

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального образования
**«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА»**

В.И. Шапин

ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА

**Опорный конспект лекций
с дидактическим сопровождением
(издание 2-е, дополненное)**

Иваново 2012

УДК 539/6(031)+620.10
III 23

Шапин В.И. Прикладная механика: Опорный конспект лекций с дидактическим сопровождением/ ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». –Изд. 2-е, доп. – Иваново, 2012. – 68 с.

Данное пособие предназначено для оказания методической помощи студентам. Оно позволяет за ограниченное время систематизировать значительный объём учебного материала и готовиться к семинарам и лабораторным занятиям, к промежуточным контролям модели РИТМ, а также к заключительному контролю по дисциплине «Прикладная механика» в ограниченном объёме её изучения.

Пособие включает опорный конспект и дидактическое сопровождение изучаемого на лекциях материала. Курс изложен в обобщённом и сжатом виде.

Может найти применение у преподавателей с рекомендацией дидактического сопровождения при изложении основ науки о прочности, жёсткости, устойчивости и надёжности инженерных конструкций.

Материал может служить базовой опорой для слушателей в их дальнейшей инженерной практике.

Печатается по решению редакционно-издательского совета ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный редактор
канд. техн. наук, доцент М.А. Ноздрин

Рецензент
канд. техн. наук, доцент А.С. Зайцев (ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»)

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	4
Предисловие ко второму изданию.....	8
Опорный конспект лекций.....	9
1. Реальный объект и расчётная схема.....	9
2. Внутренние усилия и основные виды нагружения– сопротивления.....	10
3. Центральное растяжение и сжатие прямолинейного стержня.....	14
4. Механические характеристики материалов.....	16
5. Кручение круглых валов.....	18
6. Плоский прямой изгиб.....	21
6.1. Нормальные напряжения и расчёт на проч- ность.....	21
6.2. Определение перемещений и расчёт на жёст- кость.....	25
7. Расчёт тонкостенных оболочек.....	27
8. Некоторые виды сложного сопротивления.....	30
8.1. Косой изгиб.....	30
8.2. Внекцентренное сжатие–растяжение.....	31
8.3. Изгиб с кручением вала круглого сечения.....	33
9. Дидактическое сопровождение проблем вибродиагности- ки конструкций.....	34
10. Дидактическое сопровождение проблем вибрационной биомеханики.....	35
11. Дидактическое сопровождение фрагментов основ конст- руирования в прикладной механике.....	37
Заключение.....	38
Рекомендуемая литература.....	39
Приложения.....	43
Приложение 1.....	43
Приложение 2.....	57
Приложение 3.....	66

*Мало кто знает, как много надо знать,
чтобы понять, как мало мы знаем.
Аристотель*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Цель данной работы – дать реферативное представление слушателям об основах науки о прочности в форме опорного конспекта по основным разделам базового краткого курса «Прикладная механика» с дидактическим сопровождением излагаемого материала. Последнее предполагает использование простейших наглядных пособий, цветного мела и раздаточного материала.

При этом имеется в виду, что опорный конспект не может заменить учебник. Его необходимо рассматривать в качестве эффективного подсобного материала, направленного на лучшее усвоение, систематизацию и обобщение знаний основ курса при небольших затратах времени на концентрацию. Иначе, как исповедует автор, приводятся данные, необходимые для творческого практического использования студентами на всю их долголетнюю инженерную практику.

Пособие может применяться на всех этапах изучения предмета: при решении задач на семинарских занятиях, выполнении расчётно-проектных и лабораторных работ, при подготовке к рубежным контролям и к заключительному контролю.

Особое значение оно приобретает для самостоятельной реанимации знаний по основам прочности конструкций студентами старших курсов при выполнении курсового и дипломного проектирования непосредственно по специальности.

Пособие может быть использовано также преподавателями путём внедрения тех или иных предлагаемых компонентов дидактического сопровождения в виде наглядных пособий, цветного мела и т.д.

Синхронность цвета и общедоступных наглядных, в известной мере экзотических, пособий побуждает у слушателей ясность и вос требуемость предмета, включает неотъемлемую моторную память, сопровождается копированием текста цветными фломастерами и использованием цифровых фотоаппаратов.

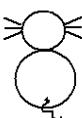
тов для фиксации как всего изложенного на доске материала, так и его отдельных фрагментов. Это происходит в конце лекции при ответе на вопросы. При этом автор, как правило, размещает весь материал лекции компактно на четырёх полотнах доски.

Каждый слушатель имеет возможность потрогать, покрутить, прокомментировать с соседом каждое наглядное пособие, задать вопрос лектору. Тем более что, например, турбинную лопатку и медно-никелевую трубку подогревателя (конденсатора) они, к сожалению, более нигде не видят, кроме производства.

Пособия и макеты передаются друг другу непосредственно на лекции.

При появлении неизбежных вопросов типа «Зачем отверстия в турбинной лопатке?» они сразу же комментируются и разумно гасятся. В частности, обвязанные через отверстия бандажной проволокой лопатки турбин приобретают жёсткость умело связанного веника, что увеличивает приведённую механическую жёсткость всего фрагмента и препятствует возникновению недопустимо больших вибраций лопаточного аппарата, а следовательно, и конструкции турбины в целом.

Помимо этого, автор использует лаконичные обозначения оптимальности того или иного инженерного решения, которые одновременно служат и хорошей психологической разрядкой:

-  – оптимальное решение проблемы;
-  – удовлетворительное, но не оптимальное решение проблемы;
-  – неудачное решение проблемы;
-  – решение проблемы на кромке Уголовного кодекса России – «По неосторожности...»;
-  – удача в решении проблемы отвернулась от нас – «Не ловим мышей».

Приём использования цветного мела при долголетней практике доведён до автоматизма со сквозным синхронизированием цвета от первого до последнего занятия (лекция, семинар, лаборатория):

- расчётная схема и внешние силы – белые,
- координатные оси – жёлтые,
- реакции в связях – синие,
- реактивные моменты в связях – зелёные,
- внутренние силы – оранжевые,
- внутренние моменты – розовые.

Ограничность радуги сочных цветов мела определяет повтор, но логически воспринимаемый аудиторией:

- деформации – жёлтый,
- касательные напряжения – оранжевый,
- нормальные растягивающие напряжения – красный,
- нормальные сжимающие напряжения – синий,
- нейтральная линия (стык растянутых и сжатых волокон) – жёлтый цвет «измены» знака с плюса на минус и наоборот,
- опасные сечения в расчётных схемах – кроваво-красные.

«Заводные», в смысле заводящие аудиторию, игрушки – это подручные пособия, помогающие восприятию аудиторией излагаемого материала. Эти наглядные пособия востребованы и дополняют основы теоретического изложения.

В заключение отметим, что по аналогичному принципу лектором построены электронные лекции по дисциплине «Прикладная механика» (выставлены на сайте кафедры ТиПМ: <http://tipm.ispu.ru/index.php/metodmat/sopr/104-lect>).

Приводятся фрагменты используемых автором учебно-методических приёмов по обозначенной теме, сопровождающие опорный конспект по краткому курсу прикладной механики, который изучается студентами всех специальностей инженерного профиля. Дидактический материал ориентирован на слушателей теплоэнергетических специальностей.

Каждый фрагмент опорного конспекта иллюстрирует основополагающие расчётные соотношения, которые используются при оценке прочности и определении перемещений для всех изучаемых в пределах краткого курса видов сопротивлений. Используемые на лекциях дидактические материалы сопровождаются отмеченные фрагменты и способствуют, как полагает автор, формированию долговременной памяти.

Пособие успешно может быть рекомендовано к использованию в последующей инженерной практике.

Автор отошёл от традиционной модели построения материала. В тексте отсутствуют как нумерация рисунков, так и формул. Сам процесс сканирования слушателями небольшой рукописи до нужного материала является познавательно-полезным исходя из дихатомического принципа: «То – не То».

Автор готов к возможной дискуссии по форме и содержанию работы и после долгих колебаний пришёл в первом приближении к решению, которое выносится на обсуждение аудитории. Автор был бы признателен за отзывы, замечания и предложения, особенно со стороны главного потребителя – студенческой аудитории.

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры Т и ПМ: ведущему инженеру Г.Н. Черновой за построение общей композиции материала, старшему преподавателю З.В. Зарубину и инженеру А.Е. Лядовой за фотомонтаж, доценту М.А. Ноздрину, а также председателю ЦМК ЭМФ доценту Н.А. Морозову за полезные замечания и предложения, высказанные по сигнальному экземпляру рукописи.

Автор

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Второе издание пособия содержит краткие тесты по эпюорной технике при прямом изгибе и расчёты на прочность для простых видов сопротивлений. Приведены ответы. Переиздание с цветными иллюстрациями стало возможным благодаря спонсорской финансовой поддержке предприятия ООО «Мосэнергомонтаж», генерального директора М.И. Эпштейна, выпускника ИЭИ, ТЭФ – 1963 г.

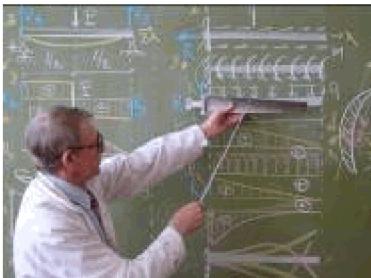
ОПОРНЫЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1. РЕАЛЬНЫЙ ОБЪЕКТ И РАСЧЁТНАЯ СХЕМА

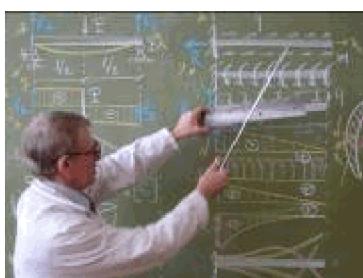
Как и во всякой отрасли естествознания, исследование вопроса о прочности, жёсткости, устойчивости и надёжности реального объекта начинается с выбора *расчётной схемы*.

Расчётная схема – это реальный объект, освобождённый от несущественных особенностей. Для одного и того же объекта может быть предложено несколько расчётных схем, в первую очередь в зависимости от требуемой точности и от того, какая сторона явления интересует исследователя в данном конкретном случае.

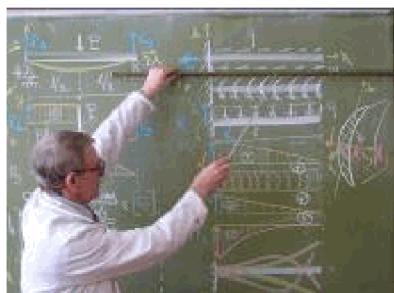
Иллюстрация реальных объектов и расчётных схем



Реальный объект – турбинная лопатка цилиндра среднего давления (ЦСД) энергоблока 300 МВт



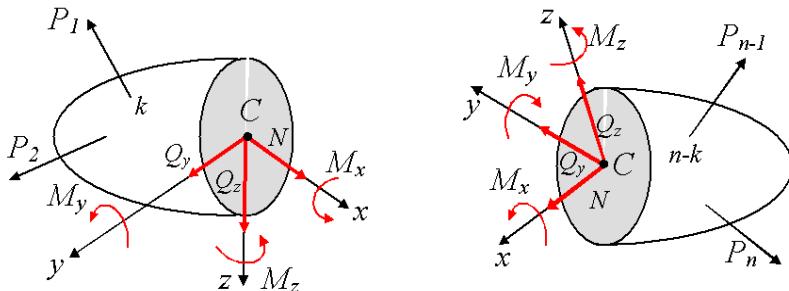
Расчётная схема объекта встыке с диском при работе на растяжение от действия центробежных сил, крутящей и изгибающей нагрузки сил парового давления и при рабочих температурах



Реальный объект – трубка бойлерной установки (подогревателя, конденсатора) при жёсткой заделке в трубные решётки с обоих торцов

2. ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ И ОСНОВНЫЕ ВИДЫ НАГРУЖЕНИЯ–СОПРОТИВЛЕНИЯ

Метод сечений представлен на рисунке ниже.



