



## ВВЕДЕНИЕ

Заглянув в Интернет на сайт объявлений о вакансиях на инженерные должности технологов довольно часто можно встретить текст такого типа:

«Работа: главный технолог.  
Участвует в сообществах профессии  
«Главный технолог»: Топ-менеджеры  
Организует... выполнение работ (услуг), обеспечивающих повышение уровня технологической подготовки и технического перевооружения производства... Принимает меры по ускорению освоения в производстве прогрессивных... научно-технических достижений...»

Это сокращенная перепечатка из интернет-объявления. Аналогична направленность работы и у рядовых инженеров-технологов.

Прогрессивное перевооружение производства требует от инженера-технолога понимания принципов работы оборудования с точки зрения не только происходящих в нем технологических процессов, но и возможностей их осуществления. Понимание этих возможностей в значительной степени закладывается изучением общепрофессиональной дисциплины «Механика». Она дает «знания законов механики, а на их основе — принципов механических расчетов и проектирования... умения и навыки для последующего их использования при изучении специальных инженерных дисциплин, а также в самостоятельной практической деятельности инженера-технолога

при составлении планов, заявок на материалы и оборудование, технических заданий на проектирование средств малой механизации и автоматизации, модернизации оборудования и его безопасной эксплуатации, внедрении технических решений и проектов».

Эта цитата взята из примерной программы дисциплины. В ней отражен весьма сложный комплекс технических знаний. Однако ее раздел «Соппротивление материалов» не направлен на подготовку прочнистов-расчетчиков хотя бы уже потому, что в учебных планах на это отводится всего 36–70 аудиторных часов занятий и такое же количество часов самостоятельной работы. К тому же для студента-технолога данная дисциплина является практически единственной, формирующей его базовый технический кругозор в течение процесса обучения. Поэтому изучение указанных в программе тем должно быть направлено на воспитание у студентов осмысленного понимания принципов прочностных особенностей работы оборудования, а также на знакомство с основными методами расчета его деталей.

Учебников и учебных пособий по сопротивлению материалов (в том числе для инженерно-технологических специальностей) имеется уже довольно много. Тем не менее появляются новые издания, и причины здесь разные. Создание данного учебного пособия определялось тремя важными (но недостаточно учитываемыми) особенностями, которые желательно учитывать в нынешних условиях преподавания и обучения.

Первая — это весьма низкая школьная база начальных технических знаний у студентов, требующая от учебных материалов довольно подробного изложения и объяснения. Учащиеся не только плохо ориентируются в простых технических терминах и явлениях, но часто не имеют зрительного представления о реальных особенностях простых конструкций. Вместе с тем содержание учебных материалов традиционно ориентировано на определенную техническую подготовленность студентов. Поэтому данное пособие открывается довольно объемным разделом «Общие сведения», в котором даны опре-

деления и объяснения основным терминам и особенностям курса «Механика. Сопротивление материалов». В темах сделан акцент на ознакомительной вводной части, которая ориентирует на общее понимание особенностей темы.

Вторая причина — весьма ощутимый крен в сторону снижения отводимых аудиторных часов на дисциплины и перевод обучения на применение интерактивного самостоятельного характера его освоения. Поэтому нужны методические материалы с разными подходами к формам и методикам.

Третья причина — тематический набор материала. Студентам немашиностроительных инженерно-технологических специальностей необходимо, хотя бы в ознакомительном виде, иметь представление об условиях работы основного вида деталей, что важно для понимания работы оборудования в целом. В связи с этим в данном учебном пособии нашли отражение отдельные темы, обычно изучаемые в специальных курсах и отсутствующие в учебных планах будущих инженеров-технологов. Темы, важные для формирования инженерного мышления, но не имеющие аналитического решения в рамках дисциплины, представлены в пособии кратким изложением задач. При этом даны общие сведения о вводимых допущениях и пределах применимости представленных формул. Их можно рассматривать как ознакомительные, вырабатывающие общее понимание конструкторских задач. Каждая тема поясняется примерами, объем которых составляет около 30%. В конце каждой темы — контрольные вопросы. Развернутые примеры в пособии следует рассматривать как последовательные решения нескольких задач. Их объединение здесь в один пример дает дополнительные, сравнительные представления о существе темы, нацеливает на обобщенные выводы по ней.

