,41	0,86	1,33	0,64	0,82	1,32	0,539
4,5/2,8	45	28	3	2,14	1,68	4,41	1,48	1,32	0,79	0,79	0,61	0,64	1,47	0,382
			4	2,8	2,2	5,68	1,42	1,69	0,78	1,02	0,6	0,68	1,51	0,379
5/3,2	50	32	3	2,42	1,9	6,18	1,6	1,99	0,91	1,18	0,7	0,72	1,6	0,403
			4	3,17	2,4	7,98	1,59	2,56	0,9	1,52	0,69	0,76	1,65	0,401
5,6/3,6	56	36	4	3,58	2,81	11,37	1,78	3,7	1,02	2,19	0,78	0,84	1,82	0,406
			5	4,41	3,46	13,82	1,77	4,48	1,01	2,6	0,78	0,88	1,87	0,404
6,3/4,0	63	40	4	4,04	3,17	16,33	2,01	5,16	1,13	3,07	0,87	0,91	2,03	0,397
			5	4,98	3,91	19,91	2	6,26	1,12	3,73	0,86	0,95	2,08	0,396
			6	5,9	4,63	23,31	1,99	7,29	1,11	4,36	0,86	0,99	2,12	0,393
			8	7,68	6,06	29,6	1,96	9,15	1,09	5,585	0,85	1,07	2,2	0,386
6,5/5*	65	50	5	5,56	4,36	23,41	2,05	12,08	1,47	6,41	1,07	1,26	2	0,576
			6	6,6	5,18	27,46	2,04	14,12	1,46	7,52	1,07	1,3	2,04	0,575
			7	7,62	5,98	31,32	2,03	16,05	1,45	8,6	1,06	1,34	2,08	0,571
			8	8,62	6,77	35	2,02	18,88	1,44	9,65	1,06	1,37	2,12	0,57
7/4,5	70	45	5	5,59	4,39	27,76	2,23	9,05	1,27	5,34	0,98	1,05	2,28	0,406
7,5/5	75	50	5	6,11	4,79	34,81	2,39	12,47	1,43	7,24	1,09	1,17	2,39	0,436
			6	7,25	5,69	40,92	2,38	14,6	1,42	8,48	1,08	1,21	2,44	0,435
			7	8,37	6,57	46,77	2,36	16,61	1,41	9,69	1,08	1,25	2,48	0,435
			8	9,47	7,43	52,38	2,35	18,52	1,4	10,87	1,07	1,29	2,52	0,43

Окончание табл.