N – продольная сила



$Q_z(Q_y)$ – поперечные силы



$M_y(M_z)$ – внутренние изгибающие моменты



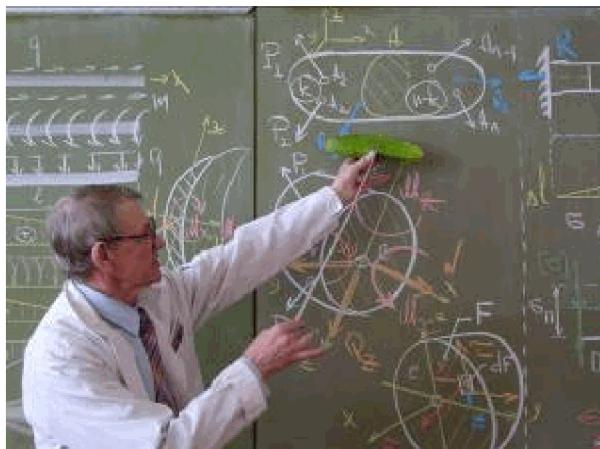
M_x – внутренний крутящий момент



Определение усилий из уравнений равновесия «отсечённой» части:

1. $\sum_{i=1}^k P_{ix} = N + P_{1x} + P_{2x} + \dots + P_{kx} = 0 \rightarrow N.$
2. $\sum_{i=1}^k P_{iy} = Q_y + P_{1y} + P_{2y} + \dots + P_{ky} = 0 \rightarrow Q_y.$
3. $\sum_{i=1}^k P_{iz} = Q_z + P_{1z} + P_{2z} + \dots + P_{kz} = 0 \rightarrow Q_z.$
4. $\sum_{i=1}^k M_x(P_i) = M_x + M_x(P_i) + \dots + M_x(P_k) = 0 \rightarrow M_x.$
5. $\sum_{i=1}^k M_y(P_i) = M_y + M_y(P_i) + \dots + M_y(P_k) = 0 \rightarrow M_y.$
6. $\sum_{i=1}^k M_z(P_i) = M_z + M_z(P_i) + \dots + M_z(P_k) = 0 \rightarrow M_z.$

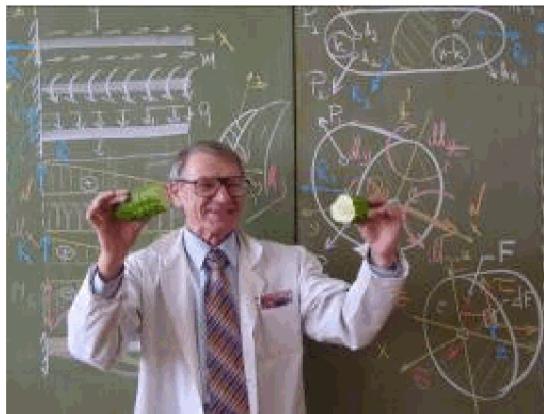
Иллюстрация метода сечений



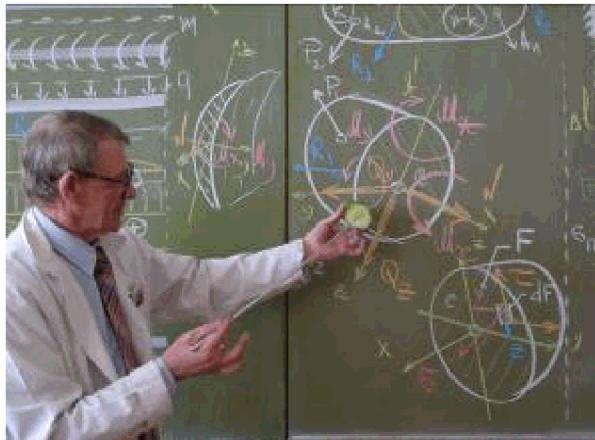
Определение внутренних усилий в нагруженном объекте
Пособие – огурец



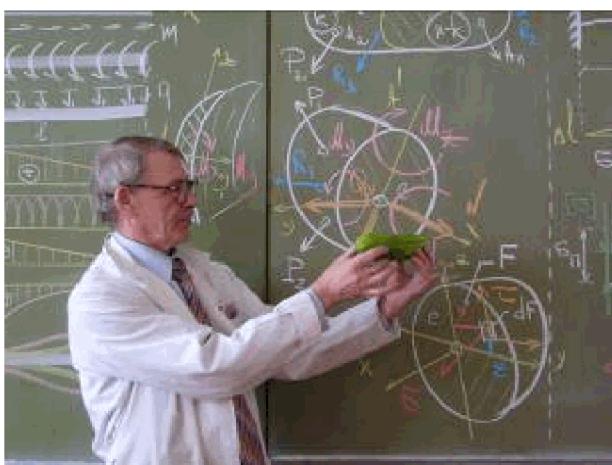
Участие слушателей в эксперименте
Пособие – растянутая резиновая гимнастическая лента.
Фаза – разделение конструкции на две части



«Отсеченные» левая и правая части



Демонстрация регулярного хаоса внутренних усилий (*семечки*)



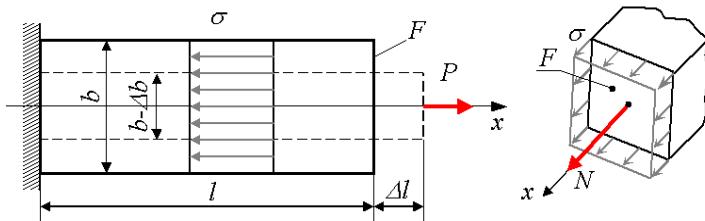
«Мысленное» соединение «отсечённых» частей*

Метод сечений универсален для обеих частей: «Крокодил имеет одинаковые размеры от пасти до хвоста, и наоборот».

* Пособие огурец делится на части и смачно съедается первопартниками. ☺

3. ЦЕНТРАЛЬНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО СТЕРЖНЯ

Расчётная схема центрального растяжения–сжатия представлена на рисунке.



Условие прочности: $\sigma_{\max} = \left(\frac{N}{F} \right)_{\max} \leq [\sigma]$.

Интегральная связь: $N = \int_F \sigma dF$.

Закон Гука: $\sigma = \varepsilon \cdot E$, где E – модуль Юнга.

Абсолютное удлинение: $\Delta l = \int_l \frac{N(x)dx}{EF}$.

Относительные деформации:

– продольная: $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$;

– поперечная: $\varepsilon' = \frac{\Delta b}{b}$.

Закон Пуассона: $\varepsilon' = -\mu \varepsilon$.

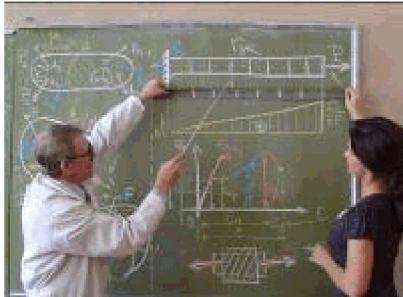
- Пределы коэффициента Пуассона: $0 \leq \mu \leq 0,5$.
- Особые материалы: пробка – $\mu = 0$, каучук – $\mu = 0,5$.

Потенциальная энергия: $U = \int_l \frac{N^2(x)dx}{2EF}$.

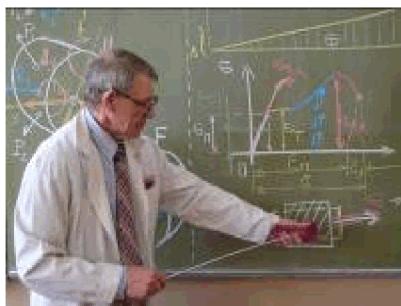
Иллюстрация деформации при растяжении–сжатии



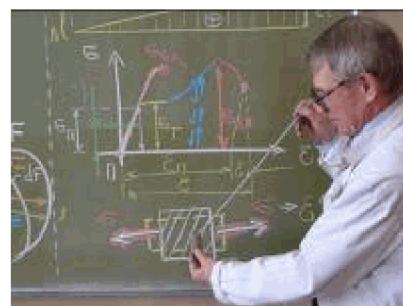
Исходное состояние гимнастической ленты с метками



Состояние под нагрузкой. Перемещение меток ленты за силой и визуальное наблюдение продольного удлинения



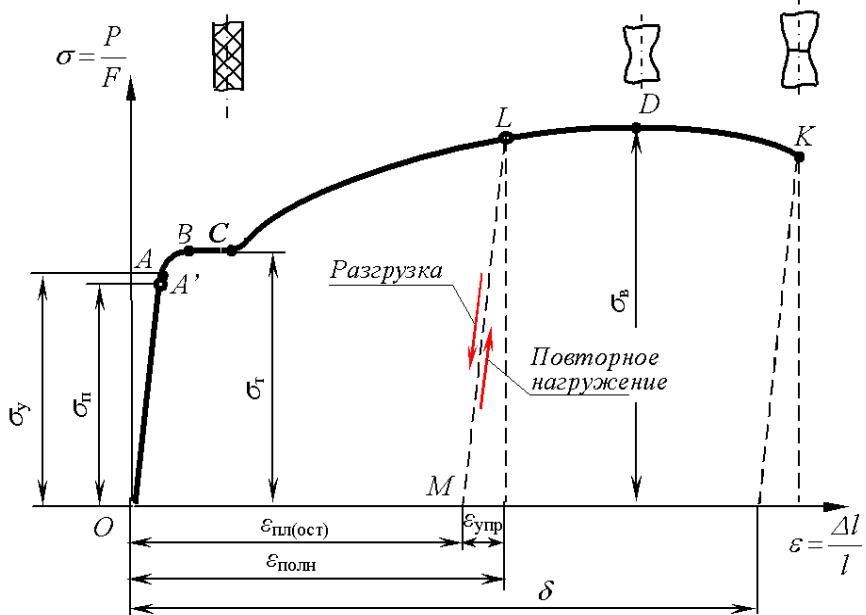
Каучук – $\mu=0,5$, $\varepsilon'= -0,5\varepsilon$.
Наблюдаются значительные продольная и поперечные деформации при сжатии каучукового параллелепипеда



Пробка – $\mu=0$, $\varepsilon'=0$.
Нет поперечной деформации при сжатии штопором пробки у стеклянной ёмкости с напитком.
Поэтому горлышко ёмкости остаётся целым и невредимым ☺

4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

Диаграмма растяжения малоуглеродистой стали



Предел прочности материала: $\sigma_s = \frac{P_{\text{пред}}}{F}$.

Предел текучести материала: $\sigma_T = \frac{P_T}{F}$.

Предел упругости материала: $\sigma_y = \frac{P_y}{F}$.

Предел пропорциональности материала: $\sigma_\pi = \frac{P_\pi}{F}$.

Допускаемое напряжение: $[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{[n]}$.

δ – относительное остаточное удлинение.

$$\varepsilon_{\text{полная}} = \varepsilon_{\text{упругая}} + \varepsilon_{\text{пластическая (остаточная)}}.$$

$$\sigma_{\text{нред}} = \begin{cases} \sigma_{\text{T}} - \text{для пластичных материалов,} \\ \sigma_{\text{B}} - \text{для хрупких материалов.} \end{cases}$$

Нормативный коэффициент запаса прочности $[n]$:

- для пластичных высокооднородных материалов (сталь, сплавы алюминия, титана, магния и меди) – 1,5 … 2,5;
- для хрупких (чугун) – 3 … 6.

Ориентировочные значения допускаемых напряжений на растяжение $[\sigma]_p$, МПа:

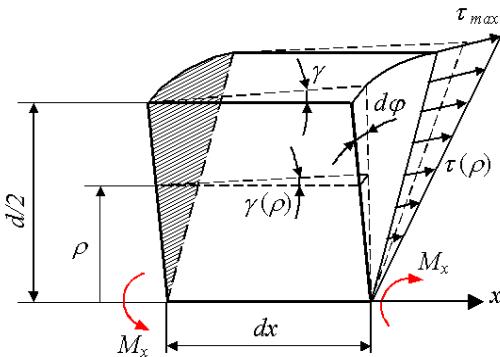
- стали углеродистые – 140 … 250;
- стали легированные – 100 … 400;
- бронза – 60 … 120;
- латунь – 70 … 140;
- дюралюминий – 80 … 150;
- чугун – 30 … 80;
- сосна (вдоль волокон) – 10.