В рамках рабочей программы дисциплины именно от лектора зависит выбор глубины изучения студентами конкретных тем.

В программе дисциплины нет указаний на обязательную оценку знаний студента, основываясь лишь на его

памяти. Поэтому можно ставить задачу перед студентами на понимание существенных особенностей темы и их конкретного применения на основе тестов либо с использованием методической литературы, поскольку в данном контексте курс «Соппротивление материалов» направлен прежде всего на выработку у изучающих его студентов общетехнического мировоззрения.

Изложение тем сопровождается подробными иллюстрациями.

Данное учебное пособие «Соппротивление материалов», являясь разделом курса «Механика», составлено в соответствии с программой ГОС ВПО и предназначено в значительной степени для самостоятельного освоения материала студентами немашиностроительных специальностей заочной и очной форм обучения.

Примерной программой дисциплины очерчен для изучения достаточно широкий объем материала. Для его освоения необходим целостный технический подход в понимании и решении практических задач. В работающем оборудовании пищевых производств выявляется определенный набор видов нагрузок и возникающих при этом технических задач. К наиболее часто встречающимся случаям относятся:

- растяжение или сжатие (в штоках передаточных механизмов, стержнях, подвесных тросах);
- сдвиг (в заклепочных, сварных, шпоночных соединениях деталей);
- изгиб, включая изгиб в двух плоскостях (балки, рамы, рычаги в передаточных механизмах и манипуляторах);
- изгиб с кручением (мешалки, валы редукторов);
- изгиб с кручением и растяжением–сжатием (валы шнековых машин, редукторов);
- нагружение, связанное с возможной потерей устойчивости (стойки, емкостное оборудование с рубашкой, валы шнеков);
- динамические нагрузки во вращающихся системах и системах, использующих ударные усилия (роторы центрифуг и сепараторов, подъемники, молотковые дробилки, вибрационная техника);

- механические колебания (валы мешалок, центрифугальная техника и ее детали, виброизоляция оборудования);
- циклические нагрузки (в редукторах, конвейерах — везде, где возникают повторно-переменные нагрузки);
- контактные нагрузки (в зубчатых зацеплениях, подшипниках, кулачковых механизмах).

Именно этот набор тем отражен в учебном пособии. Тема «Механические колебания упругих систем» представлена в общем виде и является логическим дополнением для создания достаточно полного понимания технических особенностей работы производственного оборудования.

Особенность курса «Механика. Сопротивление материалов» — один из разделов, состоит в том, что для студентов-технологов он является не главным в их специальности и единственным, где ими изучаются вопросы инженерной механики. Поэтому для развития общего технического кругозора, выработки инженерного мышления при решении вопросов технологических процессов в пищевых производствах инженеру-технологу необходимо иметь представление о возможностях работающего оборудования. Часто определяющая роль в этом остается за прочностными вопросами.

Учебное пособие формировалось по принципу знакомства студента — будущего инженера-технолога — с общим кругом прочностных особенностей работающего оборудования в соответствии с перечисленными видами встречающихся в практике нагрузок. При этом не ставилась задача изучения вопросов дисциплины «Сопротивление материалов». Ряд задач, решение которых выходит за рамки методов анализа, принятых в курсе, даны с той долей детализации, которая позволяет сформировать техническое представление об их сути и общем пути решения. К таковым относятся задачи разрушения при трещинообразовании, устойчивости оболочек, работы в условиях динамических нагрузок, виброизоляции, контактных напряжений, краевого эффекта. Они изложены кратко, «для сведения». Ссылки на более глубокий анализ тем

и задач можно найти в прилагаемом библиографическом списке. В соответствии с конкретными рабочими программами некоторые темы или их части можно опустить. Однако при этом цельность дисциплины, заключающаяся в изложении последующего на основе предыдущего, не должна быть потеряна. Объем изучаемого материала, детализация рассматриваемых разделов полностью определяется рабочей программой и поставленными лектором целями.

Ограниченное представление в учебном пособии справочных (табличных) материалов по необходимым в расчетах физическим и геометрическим характеристикам материалов и конструкционных элементов не случайно. Автор считает поиск в технической справочной литературе, в том числе и в Интернете, необходимой составляющей обучения, приучающей к самостоятельности в работе с литературой.

# СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

## ЛАТИНСКИЙ АЛФАВИТ

- $A_0, d_0$  — площадь и диаметр поперечного сечения рабочей части образца перед нагружением,  $\text{м}^2$
- $A$  — площадь,  $\text{м}^2$ ; также работа силовой нагрузки,  $\text{Нм}$
- $a, b, c, h, l, s$  — линейные геометрические параметры системы,  $\text{м}$
- $a, g$  — ускорение и ускорение свободного падения соответственно,  $\text{м/с}^2$
- $A_{\text{ш.р}}$  — истинная площадь поперечного сечения шейки в момент разрыва образца,  $\text{м}^2$
- $B, b, H, h$  — ширина, высота прямоугольного сечения,  $\text{м}$
- $C$  — отношение внутреннего диаметра кольцевого сечения к наружному, б/р; также жесткость пружины,  $\text{Н/м}$
- $C, D$  — произвольные постоянные для функции угла поворота (рад или  $\text{Нм}^2 \cdot \text{рад}$ ) и прогибов балки ( $\text{м}$  или  $\text{Нм}^3$ ) соответственно
- $D, d$  — диаметры,  $\text{м}$
- $[D_0], [D_t]$  — допускаемое значение диаметра бруса по условию жесткости, прочности соответственно,  $\text{м}$
- $E, E_{\text{пр}}$  — модуль упругости первого рода (его также называют модулем продольной упругости или модулем Юнга), его приведенная величина,  $\text{Па} = \text{Н/м}^2$
- $F, J, N, Q, X, Y, Z$  — сосредоточенные силы,  $\text{Н}$
- $F_{\text{max}}$  — наибольшее усилие, которое возникает в образце из пластичного материала при растяжении,  $\text{Н}$
- $F_{\text{кр}}$  — критическая сила при расчетах на устойчивость,  $\text{Н}$
- $F_{\text{пц}}$  — усилие, до которого в образце выполняется закон Гука,  $\text{Н}$
- $F_{\text{р}}$  — усилие, при котором разрушается образец из пластичного материала при растяжении,  $\text{Н}$

- $F_T$  — усилие, при котором в образце возникает площадка текучести, Н  
 $F_y$  — усилие, до которого в образце практически можно не учитывать пластические деформации, Н  
 $G$  — модуль упругости второго рода (его также называют модулем сдвига), Па = Н/м<sup>2</sup>  
 $H$  — высота падения груза при расчете на удар, м  
 $i (i_x)$  — радиус инерции сечения (радиус инерции относительно оси  $x$ ), м; также  $i$ -й элемент, б/р  
 $I_P$  — полярный момент инерции сечения, м<sup>4</sup>  
 $I_{x0}, I_{y0}$  — осевые моменты инерции сечения относительно его собственных центральных осей  $x_0$  и  $y_0$  соответственно, м<sup>4</sup>  
 $I_x, I_y$  — осевые моменты инерции сечения относительно осей всего сечения  $x$  и  $y$  соответственно, м<sup>4</sup>  
 $I_{xy}$  — центробежный момент инерции сечения, м<sup>4</sup>  
 $I_K$  — момент инерции при кручении бруса некруглого поперечного сечения, м<sup>4</sup>  
 $J$  — инерционная сила, Н  
 $K$  — коэффициент пропорциональности; также коэффициент концентрации напряжений, б/р  
 $k$  — величина отношения предела прочности материала на растяжение к пределу прочности на сжатие, б/р; также ширина поверхности разрушения в сварном шве, м  
 $K_F$  — коэффициент при силе на эпюре  $N$ , б/р  
 $k_{\sigma(t)}$  — эффективный коэффициент концентрации напряжений для конкретного вида концентратора, б/р  
 $l, l_0$  — длина участка, длина рабочей части ненагруженного образца, м  
 $M_e$  и  $T_e$  — внешние моменты: изгибающий вокруг осей  $x$  и  $y$  и крутящий вокруг оси  $z$  соответственно, Н·м  
 $M_x, M_y$  — сосредоточенные изгибающие моменты как внутренние силовые факторы вокруг оси  $x$  и  $y$  соответственно, Н·м  
 $N$  — продольная сила (вдоль оси  $z$ ) как продольный внутренний силовой фактор, Н  
 $n$  — нормаль к произвольной площадке; также количество элементов в составном сечении, б/р, или коэффициент затухания колебательного движения, с<sup>-1</sup>  
 $n_T, n_B, n_{пч}, n_\sigma, n_\tau$  — коэффициент запаса прочности по пределу текучести, временному сопротивлению, по пределу прочности соответственно; также по нормальным или касательным напряжениям, б/р  
 $P$  — силы, распределенные по поверхности (давление), Н/м<sup>2</sup>  
 $p$  — полное напряжение, Н/м<sup>2</sup>  
 $q$  — силы, распределенные по линии (погонные), Н/м