Номер уголка	B , мм	b , мм	t , мм	Пло- щадь сече- ния, см ²	Масса 1 м уголка, кг	I_x , см ⁴	i_x , см	I_y , см ⁴	i_y , см	$I_{u \min}$, см ⁴	i_u min, см	x_o , см	y_o , см	$\text{tg}\alpha$
8/5	80	50	5	6,36	4,49	41,64	2,56	12,68	1,41	7,57	1	1,13	2,6	0,387
			6	7,55	5,92	48,98	2,55	14,85	1,4	8,88	1,08	1,17	2,65	0,386
8/6*	80	60	6	8,15	6,39	52,06	2,53	25,18	1,76	13,61	1,29	1,49	2,47	0,547
			7	9,42	7,39	59,61	2,52	28,74	1,75	15,58	1,29	1,53	2,52	0,546
			8	10,67	8,37	66,88	2,5	32,15	1,74	17,49	1,28	1,57	2,56	0,544
9/5,6	90	56	5,5	7,86	6,17	65,28	2,88	19,67	1,58	11,77	1,22	1,26	2,92	0,384
			6	8,54	6,7	70,58	2,88	21,22	1,58	12,7	1,22	1,28	2,95	0,384
			8	11,18	8,77	90,87	2,85	27,08	1,56	16,29	1,21	1,36	3,04	0,38
10/6,3	100	63	6	9,58	7,53	98,29	3,2	30,58	1,79	18,2	1,38	1,42	3,23	0,393
			7	11,09	8,7	112,86	3,19	34,99	1,78	20,83	1,37	1,46	3,28	0,392
			8	12,57	9,87	126,96	3,18	39,21	1,77	23,38	1,36	1,5	3,32	0,391
			10	15,47	12,14	153,95	3,15	47,18	1,75	28,34	1,35	1,58	3,4	0,387
11/7	110	70	6,5	11,45	8,98	142,42	3,53	45,61	2	26,94	1,53	1,58	3,55	0,402
			8	13,93	10,93	171,54	3,51	54,64	1,98	32,31	1,52	1,64	3,61	0,4
12,5/8	125	80	7	14,06	11,04	226,53	4,01	73,73	2,29	43,4	1,76	1,8	4,01	0,407
			8	15,98	12,58	225,98	4	80,95	2,28	48,82	1,75	1,84	4,05	0,406
			10	19,7	15,47	311,61	3,98	100,47	2,26	59,33	1,74	1,92	4,14	0,404
			12	23,36	18,34	364,79	3,95	116,84	2,24	69,47	1,72	2	4,22	0,4
14/9	140	90	8	18	14,13	363,68	4,49	119,79	2,58	70,27	1,58	2,03	4,49	0,411
			10	22,24	17,46	444,45	4,47	145,54	2,58	85,51	1,96	2,12	4,58	0,409
16/10	160	100	9	22,87	17,96	605,97	5,15	186,03	2,85	110,4	2,2	2,24	5,19	0,391
			10	25,28	19,85	666,59	5,13	204,09	2,84	121,16	2,19	2,28	5,23	0,39
			12	30,04	23,58	784,22	5,11	238,75	2,82	142,14	2,18	2,36	5,32	0,388
			14	34,72	27,26	897,19	5,08	271,6	2,8	162,49	2,16	2,43	5,4	0,385
18/11	180	110	10	28,33	22,2	952,28	5,8	276,37	3,12	165,44	2,42	2,44	5,88	0,376
			12	33,69	26,4	1122,6	5,77	324,09	3,1	194,28	2,4	2,52	5,97	0,374
20/12,5	200	125	11	34,87	27,37	1449	6,45	446,36	3,58	263,84	2,75	2,79	6,5	0,392
			12	37,89	29,74	1568,2	6,43	481,93	3,57	285,04	2,74	2,83	6,54	0,392
			14	43,87	34,43	1800,8	6,41	550,77	3,54	326,54	2,73	2,91	6,62	0,39
			16	49,77	39,07	2026,1	6,38	616,66	3,52	366,99	2,72	2,99	6,71	0,388

ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ К ЗАЩИТЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

1. Записать условия прочности для бруса кольцевого сечения: при растяжении; при кручении; при внецентренном сжатии; при прямом изгибе.

2. Записать условия жесткости для бруса прямоугольного поперечного сечения, жестко защемленного с одного края при его растяжении, изгибе.

3. Как вычислить изменения размеров стержня длиной L прямоугольного поперечного сечения (b, h) при его растяжении?

4. Как изменится абсолютная продольная деформация и прочность сжатого стержня кругового сечения, если в нем просверлить центральное отверстие по всей длине $d_0 = 0,8 \cdot d$?

5. Как изменится прочность и жесткость бруса кругового поперечного сечения при его кручении, если в нем просверлить центральное отверстие $d_0 = 0,8 \cdot d$?

6. Как определить моменты инерции сложной фигуры, если её можно разбить на простейшие фигуры, моменты инерции которых легко определить по формулам или таблицам?

7. Чем отличается чистый изгиб от поперечного, прямой от косого? Примеры нагружения.

8. Привести рациональные формы поперечных сечений при изгибе балок из пластичного и хрупкого материала, обосновать варианты. Записать для них условия прочности.

9. Где находится опасное сечение и опасная точка в консольной балке, испытывающей изгиб от сил собственного веса?

10. Как определить максимальный прогиб и максимальные напряжения в балке, опертой по краям от сил собственного веса?

11. При изгибе в какой из главных центральных плоскостей инерции балки двутаврового сечения ее прочность будет больше и во сколько раз?

12. При изгибе в какой из главных центральных плоскостей инерции балка с поперечным сечением швеллера будет иметь больший прогиб и во сколько раз?

13. Как определить силу, действующую на балку, если известен прогиб балки в точке приложения силы?

14. Как определить напряжения в опасных точках при косом изгибе балки прямоугольного сечения?

15. Как определить напряжения в опасных точках при совместном кручении и изгибе балки кругового сечения?

16. Записать условие прочности для стержня квадратного поперечного сечения, растянутого центральной силой и при внецентренном приложении сил в сечении стержня.

17. Что означает потеря устойчивости сжатого стержня?

18. Что такое критическая сила сжатого стержня, как ее вычислить?