Ориентированно модуль Юнга E , МПа:

дерево – 10^4	чугун – $1,2 \cdot 10^5$
бетон – $2 \cdot 10^4$	сталь – $2 \cdot 10^5$
дюраль – $7 \cdot 10^4$	алмаз – $10,5 \cdot 10^4$
медь – 10^5	лёд – 10^4

5. КРУЧЕНИЕ КРУГЛЫХ ВАЛОВ

Модель напряжённо-деформированного состояния приведена ниже.



$$\text{Угол сдвига: } \gamma = \rho \frac{d\varphi}{dx}.$$

Закон Гука для сдвига: $\tau = \gamma G$, где G – модуль сдвига.

$$\text{Распределение касательных напряжений: } \tau(\rho) = \frac{M_x}{J_0} \rho.$$

$$\text{Условие прочности при кручении: } \tau_{\max} = \frac{M_{x\max}}{W_0} \leq [\tau].$$

$$\text{Интегральная связь: } M_x = \int_F \tau \rho dF.$$

Геометрические характеристики:

- полярный момент итерации: $J_0 = \int_F \rho^2 dF,$

- полярный момент сопротивления: $W_0 = \frac{J_0}{d/2}.$

Для круглого вала: $J_0 = \frac{\pi d^4}{32} \approx 0,1d^4; W_0 = \frac{\pi d^3}{16} \approx 0,2d^3.$

Для полого вала с соотношением диаметров D/d :

$$J_0 = \frac{\pi D^4}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right], \quad W_0 = \frac{\pi D^3}{16} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right].$$

Углы закручивания:

- абсолютный: $\phi = \int_l \frac{M_x(x)}{GJ_0} dx,$
- относительный: $\theta = \frac{M_x}{GJ_0}.$

Два условия при расчёте диаметров валов:

- из условия прочности: $\tau_{\max} = \frac{M_{x\max}}{W_0} \leq [\tau]$, откуда

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16M_{x\max}}{\pi[\tau]}};$$
- из условия жёсткости: $\theta_{\max} = \frac{M_{x\max}}{GJ_0} \leq [\theta]$, откуда

$$d \geq \sqrt[4]{\frac{32M_{x\max}}{\pi G[\theta]}}.$$

Допустимые значения:

касательных напряжений: $[\tau] = \begin{cases} (0,55 \dots 0,60)[\sigma_p] & \text{для стали,} \\ (1,0 \dots 1,2)[\sigma_p] & \text{для чугуна,} \end{cases}$

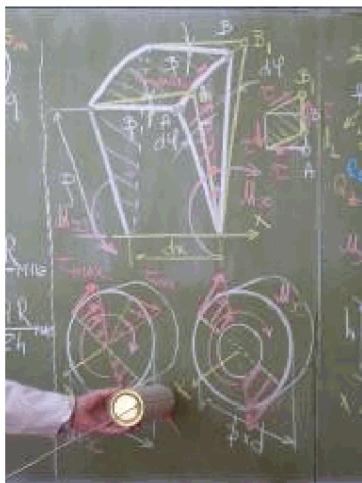
относительных углов закручивания $[\theta] = 0,2 \dots 1,0 \text{ град/м.}$

Потенциальная энергия: $U = \int_l \frac{M_x^2}{2GJ_0} dx.$

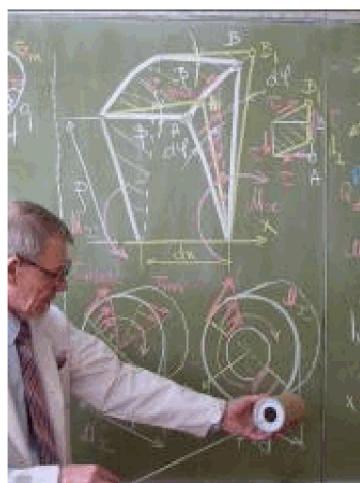
Ориентировочно модуль сдвига G , МПа:

дерево – $0,05 \cdot 10^4$	чугун – $5,5 \cdot 10^4$
диоралюминий – $2,7 \cdot 10^4$	сталь – $8 \cdot 10^4$
медь – $4 \cdot 10^4$	лёд – $0,3 \cdot 10^4$

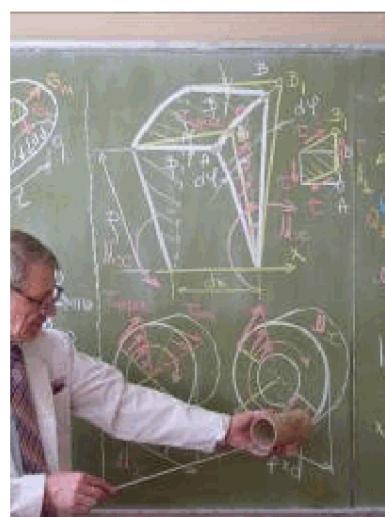
Иллюстрация деформации кручения



Напряженное состояние в попечном сечении скрученного сплошного вала (упаковка от конька Арманьяк, Франция ☺)



Имитация напряжённого состояния скрученного вала турбины с отверстием (катушка от кабеля)

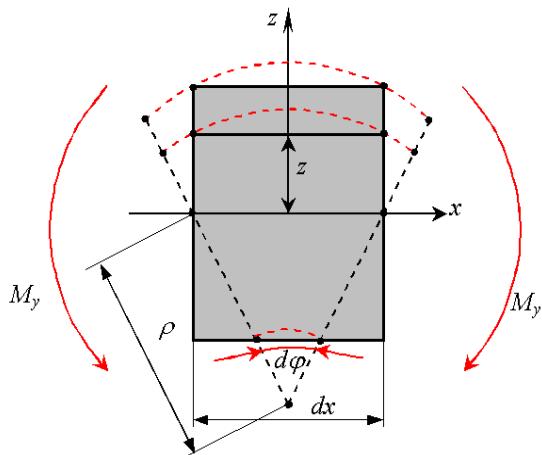


Имитация напряжённого состояния скрученного паропровода (упаковка от конька Арманьяк без крышки ☺) – тонкостенная конструкция

6. ПЛОСКИЙ ПРЯМОЙ ИЗГИБ

6.1. Нормальные напряжения и расчёт на прочность

Модель деформированного состояния



Н о р м а л ь н ы е н а п р я ж е н и я .

$$\text{Кривизна продольной оси балки: } \frac{1}{\rho} = \frac{M_y}{EJ_y}.$$

$$\text{Распределение нормальных напряжений: } \sigma = \frac{M_y}{J_y} z.$$

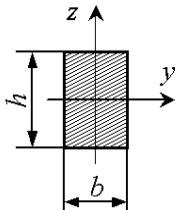
У с л о в и е п р о ч н о с т и :

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{y\max}}{J_y} z_{\max} = \frac{M_{y\max}}{W_y} \leq [\sigma].$$

$$\text{Осевой момент сопротивления: } W_y = \frac{J_y}{z_{\max}}.$$

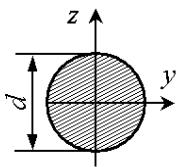
$$\text{Интегральная связь: } M_y(x) = \int_F \sigma z dF.$$

Геометрические характеристики:

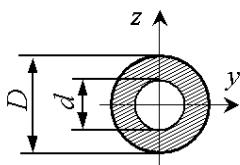


$$J_y = \frac{bh^3}{12}; W_y = \frac{bh^2}{6};$$

$$J_z = \frac{hb^3}{12}; W_z = \frac{hb^2}{6}.$$



$$J_y = J_z = \frac{\pi d^4}{64}; W_y = W_z = \frac{\pi d^3}{32}.$$



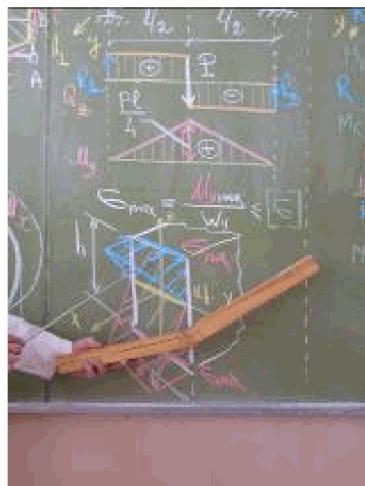
$$J_y = \frac{\pi D^4}{64} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]; W_y = \frac{\pi D^3}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right].$$

Оптимальные стандартные поперечные сечения балок при прямом изгибе: двутавр и швеллер (см. прил.3).

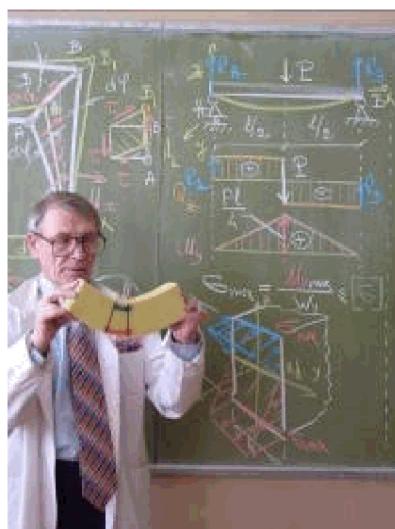
Иллюстрация напряжённого и деформированного состояния при прямом изгибе



Изгиб и разрушение двухопорной деревянной балки

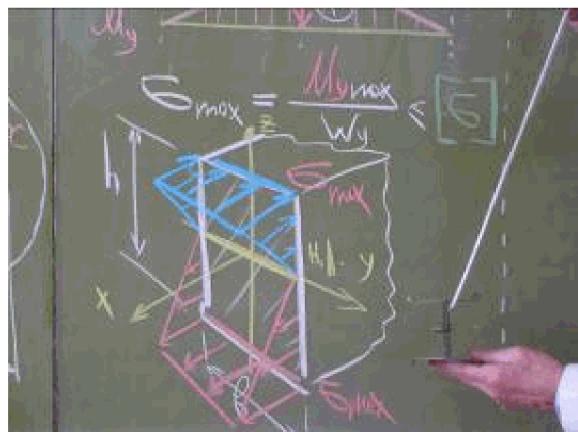


Распределение сжатых (вверху) и растянутых (внизу) волокон в деревянной балке

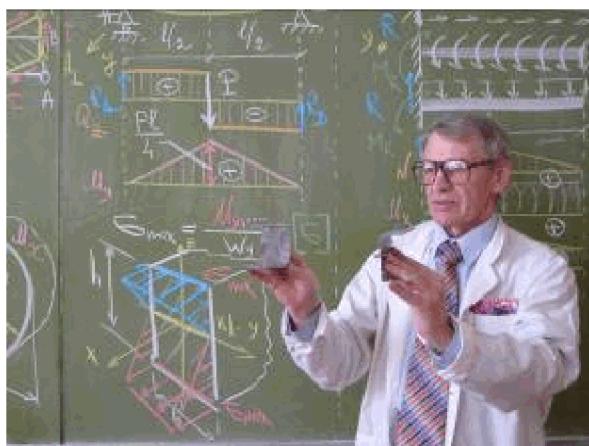


Пример сжатия верхних волокон и растяжения нижних.
В центре – нейтральный слой. Пособие – губка

Иллюстрация оптимального поперечного сечения балки при прямом изгибе



Сечение двутавр (имитатор)^{*}



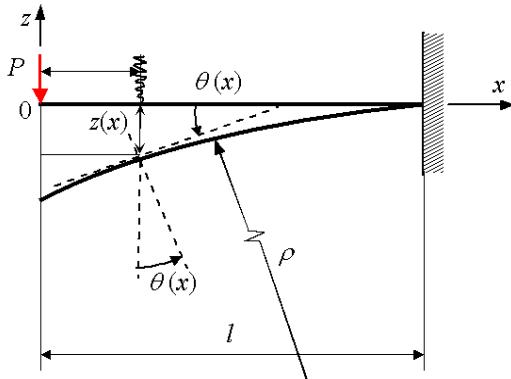
Сечение швеллер (имитатор)^{*}

Соединение двумя болтами переводит модели двух швеллеров в модель двутавра на глазах у аудитории.

* Пособия—имитаторы — куски коробов.

6.2. Определение перемещений и расчёт на жёсткость

Расчётная схема прямого изгиба показана ниже.



Перемещения:

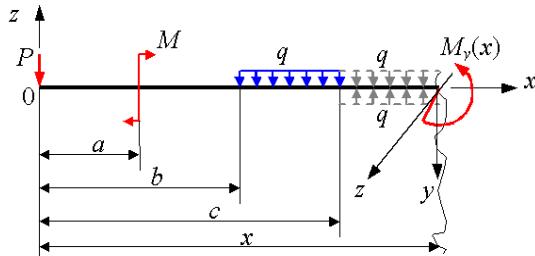
- прогиб $z(x)$,
- угол поворота $\theta(x) = \frac{dz(x)}{dx}$.

Дифференциальное уравнение изогнутой оси балки:

- $EJ_y z''(x) = M_y(x)$,
- для углов поворота: $EJ_y z'(x) = \int M_y(x) dx + C$,
- для прогибов: $EJ_y z(x) = \int \left[\int M_y(x) dx + C \right] dx + D$.

Постоянные интегрирования C и D определяются из граничных условий опирания балки: равенство нулю прогиба и угла поворота в жёсткой заделке и прогибов при шарнирном опирании.