- $Q_x, Q_y$  — поперечные силы по осям  $x$  и  $y$  соответственно как поперечные внутренние силовые факторы, Н  
 $R$  — радиус срединной поверхности оболочки, м  
 $r$  — коэффициент (показатель) асимметрии цикла, б/р, также текущее значение радиуса, м  
 $s$  — толщина тонкостенного элемента, м  
 $S_x, S_y$  — статические моменты сечения относительно осей  $x$  и  $y$  соответственно, м<sup>3</sup>  
 $T$  — крутящий момент (вокруг оси  $z$ ) как внутренний силовой фактор, Нм  
 $U$  — накопленная потенциальная энергия упругой деформации системы, Нм  
 $V$  — объем, м<sup>3</sup>  
 $v$  — скорость, м/с  
 $W_x, W_y, W_p$  — моменты сопротивления относительно осей  $x, y$  и полярный момент сопротивления, м<sup>3</sup>  
 $W_k$  — момент сопротивления при кручении бруса некруглого поперечного сечения, м<sup>3</sup>  
 $x, y, z$  — оси координат, также координаты, м  
 $x_0, y_0$  — координаты центра тяжести бесконечно малой площадки сечения относительно центральных осей, м  
 $x_c, y_c$  — координаты центра тяжести сечения в рассматриваемых осях, м  
 $X_i$  — реакция отброшенной «лишней» связи в статически неопределимых системах  
 $y$  — прогиб балки, м  
 $z$  — продольная ось, м

### ГРЕЧЕСКИЙ АЛФАВИТ

- $\alpha, \beta$  — углы, рад  
 $\alpha, \beta, \gamma$  — коэффициенты для определения параметров свободного кручения брусьев некруглого поперечного сечения, б/р  
 $\alpha_0$  — угол наклона площадки, при котором напряжения или моменты инерции сечения приобретают экстремальные значения, рад  
 $\beta_{\sigma(t)}$  — коэффициент качества поверхности детали при циклической нагрузке, б/р  
 $\beta_d$  — коэффициент динамичности (динамический коэффициент), б/р  
 $\gamma$  — угол сдвига, б/р  
 $\Delta$  — перемещение конца участка бруса, м; также обобщенное перемещение  
 $\delta$  — относительное удлинение образца после разрыва, %  
 $\Delta b, \Delta c$  — поперечное сужение бруса; также абсолютный сдвиг, м  
 $\delta_{ij}$  — единичное перемещение, м/Н, или 1/Н, или 1/Нм