19. Что такое гибкость стержня и предельная гибкость? От чего они зависят?

20. Как влияют жесткость поперечного сечения, длина стержня и условия его закрепления на критическую силу?

21. Как изменится критическая сила сжатого стержня кругового поперечного сечения диаметра d , если в нем просверлить отверстие $d_0 = 0,8 \cdot d$?

22. Сравнить гибкость стержня – консольного, жесткозащемленного с двух сторон, шарнирно-опертого по краям.

23. Как отличается критическая сила для шарнирно-опертого и жестко зашцементированного стержней?

24. Как изменится величина критической эйлеровой силы если: а) все размеры поперечного сечения увеличить в n раз; б) длину стержня увеличить в m раз?

25. Какой цикл нагружения является более опасным с точки зрения усталостной прочности? Как определяются параметры цикла: среднее напряжение, амплитудное напряжение, коэффициент асимметрии?

26. Дать определение предела выносливости материала. От каких характеристик цикла нагружения он зависит?

27. Как проводится расчет на выносливость при одновременном действии нормальных и касательных напряжений?

28. Чем обусловлено повышенное значение нормативного коэффициента запаса прочности при статическом расчете валов редукторов?

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА СЕМЕСТРА

Недели	Лекции	Темы практических занятий
1	Введение. Метод сечений. Понятие о напряжениях и деформациях. Основные виды деформаций стержней	Расчет ферм
2	Растяжение. Закон Гука. Механические свойства конструкционных материалов	Расчет ферм
3	Вопросы прочности и надежности в сопротивлении материалов. Расчет на прочность по допускаемым напряжениям. Условия прочности и жесткости.	Расчеты при растяжении (сжатии): статически определимые системы
4	Расчет статически неопределимых систем при растяжении (сжатии)	Расчеты при растяжении (сжатии): статически неопределимые системы
5	Геометрические характеристики плоских сечений	Определение температурных и монтажных усилий в стержнях
6	Кручение стержней кругового поперечного сечения	Расчеты при кручении (стат. опред. системы)
7	Расчет цилиндрических витых пружин растяжения (сжатия)	Расчеты при кручении (стат. неопред. системы)
8	Изгиб. Дифференциальные зависимости при изгибе. Построение эпюр внутренних силовых факторов при изгибе. Нормальные напряжения при изгибе. Расчеты на прочность. Рациональные поперечные сечения балок	Расчет пружин. Геометрические характеристики поперечных сечений при изгибе
9	Определение перемещений при изгибе. Интеграл Максвелла-Мора. Правило Симпсона. Плоские рамы	Построение эпюр при изгибе, расчеты на прочность
10	Сложное нагружение: косой изгиб, внецентренное растяжение (сжатие)	Перемещения при изгибе. Формула Симпсона. Расчеты на жесткость
11	Напряженное состояние в точке. Критерии прочности. Сложное нагружение: сочетание изгиба с кручением	Построение эпюр и расчеты на прочность в плоских рамах
12	Расчеты на усталость. Характер и причины усталостного разрушения. Типы циклов и их параметры. Кривая усталости Вёлера и предел выносливости. Расчет на усталость при симметричном цикле	Сложное нагружение: косой изгиб, внецентренное растяжение-сжатие
13	Диаграмма Хейга предельных напряжений и ее схематизация. Расчет на выносливость при асимметричном цикле и при сочетании изгиба с кручением. Проектный расчет валов редукторов	Сложное нагружение: сочетание изгиба с кручением
14	Устойчивость сжатых стержней. Формула Эйлера для расчета критической силы	Расчет валов редукторов
15	Полная диаграмма зависимости критических напряжений от гибкости. Практические расчеты на устойчивость по коэффициенту продольного изгиба	Устойчивость сжатых стержней
16	Обзорная лекция по курсу	Заключительное занятие

Производственно-практическое издание

Новикова Ольга Валерьевна
Цой Валерьян Эдуардович

РАСЧЕТЫ НА ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Методические указания

Редактор О.А. Бешенцева
Компьютерная верстка Л.И. Веселовского

Подписано в печать	27.04.26.	Печать ризография	Формат 60x84 1/16
Печ. л. 3,0	Тираж 80 экз.	Изд. № 26-026	Заказ №

Оригинал-макет подготовлен в РИО НИУ «МЭИ».
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.
Отпечатано в типографии НИУ «МЭИ».
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13.