Универсальное дифференциальное уравнение изогнутой оси балки по методу Бубнова:



$$EJ_y z''(x) = M_y(x) = \begin{cases} -Px & x > 0 \\ M & x > a \\ M(x-a)^0 & x > b \\ q \frac{(x-b)^2}{2} & x > c \\ q \frac{(x-c)^2}{2} & \end{cases}$$

$$EJ_y z'(x) = \begin{cases} -P \frac{x^2}{2} & x > 0 \\ M(x-a)^1 & x > a \\ q \frac{(x-b)^3}{6} & x > b \\ q \frac{(x-c)^3}{6} & x > c \\ c & \end{cases} + c$$

$$EJ_y z(x) = \begin{cases} -P \frac{x^3}{6} & x > 0 \\ M \frac{(x-a)^2}{2} & x > a \\ q \frac{(x-b)^4}{24} & x > b \\ q \frac{(x-c)^4}{24} & x > c \\ cx + D & \end{cases}$$

Дифференциальные зависимости (связи) компонентов перемещений и усилий:

$$\frac{dz(x)}{dx} = \theta(x);$$

$$\frac{d\theta(x)}{dx} \equiv \frac{d^2 z(x)}{dx^2} = \frac{M_y(x)}{EJ_y};$$

$$\frac{dM_y(x)}{dx} = Q_z(x).$$

Условие жёсткости: $z_{max} \leq \left[\frac{l}{250} \div \frac{l}{500} \right]$, где l – длина пролёта.

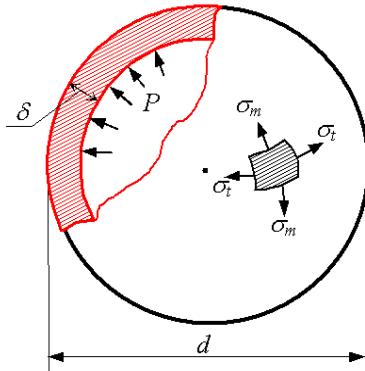
Потенциальная энергия при чистом изгибе:

$$U = \int_l \frac{M_y^2(x) dx}{2EJ_y} .$$

7. РАСЧЁТ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК

Уравнение Лапласа: $\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_t}{\rho_t} = \frac{P}{\delta}$.

Сфери ческая оболочка $\rho_m = \rho_t = \frac{d}{2}$.



Равенство меридионального σ_m и окружного σ_t напряжений:

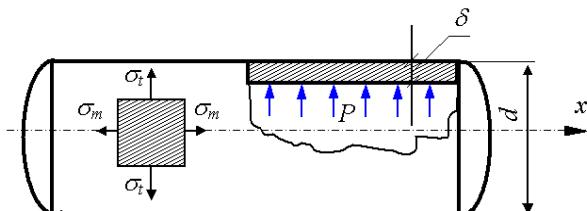
$$\sigma_m = \sigma_t = \frac{Pd}{4\delta}.$$

Эквивалентное напряжение:

$$\sigma_{экв}^{III} = \frac{Pd}{4\delta}.$$

Цилиндрическая оболочка: $\rho_m = \infty; \rho_t = \frac{d}{2}$.

Соответственно



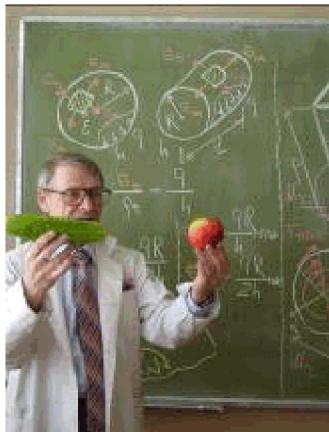
$$\sigma_m = \frac{Pd}{4\delta},$$

$$\sigma_t = \frac{Pd}{2\delta},$$

$$\sigma_{экв}^{III} = \frac{Pd}{2\delta}.$$

Условие прочности: $\sigma_{экв} \leq [\sigma]$.

Иллюстрация расчётов тонкостенных оболочек и быстровращающихся дисков



Постановка задачи



Тонкая стенка (скорлупа кокоса ☺)

Вопрос к аудитории:

Почему яблоко сферическое, а огурец эллиптический–цилиндрический?

????????????????!!!!!!! ☺, но...

Ответ аудитории:

Так как яблоко – фрукт, растёт на дереве, огурец – овощ и стелется по земле. ☺

Вопрос из аудитории:

А почему арбуз сферический?

Ответ лектора, надо сказать, малоубедительный ☺:

Так как арбуз это не фрукт и не овощ, а ЯГОДА, но большая и тяжёлая в отличие от чёрной смородины. Поэтому в своё время и упокоилась на земле. ☺

Вывод:

СФЕРА ПРОЧНЕЕ ЦИЛИНДРА.

Пользуйтесь чайниками в форме полусфера! ☺

Используются огурец, яблоко и скорлупа от кокоса.

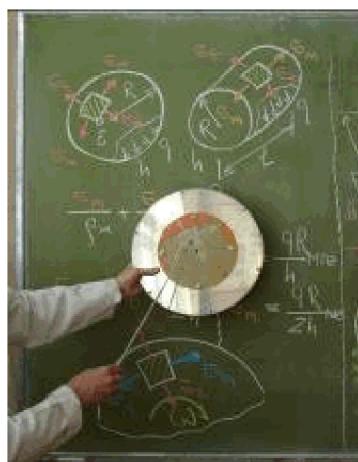
Смачно съедаются «камчатниками» с просьбой добавки. ☺



Сфериическая оболочка (баскетбольный мяч или сферический–дефицитный Ⓢ шарик)



Эллиптический или цилиндрический шарик



Быстро врачающийся диск турбины
(дисковод от студийного магнитофона 70-х годов)

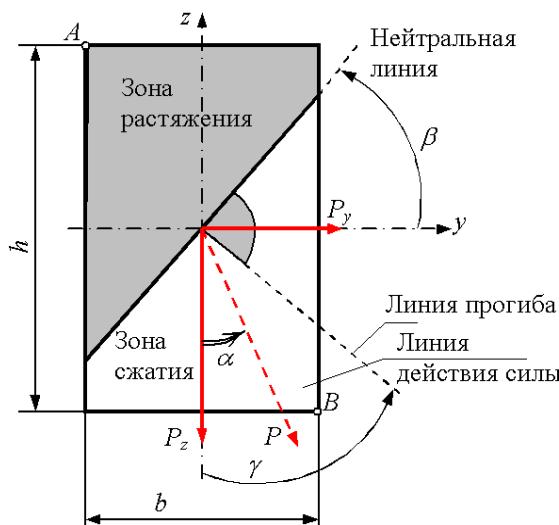
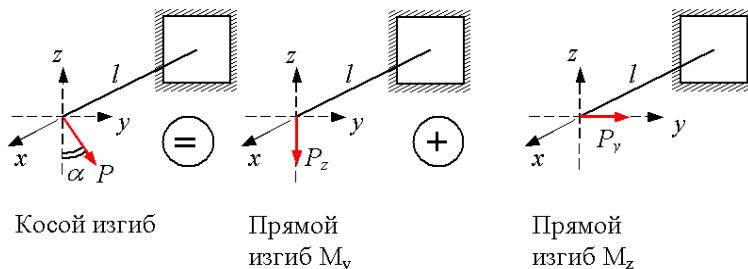
Лекция читается обычно под Новый год – заключительная. Все надувают заранее купленные шарики и с шариками покидают аудиторию. Мини-праздник.

Ученье – свет. Ученье – труд. Ученье – радость познания нового и его практическое инженерное приложение.

8. НЕКОТРЫЕ ВИДЫ СЛОЖНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

8.1. Косой изгиб

Косой изгиб – это сумма двух прямых изгибов.



Угол наклона нейтральной линии:

$$\beta = \arctg \left[\frac{J_y}{J_z} \operatorname{tg} \alpha \right]; \quad \beta \neq \alpha.$$

След плоскости прогиба, как и в прямом изгибе, перпендикулярен нейтральной линии:

$$\gamma = \beta.$$

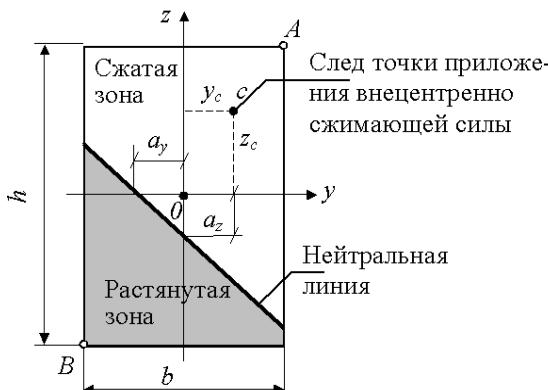
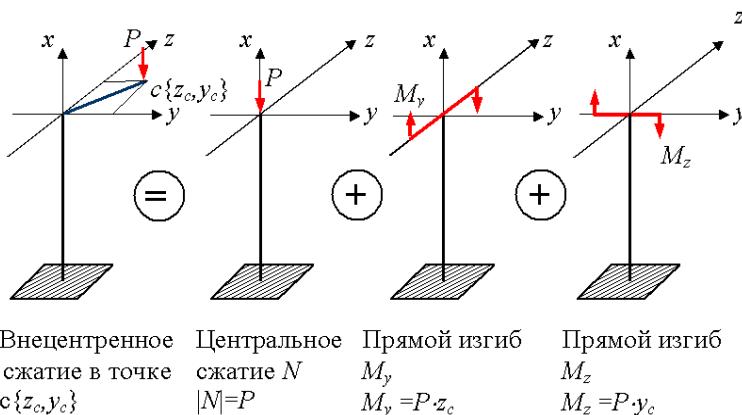
Условие прочности:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_y}{W_y} + \frac{M_z}{W_z} \leq [\sigma].$$

Опасные точки A и B определяются как наиболее удалённые от нейтральной линии. Для хрупких материалов при любых конфигурациях поперечных сечений расчет выполняется по допускаемым напряжениям как на растяжение, так и на сжатие.

8.2. Внеклассическое сжатие–растяжение

Внекентренное сжатие–растяжение – сумма центрального сжатия и двух прямых изгибов:



Уравнение нейтральной линии:

$$1 + \frac{z_c z}{i_y^2} + \frac{y_c y}{i_z^2} = 0.$$

Радиусы инерции: $i_y = \sqrt{\frac{J_y}{F}}$, $i_z = \sqrt{\frac{J_z}{F}}$.

Отрезки, отсекаемые нейтральной линией на координатных осях:

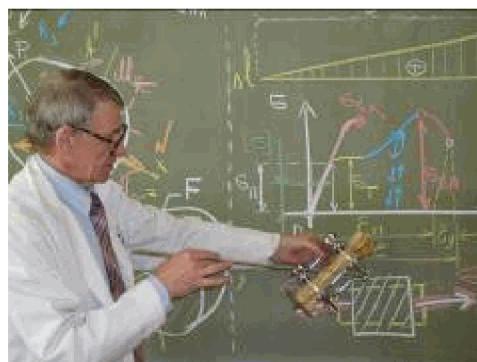
$$a_y = -\frac{i_z^2}{y_c}; \quad a_z = -\frac{i_z^2}{z_c}.$$

Условие прочности:

$$\sigma_{\max} = -\frac{P}{F} - \frac{M_y}{W_y} - \frac{M_z}{W_z} \leq [\sigma].$$

Для хрупких материалов оценка прочности проводится как в зоне максимальных сжимающих – точка *A*, так и в зоне растягивающих – точка *B* напряжений по $[\sigma]_c$ и $[\sigma]_p$.

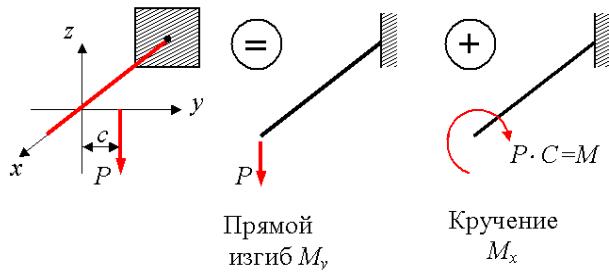
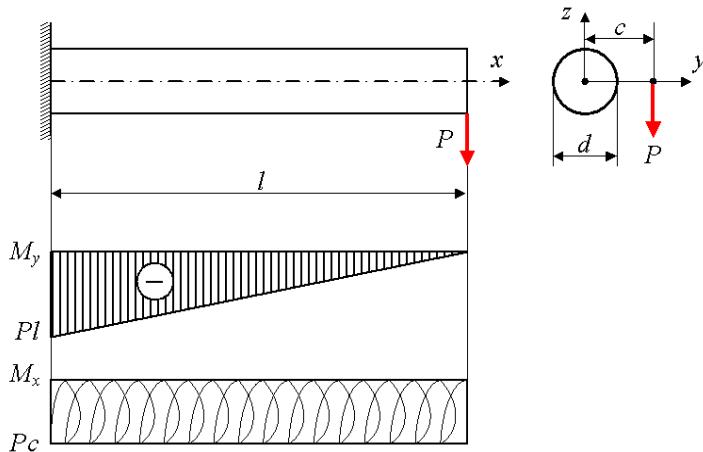
**Иллюстрация возможности появления эффекта
внекентренности сжатия и растяжения в аппарате
Илизарова для срачивания или наращивания костной ткани**



Проблемная задача сохранения центральности сжатия (растяжения) в аппарате Илизарова как первый фактор выздоровления человека

8.3. Изгиб с кручением вала круглого сечения

Расчётная схема на изгиб с кручением вала круглого сечения представлена ниже.