- $\Delta l$  — удлинение или укорочение участка, м  
 $\varepsilon, \varepsilon_d$  — линейная деформация, ее динамическая составляющая, б/р  
 $\varepsilon_{\sigma(t)}$  — масштабный коэффициент (фактор) детали при циклической нагрузке, б/р  
 $\varepsilon_{ост}$  — остаточная (пластическая) деформация образца после разрыва, б/р;  
 $\varepsilon_{y.p}$  — упругая деформация образца в момент его разрушения, б/р  
 $\theta$  — относительный угол закручивания бруса,  $m^{-1}$   
 $[\theta]$  — допускаемое значение относительного угла закручивания бруса,  $m^{-1}$   
 $\lambda$  — осадка пружины, м; гибкость стержня, б/р  
 $\mu$  — коэффициент Пуассона, б/р  
 $\rho, \rho_{пр}$  — радиус кривизны, его приведенная величина, а также расстояние от начала координат до элементарной площадки, м  
 $\sigma, \tau$  — напряжения нормальное и касательное соответственно,  $H/m^2$   
 $\sigma_{0,2}$  — условный предел текучести,  $H/m^2$   
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  — главные нормальные напряжения, действующие по трем взаимно перпендикулярным площадкам,  $H/m^2$   
 $\sigma_a, \sigma_m$  — амплитудное и среднее значение циклических нормальных напряжений,  $H/m^2$   
 $\sigma_N, \sigma_{M_x}, \sigma_{M_y}$  — доля нормальных напряжений, создающих продольную силу, изгибающий момент  $M_x$  и момент  $M_y$  соответственно,  $H/m^2$   
 $\sigma_r$  — предел выносливости материала при  $r$ -й асимметрии цикла,  $H/m^2$   
 $\sigma_B$  — временное сопротивление,  $H/m^2$   
 $\sigma_H$  — номинальное напряжение,  $H/m^2$   
 $\sigma_{щ}$  — предел пропорциональности,  $H/m^2$   
 $\sigma_{пч}$  — предел прочности материала,  $H/m^2$   
 $\sigma_{пч.p}$  — предел прочности на растяжение хрупкого материала,  $H/m^2$   
 $\sigma_{пч.c}$  — предел прочности на сжатие хрупкого материала,  $H/m^2$   
 $\sigma_p$  — условное напряжение, при котором происходит разрыв образца,  $H/m^2$   
 $\sigma_{ст}, \sigma_d$  — статическая и динамическая составляющие напряжения в динамическом нагружении,  $H/m^2$   
 $\sigma_T$  — предел текучести,  $H/m^2$   
 $\sigma_{эkv}$  — эквивалентное нормальное напряжение,  $H/m^2$   
 $[\sigma], [\tau]$  — допускаемые нормальное и касательное напряжения соответственно,  $H/m^2$   
 $[\sigma_p], [\sigma_c]$  — допускаемое нормальное напряжение растяжения, сжатия соответственно,  $H/m^2$   
 $\tau_Q, \tau_{кр}$  — касательное напряжение, определяющее поперечную силу, крутящий момент соответственно,  $H/m^2$

- $\tau_{\text{пц}}, \tau_y, \tau_T$  — касательное напряжение, соответствующее пределу пропорциональности, упругости, текучести соответственно, Н/м<sup>2</sup>
- $[\tau']$  — допускаемое касательное напряжение с учетом ослабления материала шва сваркой, Н/м<sup>2</sup>
- $\phi$  — коэффициент снижения допускаемых напряжений в сварном шве и при продольном изгибе, также сдвиг фаз в колебаниях, б/р
- $\phi, \Delta\phi$  — угол закручивания бруса, участка соответственно, б/р
- $\psi$  — относительное сужение образца после разрыва, %
- $\psi_\sigma, \psi_\tau$  — коэффициенты при средних напряжениях, учитывающие асимметрию цикла, т. е. влияние среднего напряжения на снижение предела выносливости симметричного цикла, по нормальным и касательным напряжениям соответственно, б/р
- $\Omega, \omega$  — частота колебаний вынужденная, собственная соответственно, 1/с
- $\omega_i$  — площадь  $i$ -й фигуры на эпюре моментов, Нм<sup>2</sup>, или м<sup>2</sup>, или м
- $\Omega_{\text{кр}}$  — критическая скорость вращения, 1/с

---

## ГЛАВА 1

# ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДИСЦИПЛИНЕ «СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ»

### 1.1. ДИСЦИПЛИНА «СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ»

Сопротивление материалов — это наука, позволяющая достаточно простыми средствами анализа устанавливать особенности сопротивления элементов конструкций нагрузкам и вычислять рациональные размеры элементов конструкций или величины допускаемых нагрузок. Здесь уместно вспомнить эмоциональную и в то же время точную оценку, данную создателем современного полного курса В. И. Феодосьевым, по которой сопротивление материалов — «это введение в высокое общество прикладных наук прочностного цикла, дающих углубленную проработку вопросов, связанных с конкретными техническими направлениями». Значит, сопротивление материалов — это лишь введение в прочностные науки для инженера-конструктора. Дисциплина основывается на знаниях разделов физики, материаловедения, высшей математики, теоретической механики. При этом в теоретической механике и сопротивлении материалов изображения конструкции и приложенной к ней нагрузки внешне похожи. Существенное различие заключается в том, что в теоретической механике изучают абсолютно твердые тела, а в сопротивлении материалов деформируемые. Учет деформируемости тел в сопротивлении материалов позволяет проводить конструкторские расчеты. Таким образом, предметом изучения дисциплины «Сопротивление материалов» являются деформируемые твердые тела.