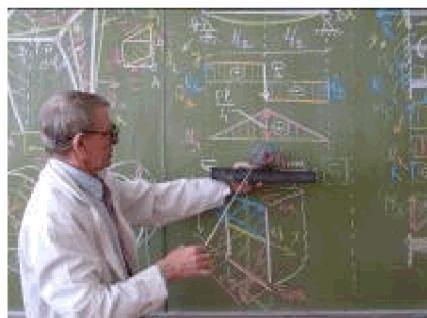


Условия прочности:

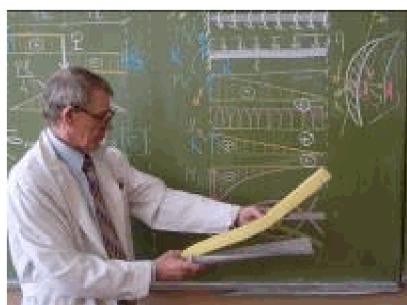
$$\sigma_{\text{экв}}^{III} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma] \text{ -- по 3-й гипотезе прочности.}$$

$$\sigma_{\text{экв}}^{IV} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq [\sigma] \text{ -- по 4-й гипотезе прочности.}$$

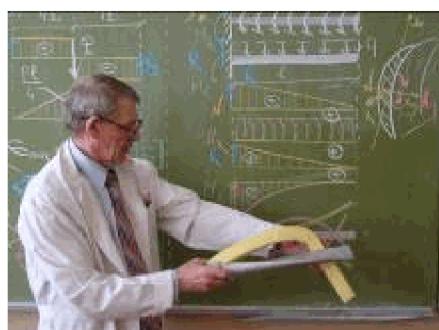
9. ДИДАКТИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРОБЛЕМ ВИБРОДИАГНОСТИКИ КОНСТРУКЦИЙ



Макет двигателя на упругом основании с несбалансированным ротором
(каучуковая балка с натурным двигателем постоянного тока)



Первая форма колебаний турбинной лопатки



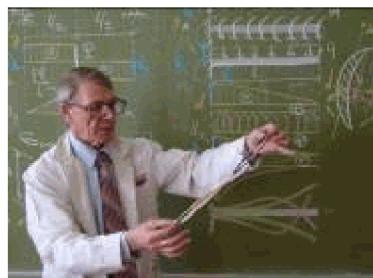
Вторая и другие формы колебаний турбинной лопатки

10. ДИДАКТИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРОБЛЕМ ВИБРАЦИОННОЙ БИОМЕХАНИКИ

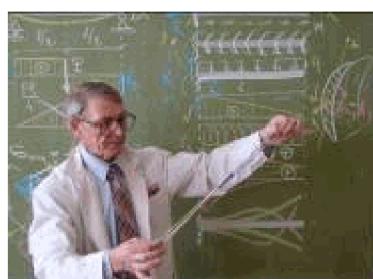
**Проблемная задача полезного использования вибрации
для вибродиагностики мышечно-сухожильного комплекса
(МСК)^{*} голени человека**

Студенты являются первыми слушателями автора всяких бредово-небредовых идей в науке, технике и в образовании.

Ниже приведено объяснение принципа виброрезонансной диагностики ахиллова сухожилия опорно-двигательного аппарата человека. Патент на метод виброрезонансной диагностики не имеет аналогов.

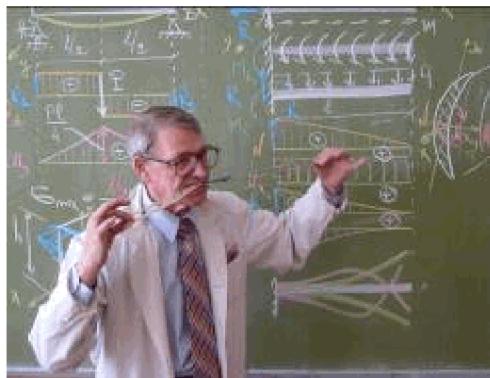


Модель МСК при сгибании стопы. Носок голеностопа вниз – разгруженное состояние МСК



Модель МСК при разгибании стопы. Носок голеностопа вверх – продольная сила растяжения мышцы и сухожилия достигает 20 кг

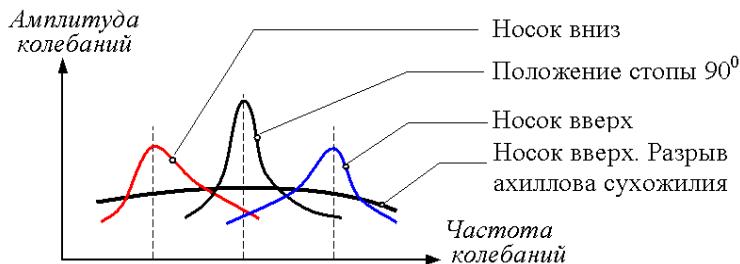
* Материалы для моделирования МСК – пружина (мышца) в связке с лавсановой операционной лентой – ахиллово сухожилие.



Модель МСК приводится в колебательное резонансное состояние.
Частота колебаний – индикатор состояния МСК

При разрыве сухожилия происходят существенные изменения в спектре собственных частот колебаний МСК.

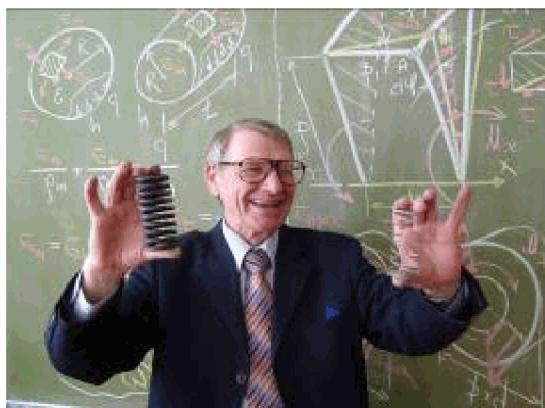
Предварительно лектор просит всех пощупать свои ахилловы сухожилия и оценить осевой натяг МСК при вариации положения носка стопы.



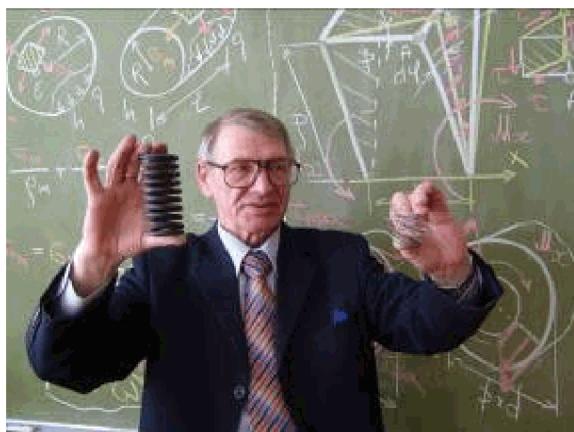
Амплитудно-частотные характеристики МСК при различных положениях стопы и его дефектного состояния

11. ДИДАКТИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ФРАГМЕНТОВ ОСНОВ КОНСТРУИРОВАНИЯ В ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКЕ

Иллюстрация понятия жёсткости и податливости
на примере сжатия двух цилиндрических пружин
разных размеров

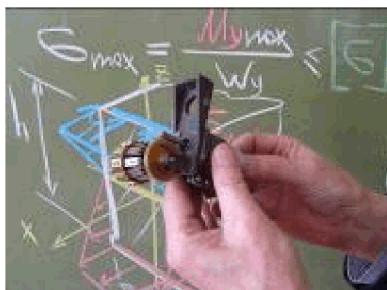


Исходное состояние



Деформированное состояние
😊

Механизмы–иллюстраторы^{*}



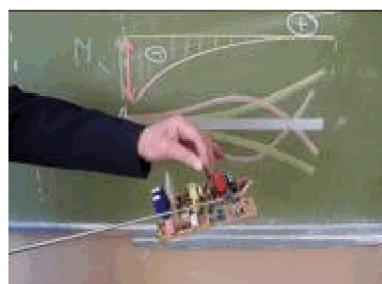
Червячная передача с приводом
ротора микродвигателя
от руки



Коническая передача



Цилиндрическая передача



Фрагмент платы с электронной
начинкой и проблемой усталостной
прочности и надёжности тоководов
при вибрационной нагрузке

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автор выражает надежду, что пособие поможет студентам сконцентрироваться перед сдачей соответствующих промежуточных и итогового контролей по курсу, а иллюстрированные основы прочности и жесткости конструкций будут востребованы в инженерной практике в виде долговременной памяти.

* Пускаются по рядам слушателей.

Рекомендуемая литература

Электронные лекции

Прикладная механика – В.И. Шапин

<http://tipm.ispu.ru/index.php/metodmat/sopr/104-lect>

Учебники

1. Беляев М.Н. Сопротивление материалов: Учебник для вузов. –М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1976.– 608 с.

Книга имеет целью не только дать теоретический материал, но и показать применение полученных результатов на примерах. Материал книги может быть использован для самостоятельной домашней работы. Поэтому каждый раздел сопровождается задачами. По этому учебнику учились многие поколения отечественных инженеров, в том числе и автор этого пособия. Учебник остается отличным пособием для дальнейшего инженерного самообразования при познании проблем прочности за контуром изложенного в пособии материала.

2. Бернштейн С.А. Сопротивление материалов: Учебник для вузов. –М.: Высш. шк., 1961.– 464 с.

В небольшой по объему книге изложены все основные вопросы сопротивления материалов. Для облегчения освоения теоретического материала и привития навыков в решении практических задач приведено около 100 примеров. Каждая глава завершается контрольными вопросами, особенно полезными при самостоятельном изучении предмета.

3. Кинасошвили Р.С. Сопротивление материалов: Краткий учебник. –11-е изд. –М.:Наука. Гл. ред. физ.- мат. лит., 1975.– 384 с.

В книге проанализировано много примеров для облегчения усвоения теоретического материала и привития навыков в решении практических задач. Каждая глава завершается контрольными вопросами, особенно полезными для лиц, самостоятельно изучающих предмет.

Автору удалось в сжатой и ясной форме изложить материал, соответствующий программам немашиностроительных вузов всех специальностей.

4. Стёпин П.А. Сопротивление материалов: Учебник для немашиностроительных спец. вузов. – 8-е изд. –М.: Высш. шк., 1988.–367 с.

В учебнике изложены основы сопротивления материалов в соответствии с программой курса в объеме 80÷120 часов.

5. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. В 2 т.–М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985.

Том 1. Элементарная теория и задачи.

Том 2. Более сложные вопросы теории и задачи.

Учебник выдающегося ученого и педагога Степана Прокофьевича Тимошенко, внесшего огромный вклад в науку о сопротивлении материалов. Учебник является образцом классического изложения науки о прочности. Им пользуются уже многие поколения студентов и инженеров.

6. Федосьев В.И. Сопротивление материалов: Учебник для вузов.– 9-е изд., перераб. –М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. –512 с.

Книга соответствует традиционной программе машиностроительных вузов. Излагаются следующие разделы курса сопротивления материалов: растяжение, кручение, изгиб, статически неопределеные системы, теория напряженного состояния, теория прочности, толстостенные трубы и тонкостенные оболочки, прочность при переменных напряжениях, расчёты при пластических деформациях, устойчивость и методы испытаний. Даются элементарные сведения по композиционным материалам.

Учебные пособия и методические указания

1. Филатов Ю.Е. Руководство к лабораторным работам по сопротивлению материалов. Часть 1: Учебно-методическое пособие.– Иваново, 2002.– 92 с.

2. Филатов Ю.Е., Крайнова Л.Н. Руководство к лабораторным работам по сопротивлению материалов. Часть 2: Учебно-методическое пособие. – Иваново, 2007. – 72 с.

Учебные пособия предназначены для самостоятельного изучения некоторых вопросов курса при подготовке к выполнению лабораторных работ и применении на лабораторных занятиях. Они могут быть использованы также при подготовке к экзаменам.

Пособия рассчитаны на студентов всех специальностей всех форм обучения, имеющих лабораторный практикум в курсах «Прикладная механика» и «Сопротивление материалов». Они отражают имеющуюся материальную базу лаборатории ис-

пытания материалов кафедры теоретической и прикладной механики ИГЭУ.

3. Филатов Ю.Е., Шапин В.И. Расчеты на прочность и жесткость для простых видов сопротивлений: Методические указания. – Иваново, 2003.–55 с.–№1505.

Приводится универсальный метод сечений для определения внутренних усилий путем введения «следящей системы координат» и их расчета из уравнений равновесия рассматриваемой отсеченной части.

Рассмотрены конкретные примеры и задачи, направленные на грамотное решение домашнего задания.

4. Шапин В.И. Прикладные задачи механики в расчетах теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС: Учебное пособие. – Иваново, 1994. –124 с.

Рассмотрены практические задачи по расчёту на прочность и жесткость механических конструкций теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС: лопаток паровых турбин, валов энергомашин, оболочечных конструкций резервуаров, проблемы малоцикловой и многоцикловой усталостной прочности элементов оборудования и т.д.

Задачники

1. Сборник задач по сопротивлению материалов /Под ред. А.С. Вольмира. –М.: Наука. Гл. ред. физ.- мат. лит., 1984.–408 с.

Сборник охватывает все разделы сопротивления материалов. Приведены задачи, решаемые численными методами. Имеются задачи повышенной трудности, к которым даны подробные решения.

2. Сборник задач по сопротивлению материалов /Под ред. В.К. Качурина. –М.: Наука. Гл. ред. физ.- мат. лит., 1972.–432 с.

В сборнике приведены задачи на все основные разделы курса сопротивления материалов. Общее количество задач около 900. Некоторые снабжаются подробными решениями и пояснениями.

3. Руководство для решения задач по сопротивлению материалов /Под ред. Г.М. Ицковича–М.: Высш. шк., 1970.–544 с.

На подробно разобранных примерах показаны методы решения типовых задач по курсу сопротивления материалов.

Справочники

1. Рудицин М.Н. Справочное пособие по сопротивлению материалов.–М: Высш. шк., 1970.–328 с.
2. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, П.В. Матвеев и др.; отв. ред. Г.С. Писаренко. – 2-е изд. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.

В пособиях отражены все разделы курса сопротивления материалов. Теоретический материал дополнен справочными и расчётными таблицами.

Интересно и полезно прочитать

1. Вандберг Д.В., Писаренко Г.С. Механические колебания и их роль в технике. –М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1965.– 276 с.

Даётся систематическое изложение теории колебаний и совершенно не излагается математический аппарат этой теории. Цель – познакомить широкий круг читателей с той огромной ролью, которую играют механические колебания в разнообразных отраслях техники.

2. Гордон Дж. Почему мы не проваливаемся сквозь пол / Пер. с англ. С.Т. Михайко; предисл. акад. Ю.Н. Работнова. –М.: Мир, 1971.– 272 с.

Автор книги, профессор университета в Рединге (Великобритания), живо и с юмором рассказывает о прочности материалов и конструкций. Книга написана популярно, для самого широкого круга читателей, но её прочтёт с интересом и специалист.

3. Зацеринный В.П., Акопов А.И. Атланты держат небо. –М.: Знание, 1979.– 176 с.

В популярной форме представлены основные исторические моменты развития человеческого знания в области науки о прочности начиная от первых интуитивных представлений людей о механике разрушения материалов и конструкций.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1.

ПОСТРОЕНИЕ ЭПЮР ВНУТРЕННИХ ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ

Уважаемые коллеги!

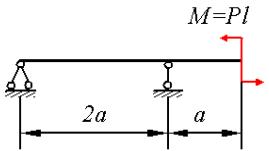
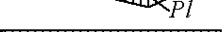
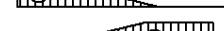
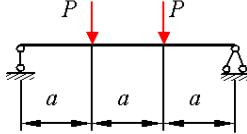
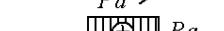
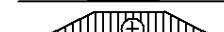
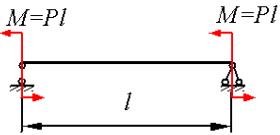
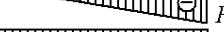
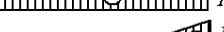
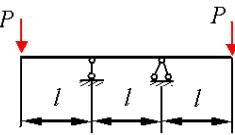
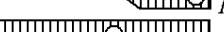
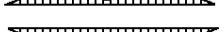
Прямой изгиб является, почему-то традиционно, наиболее проблемным, с точки зрения усвоения, видом сопротивления. Особенно в эпюрной технике. Поэтому в качестве тренажёра попробуйте, как мы говорим, «навскидку примерить» для обозначенных расчётных схем соответствующие им эпюры внутренних изгибающих моментов. Не забывайте при этом пользоваться известным правилом определения момента силы относительно точки, а скачок на эпюре возможен лишь в том сечении, где имеет место в расчётной схеме сосредоточенная пара сил.

Убедиться в правильности ответов вы можете по таблице, приведённой ниже.

Таблица ответов

Номер схемы	Вариант ответа	Номер схемы	Вариант ответа	Номер схемы	Вариант ответа
1	5	19	5	37	2
2	5	20	1	38	3
3	3	21	3	39	4
4	4	22	5	40	3
5	2	23	4	41	1
6	3	24	2	42	3
7	4	25	2	43	3
8	2	26	4	44	5
9	2	27	4	45	3
10	5	28	2	46	2
11	2	29	2	47	5
12	3	30	4	48	3
13	3	31	3	49	1
14	1	32	5	50	2
15	4	33	2	51	3
16	1	34	3	52	4
17	3	35	3		
18	3	36	4		

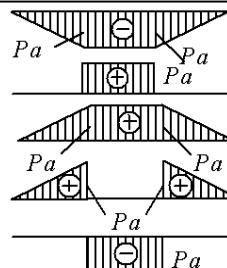
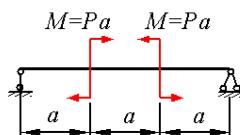
Задания

Схема	Варианты ответа				
① 	 ①  ②  ③  ④  ⑤	① ② ③ ④ ⑤			
② 	 ①  ②  ③  ④  ⑤	① ② ③ ④ ⑤			
③ 	 ①  ②  ③  ④  ⑤	① ② ③ ④ ⑤			
④ 	 ①  ②  ③  ④  ⑤	① ② ③ ④ ⑤			

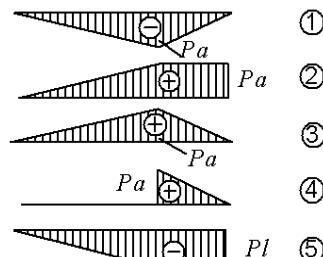
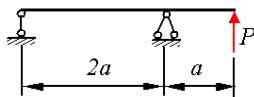
Схема

Варианты ответа

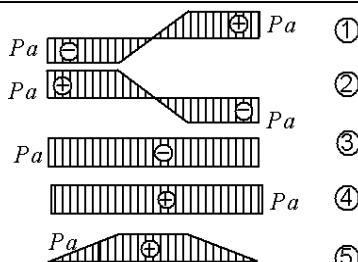
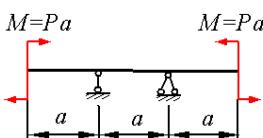
⑤



⑥



⑦



⑧

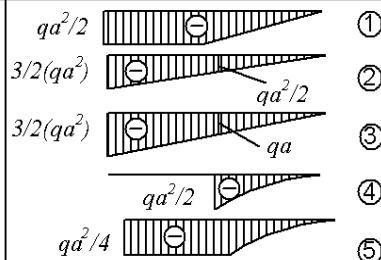
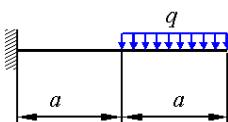
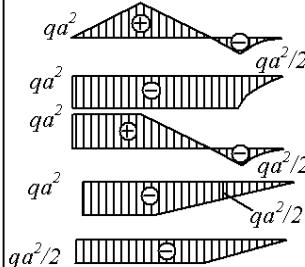
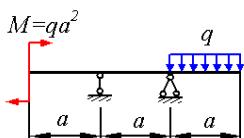


Схема	Варианты ответа	
⑨		
	 Pa Pa Pa Pa Pa	① ② ③ ④ ⑤
⑩		
	 Pa Pa Pa Pa	① ② ③ ④ ⑤
⑪		
	 Pa $Pa/2$ $Pa/2$ Pa $Pa/2$	① ② ③ ④ ⑤
⑫		
	 Pa Pa Pa Pa	① ② ③ ④ ⑤

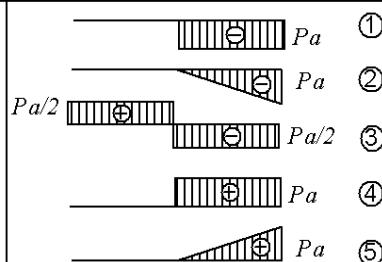
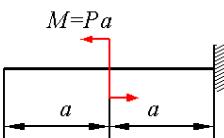
Схема

Варианты ответа

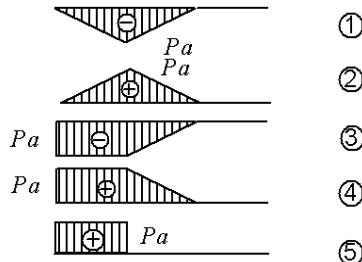
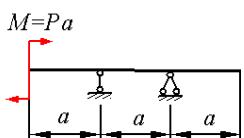
⑬



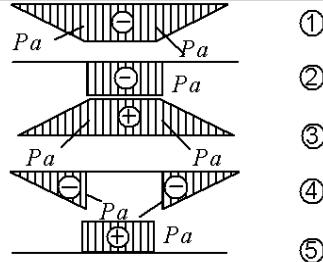
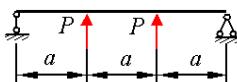
⑭



⑮

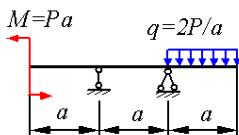


⑯

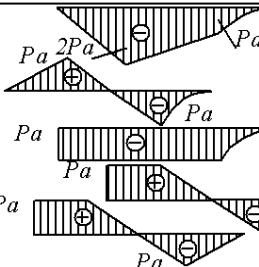


Схема

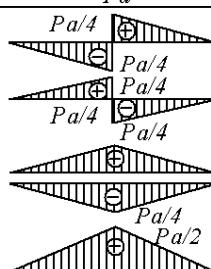
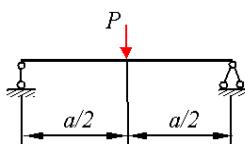
17



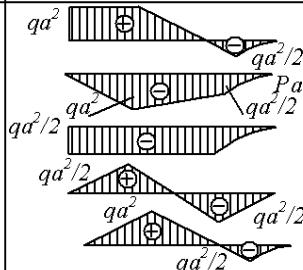
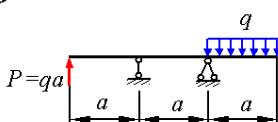
Варианты ответа



18



19



20

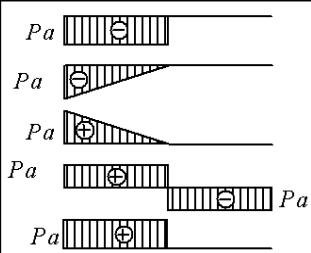
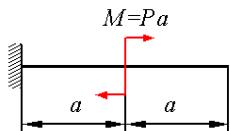


Схема	Варианты ответа	
㉑		
	 	① ② ③ ④ ⑤
㉒		
	 	① ② ③ ④ ⑤
㉓		
	 	① ② ③ ④ ⑤
㉔		
	 	① ② ③ ④ ⑤

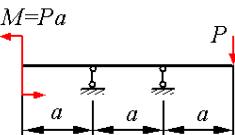
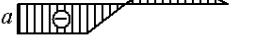
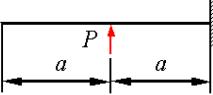
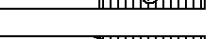
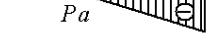
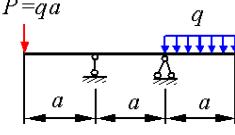
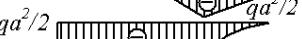
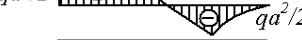
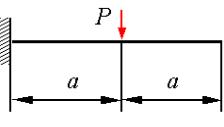
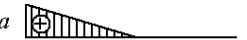
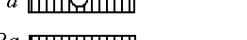
Схема	Варианты ответа
㉕	 ①  ②  ③  ④  ⑤ 
㉖	 ①  ②  ③  ④  ⑤ 
㉗	 ①  ②  ③  ④  ⑤ 
㉘	 ①  ②  ③  ④  ⑤ 