Объектами анализа и расчетов в сопротивлении материалов являются элементы (детали) конструкции, нахо-

дящиеся под нагрузкой. Нагрузка воздействует на деталь со стороны контактирующих с ней тел или за счет возникающих сил инерции, температурных эффектов. Элемент конструкции и действующая на него нагрузка рассматриваются в упрощенном, схематизированном виде. Реальная конструкция под нагрузкой, освобожденная от несущественных особенностей и представленная схематично, служит **расчетной схемой**. Освобождение конструкции и нагрузки от несущественных особенностей, т. е. ее идеализация, приводит к упрощению расчетов в сопротивлении материалов. Средствами инженерной теории с привлечением экспериментальных методов проводится анализ расчетной схемы для выявления ее прочностных и деформационных закономерностей.

Расчетная схема должна определять **работоспособность элемента конструкции**, т. е. его способность выполнять заданную рабочую функцию в соответствии с требованиями технической документации. Работоспособность определяется параметрами рассматриваемого элемента конструкции. Ее нарушение происходит при **параметрах** (критериях), называемых **предельными**.

Работоспособность в сопротивлении материалов рассматривается с точки зрения способности надежно удерживать нагрузку в заданном месте ее приложения по заданному направлению. При этом понятие надежности здесь ограничено условием того, что значение рабочего параметра в элементе конструкции должно быть меньше предельного в определенное число раз. Это число называется **коэффициентом запаса**. Его величина определяется статистическими данными отказов в работе.

С широким распространением вычислительной техники появилась и возможность весьма точного решения сложных задач с применением методов расчета с помощью ЭВМ. Однако вследствие некоторого разброса табличных значений свойств конструкционных материалов и назначаемых коэффициентов запаса точность решений задач в сопротивлении материалов ограничивается допускаемой погрешностью  $\pm 5\%$ , что дает возможность вести расчет не реальной нагруженной детали, а ее упрощенного варианта

в виде схематизированного (идеализированного) объекта, названного расчетной схемой. Осмысленное приведение реальной нагруженной детали к расчетной схеме вносит некоторую погрешность, но при этом упрощает задачу настолько, что позволяет простыми аналитическими методами получать результаты, наглядно иллюстрирующие возможности по повышению работоспособности детали.

В дисциплине «Соппротивление материалов» рассматривают три основных вида оценочных расчетно-конструкторских задач по обеспечению детали работоспособностью в условиях действия различного рода нагрузок:

- **задачи прочности**, заключающиеся в оценке способности элемента конструкции сопротивляться создаваемым нагрузкам, не разрушаясь;
- **задачи жесткости**, заключающиеся в оценке способности элемента конструкции сопротивляться создаваемым нагрузкам, не претерпевая значительных деформаций;
- **задачи устойчивости**, заключающиеся в оценке способности элемента конструкции сопротивляться создаваемым нагрузкам, сохраняя свою первоначальную равновесную форму.

## 1.2. СОСТАВЛЯЮЩИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ

Расчетная схема составляется из представленных по свойствам схематично: материала, геометрии конструкции, видов опор и силовой нагрузки.

Материал считают: непрерывным (сплошным), однородным и изотропным (с одинаковыми свойствами по всем направлениям), идеально упругим (без остаточных деформаций после снятия нагрузки).

Размеры всех исследуемых объектов, включая понятия бесконечно малых объемов, используемые в аналитических решениях, считаются несоизмеримо большими по сравнению с размерами структурных составляющих материала — его кристаллических зерен, молекул, микропор и т. д. На этом основании атомарная или молекулярная микроструктура материала не учитывается и вводится понятие **непре-**

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)