Схема	Варианты ответа	
(29)		
	 Pa Pa Pa Pa Pa	① ② ③ ④ ⑤
(30)		
	 Pa Pa Pa Pa Pa	① ② ③ ④ ⑤
(31)		
	 Pa Pa Pa Pa Pa	① ② ③ ④ ⑤
(32)		
	 Pa Pa Pa Pa Pa	① ② ③ ④ ⑤

Схема	Варианты ответа	
(33)		
	Pa Pa Pa Pa Pa	① ② ③ ④ ⑤
(34)		
	Pa $2Pa$ Pa $2Pa$ $2Pa$	① ② ③ ④ ⑤
(35)		
	Pa Pa Pa Pa Pa	① ② ③ ④ ⑤
(36)		
	Pa Pa Pa Pa Pa	① ② ③ ④ ⑤

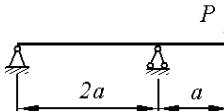
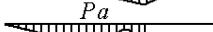
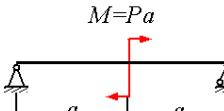
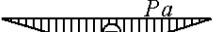
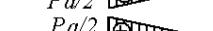
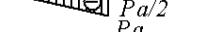
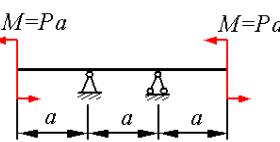
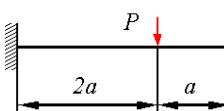
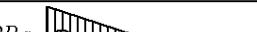
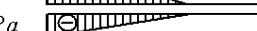
Схема	Варианты ответа	
⑦		    
⑧		    
⑨		    
⑩		    

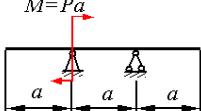
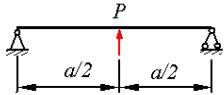
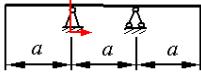
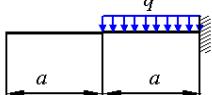
Схема	Варианты ответа	
④1	Pa	①
	Pa	②
	Pa	③
	Pa	④
	Pa	⑤
④2	$Pa/4$	①
	$Pa/4$	②
	$Pa/4$	③
	$Pa/4$	④
	$Pa/2$	⑤
④3	Pa	①
	Pa	②
	Pa	③
	Pa	④
	Pa	⑤
④4	$qa^2/2$	①
	$qa^2/2$	②
	qa^2	③
	qa^2	④
	$qa^2/2$	⑤

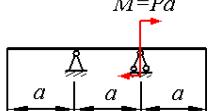
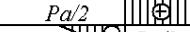
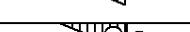
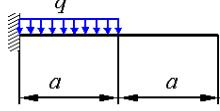
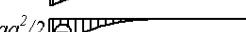
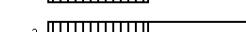
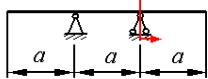
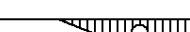
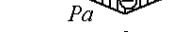
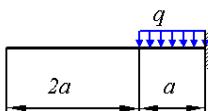
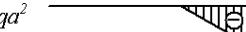
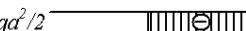
Схема	Варианты ответа
45 	Pa ①  $Pa/2$ ②  Pa ③  Pa ④  Pa ⑤ 
46 	$qa^2/2$ ①  $qa^2/2$ ②  $qa^2/4$ ③  $qa^2/2$ ④  qa^2 ⑤ 
47 	 Pa ①  Pa ②  Pa ③  Pa ④ 
48 	qa^2 ①  qa^2 ②  $qa^2/2$ ③  qa^2 ④  $qa^2/2$ ⑤ 

Схема	Варианты ответа
49	 ① ② ③ ④ ⑤
50	 ① ② ③ ④ ⑤
51	 ① ② ③ ④ ⑤
52	 ① ② ③ ④ ⑤

Приложение 2

РАСЧЁТЫ НА ПРОЧНОСТЬ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ПРОСТЫХ ВИДОВ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Постановка задачи

Для заданных расчётных схем каждого варианта необходимо решить следующие задачи.

Задача 1. Построить эпюру нормальных сил, вычислить квадратное сечение деревянного бруса и определить в общем виде абсолютное удлинение растянутого бруса.

Принять: $P = 20$ кН; $q = 20$ кН/м; $P = ql$; $l = 1$ м; $E = 10^4$ МПа; $[\sigma] = 10$ МПа.

Задача 2. Построить эпюру внутренних крутящих моментов, вычислить диаметр круглого стального вала и определить в общем виде модуль полного угла закручивания. Диаметр вала рекомендуется округлить до стандартного значения.

Принять: $M = 20$ кН·м; $m = 20$ кН·м/м; $M = ml$; $l = 1$ м; $G = 0,8 \cdot 10^5$ МПа; $[\tau] = 100$ МПа.

Задача 3. Построить эпюры поперечных сил и внутренних изгибающих моментов* и вычислить номер двутавра профиля балочных конструкций.

Принять: $P = 20$ кН; $q = 20$ кН/м; $M = 20$ кН·м; $P = ql$; $M = ql^2$; $l = 1$ м; $[\sigma] = 160$ МПа.

Задачи 4 и 5 по постановке аналогичны задаче 3.

Полученные результаты вы можете сравнить с ответами, приведёнными в таблице к приложению**.

* Можно ограничиться только построением эпюр внутренних изгибающих моментов.

** Расчёт перемещений в задачах 1 и 2 рекомендуется довести самостоятельно до чисел и убедиться в малости перемещений в упругой зоне деформирования.

Таблица ответов

Номер варианта	Номер задачи	Сечение $F, \text{мм}^2$	Удлинение $\Delta l, \text{мм}$	Диаметр $d, \text{мм}$	Угол закручивания $\varphi, \text{рад}$	Номер листа
1	1	$4 \cdot 10^3$	$-\frac{2ql^2}{EF}$			
	2			100	$\frac{Ml}{GJ_o}$	
	3					18
	4					10
	5					18
2	1	$2 \cdot 10^3$	$-\frac{2Pl}{EF}$			
	2			100	$\frac{3ml^2}{2GJ_o}$	
	3					24
	4					14
	5					18
3	1	$2 \cdot 10^3$	$\frac{ql^2}{EF}$			
	2			125	$\frac{3Ml}{GJ_o}$	
	3					16
	4					10
	5					14
4	1	$2 \cdot 10^3$	$-\frac{Pl}{EF}$			
	2			100	$\frac{Ml}{GJ_o}$	
	3					10
	4					14
	5					14

Продолжение таблицы

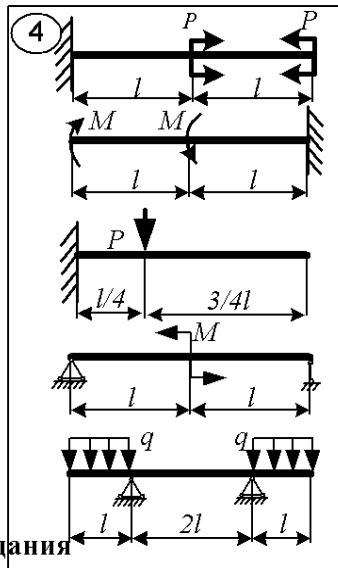
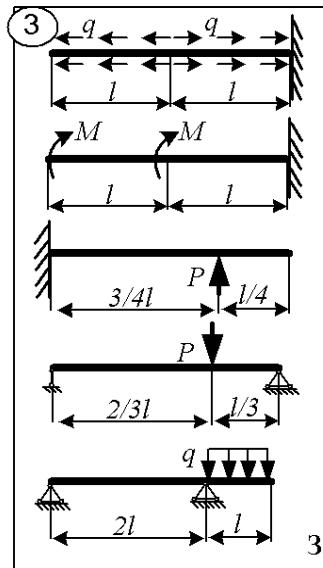
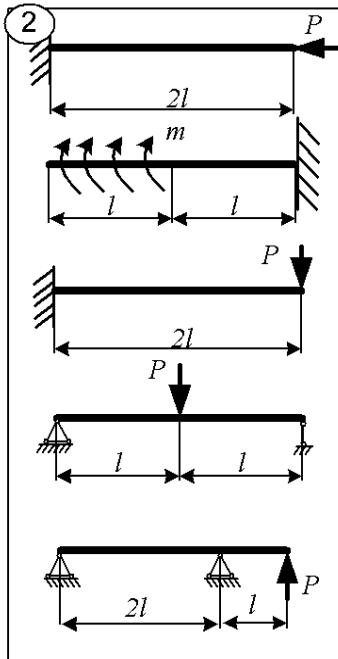
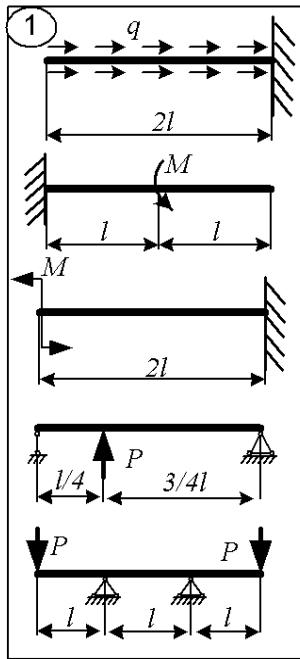
5	1	$4 \cdot 10^3$	$\frac{3Pl}{EF}$			
	2			100	$\frac{Ml}{GJ_o}$	
	3					16
	4					14
	5					18
6	1	$2 \cdot 10^3$	$\frac{2Pl}{EF}$			
	2			100	$\frac{3ml^2}{2GJ_o}$	
	3					24
	4					10
	5					18
7	1	$4 \cdot 10^3$	$-\frac{2ql^2}{EF}$			
	2			100	$\frac{Ml}{GJ_o}$	
	3					18
	4					12
	5					18
8	1	$2 \cdot 10^3$	$-\frac{Pl}{EF}$			
	2			100	$\frac{ml^2}{2GJ_o}$	
	3					18
	4					0
	5					18
9	1	$2 \cdot 10^3$	$\frac{Pl}{EF}$			
	2			125	$\frac{3Ml}{GJ_o}$	
	3					0
	4					18
	5					18

Продолжение таблицы

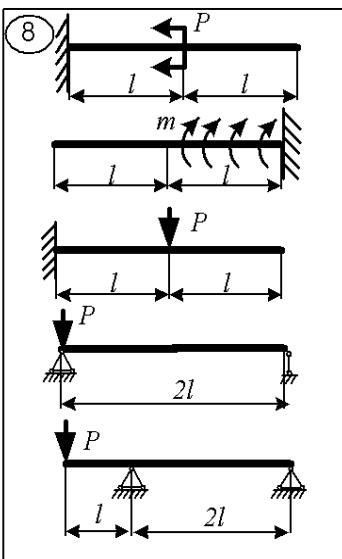
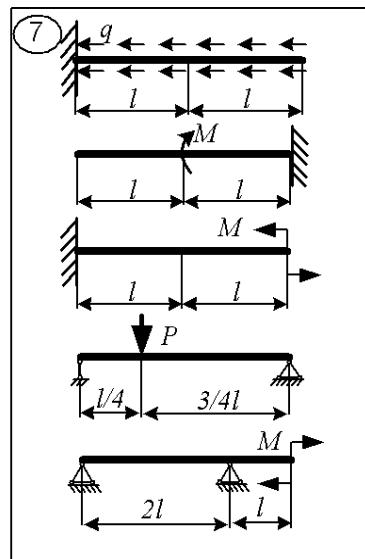
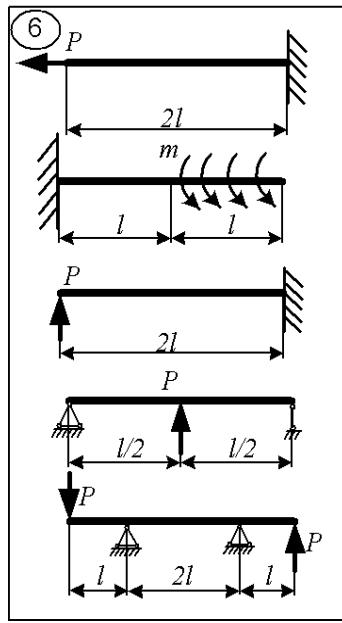
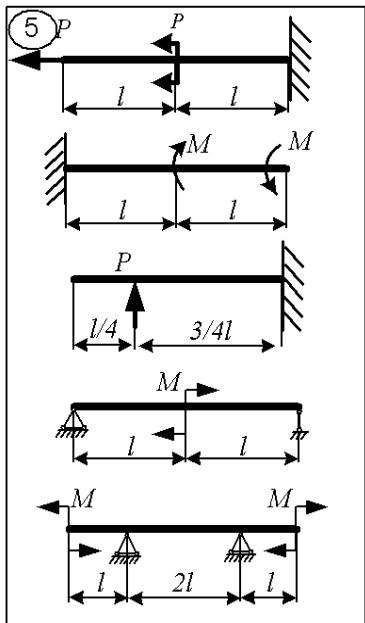
10	1	$2 \cdot 10^3$	$-\frac{ql^2}{2EF}$			
	2			100	$\frac{2Ml}{GJ_o}$	
	3					18
	4					10
	5					18
11	1	$2 \cdot 10^3$	$\frac{Pl}{EF}$			
	2			100	$\frac{ml^2}{GJ_o}$	
	3					14
	4					18
	5					18
12	1	$2 \cdot 10^3$	$\frac{ql^2}{2EF}$			
	2			100	$\frac{2Ml}{GJ_o}$	
	3					18
	4					10
	5					18
13	1	$4 \cdot 10^3$	$-\frac{3Pl}{EF}$			
	2			150	$\frac{3Ml}{GJ_o}$	
	3					10
	4					18
	5					18
14	1	$2 \cdot 10^3$	$\frac{3ql^2}{2EF}$			
	2			125	$\frac{2ml^2}{GJ_o}$	
	3					16
	4					10
	5					18

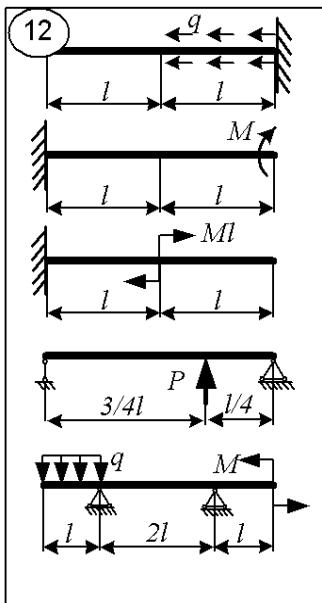
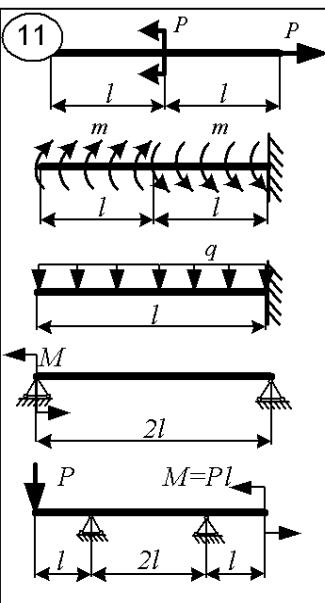
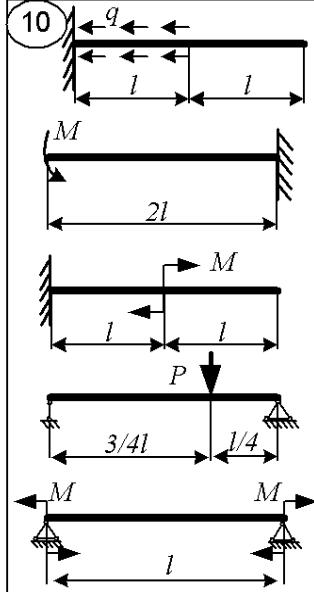
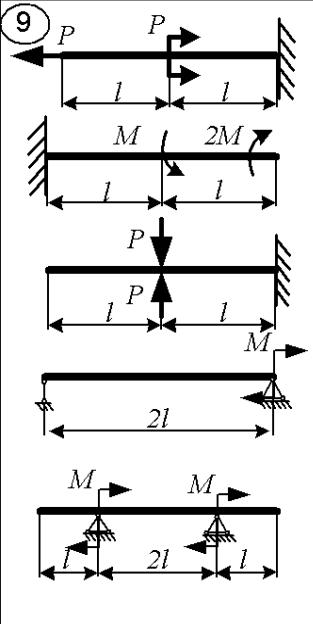
Окончание таблицы

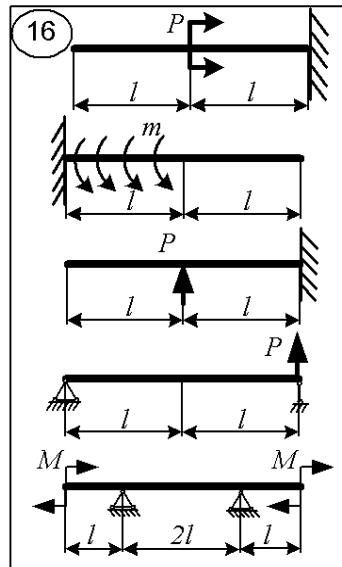
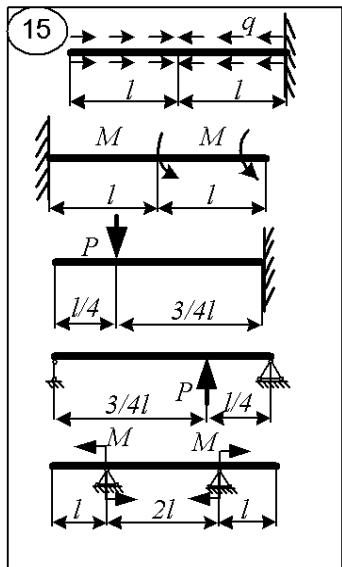
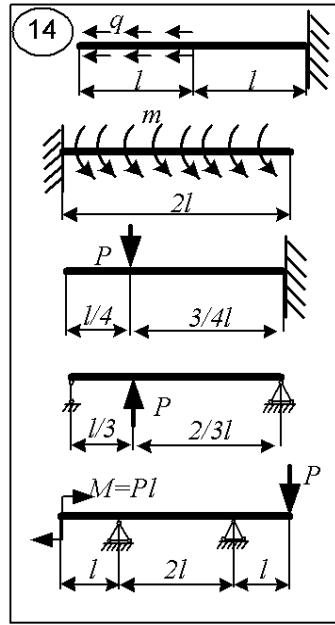
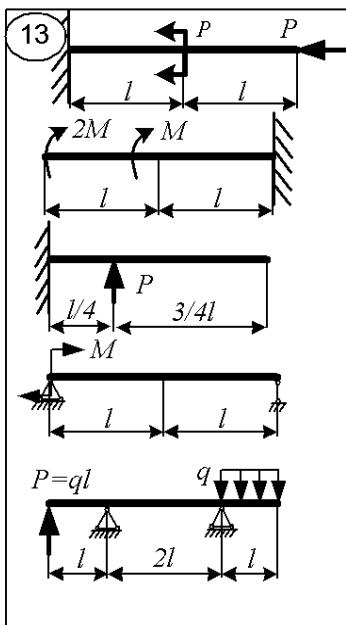
15	1	$2 \cdot 10^3$	$-\frac{ql^2}{EF}$			
	2			125	$\frac{3Ml}{GJ_o}$	
	3					16
	4					10
	5					18
16	1	$2 \cdot 10^3$	$-\frac{Pl}{EF}$			
	2			100	$\frac{ml^2}{2GJ_o}$	
	3					18
	4					0
	5					18



Задания



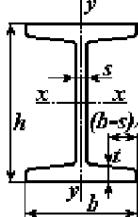




Приложение 3

ДВУТАВРЫ
СТАЛЬНЫЕ ГОРЯЧЕКАТАННЫЕ
Сортамент

ГОСТ 8239-89
 (СТ СЭВ 2209-89)
 Введен с 01.07.1990



h – высота профиля;
 b – ширина полки;
 s – толщина стенки;
 t – толщина полки
 средняя;

J – момент инерции осевой;
 W – момент сопротивления;
 S_x – статический момент
 полусечения;
 i – радиус инерции

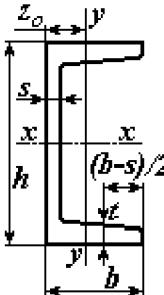
№ дутавра	Размеры, мм				Пло- щадь сече- ния A см^2	Мас- са 1м кг	Справочные величины для осей						
							Х-Х				У-У		
	h	b	s	t			J_x см^4	W_x см^3	i_x см	S_x см^3	J_y см^4	W_y см^3	i_y см
10	100	55	4,5	7,2	12,0	9,46	198	39,7	4,06	23	17,9	6,49	1,22
12	120	64	4,8	7,3	14,7	11,5	350	58,4	4,88	33,7	27,9	8,72	1,38
14	140	73	4,9	7,5	17,4	13,7	572	81,7	5,73	46,8	41,9	11,5	1,55
16	160	81	5,0	7,8	20,2	15,9	873	109	6,57	62,3	58,6	14,5	1,70
18	180	90	5,1	8,1	23,4	18,4	1290	143	7,42	81,4	82,6	18,4	1,88
20	200	100	5,2	8,4	26,8	21,0	1840	184	8,28	104	115	23,1	2,07
22	220	110	5,4	8,7	30,6	24,0	2550	232	9,13	131	157	28,6	2,27
24	240	115	5,6	9,5	34,8	27,3	3460	289	9,97	163	198	34,5	2,37
27	270	125	6,0	9,8	40,2	31,5	5010	371	11,2	210	260	41,5	2,54
30	300	135	6,5	10,2	46,5	36,5	7080	472	12,3	268	337	49,9	2,69
33	330	140	7,0	11,2	53,8	42,2	9840	597	13,5	339	419	59,9	2,79
36	360	145	7,5	12,3	61,9	48,6	13380	743	14,7	423	516	71,1	2,89
40	400	155	8,3	13	72,6	57,0	19062	953	16,2	545	667	86,1	3,03
45	450	160	9,0	14,2	84,7	66,5	27696	1231	18,1	708	808	101	3,09
50	500	170	10	15,2	100	78,5	39727	1589	19,9	919	1043	123	3,23
55	550	180	11	16,5	118	92,6	55962	2035	21,8	1181	1356	151	3,39
60	600	190	12	17,8	138	108	76806	2560	23,6	1491	1725	182	3,54

ШВЕЛЛЕРЫ
СТАЛЬНЫЕ ГОРЯЧЕКАТАНЫЕ

ГОСТ 8240-89

Сортамент

Введен с 01.07.1990



h – высота сечения;

J – момент инерции осевой;

b – ширина полки;

W – момент сопротивления;

s – толщина стенки;

S_x – статический момент

t – толщина полки средняя;

полусечения;

Z_o – расстояние от оси

i – радиус инерции.

y-y до наружной грани стенки;

№ швеллера	Размеры, мм				Площадь сечения <i>A</i> см ²	Масса 1 м кг	Справочные величины для осей						<i>Z_o</i> см	
							X-X			Y-Y				
	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>s</i>	<i>t</i>			<i>J_x</i> см ⁴	<i>W_x</i> см ³	<i>i_x</i> см	<i>S_x</i> см ³	<i>J_y</i> см ⁴	<i>W_y</i> см ³	<i>i_y</i> см	
5	50	32	4,4	7,0	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	7,51	5,90	48,6	15,0	2,54	9,00	8,70	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	5,60	40,8	45,4	11,0	1,70	1,67
16	160	64	5,0	8,4	18,1	14,2	747	93,4	6,42	54,1	63,3	13,8	1,87	1,80
16a	160	68	5,0	9,0	19,5	15,3	823	103	6,49	59,4	78,8	16,4	2,01	2,00
18	180	70	5,1	8,7	20,7	16,3	1090	121	7,24	69,8	86,0	17,0	2,04	1,94
18a	180	74	5,1	9,3	22,2	17,4	1190	132	7,32	76,1	105	20,0	2,18	2,13
20	200	76	5,2	9,0	23,4	18,4	1520	152	8,07	87,8	113	20,5	2,20	2,07
22	220	82	5,4	9,5	26,7	21,0	2110	192	8,89	110	151	25,1	2,37	2,21
24	240	90	5,6	10,0	30,6	24,0	2900	242	9,73	139	208	31,6	2,60	2,42
27	270	95	6,0	10,5	35,2	27,7	4160	308	10,9	178	262	37,3	2,73	2,47
30	300	100	6,5	11,0	40,5	31,8	5810	387	12,0	224	327	43,6	2,84	2,52
33	330	105	7,0	11,7	46,5	36,5	7980	484	13,1	281	410	51,8	2,97	2,59
36	360	110	7,5	12,6	53,4	41,9	10820	601	14,2	350	513	61,7	3,10	2,68
40	400	115	8,0	13,5	61,5	48,3	15220	761	15,7	444	642	73,4	3,23	2,75

ШАПИН Вадим Иванович

ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА
Опорный конспект лекций
с дидактическим сопровождением
(издание 2-е, дополненное)

Редактор Н.С. Работаева

Подписано в печать 12. Формат 60x84 1\16. Печать плоская.

Усл. печ. л 3,95. Уч. изд. л. 4,5. Тираж 100 экз. Заказ

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»

153003, г.Иваново, ул.Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