А. И. Аркуша М. И. Фролов

ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

для техникумов

издательство
Высшая Школа

А. И. Аркуша, М. И. Фро.

ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Допущено
Министерством высшего
и среднего специального
образования СССР
в качестве учебника
для учащихся
машиностроительных специальностей
техникумов

МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1983

ББК 30.12
А 82
УДК 531.8

Научный редактор Е. Н. Дубейковский.
Рецензенты: Т. М. Штомпель (Харьковский станкоинструментальный техникум), Е. А. Шорох, В. Н. Загребельный, М. Г. Пинский (Харьковский политехнический институт).

Аркуша А. И., Фролов М. И.

А 82 Техническая механика: Учебник для машиностроит. спец. техникумов.— М.: Высш. шк., 1983.— 447 с., ил.

В пер.: 1 р.

В учебнике изложен учебный материал по программе «Техническая механика» для машиностроительных специальностей техникумов. Он может использоваться также в группах учащихся немашиностроительных специальностей, связанных с эксплуатацией промышленного оборудования.

Применение основных законов, теорем, уравнений, расчетных формул иллюстрируется решениями примеров с использованием единиц СИ.

$А\frac{2105000000-429}{001(01)-83}97-83$

ББК 30.12
605

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемый учебник «Техническая механика» содержит три раздела: «Теоретическая механика», «Сопротивление материалов» и «Детали машин». При изложении учебного материала авторы стремились раскрыть физический смысл рассматриваемых законов, теорем, расчетных формул и по возможности иллюстрировать их применение примерами решения задач, а также примерами расчета элементов конструкций и основных видов передач.

Учебник написан в соответствии с действующими Государственными стандартами СССР, утвержденными до 1982 г., в частности со стандартами на термины, определения, обозначения, расчет геометрии, расчет на прочность зубчатых цилиндрических передач, редукторы общего назначения, ременные передачи, подшипники качения, зубчатые (шлицевые) соединения, механические муфты.

Решение всех примеров, все расчеты в учебнике и вывод расчетных формул в разделе «Детали машин» выполнены в соответствии с требованиями ГОСТ 8. 417—81 «Единицы физических единиц».

Разделы первый и второй учебника написаны А. И. Аркушей при участии Е. Н. Дубейковского, которому принадлежат § 2.31 и глава 9. Третий раздел написан М. И. Фроловым. Авторы выражают искреннюю благодарность В. Н. Загребельному, М. Г. Пинскому, Е. А. Шороху, Т. М. Штомпель, Л. А. Цейтлину, Е. С. Саввушкину и Е. Н. Дубейковскому, замечания и советы которых во многом помогли авторам при работе над рукописью.

Авторы обращаются с просьбой к преподавателям и учащимся техникумов направлять свои критические замечания и пожелания в адрес издательства или Научно-методического кабинета по среднему специальному образованию Минвуза СССР (111024, Москва, 3-я Кабельная ул., 1).

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Последовательное наступление научно-технической революции неразрывно связано с непрерывным совершенствованием машиностроения — основы технического перевооружения всех отраслей народного хозяйства. Инженерная техническая деятельность на основе научной мысли расширяет и обновляет номенклатуру конструкционных материалов, внедряет эффективные методы повышения их прочностных свойств. Появляются новые материалы на основе металлических порошков, порошков-сплавов. Порошковая металлургия не только приводит к замене дефицитных черных и цветных металлов более дешевыми материалами, она позволяет получить совершенно новые материалы — «материалы века», которые невозможно получить традиционным путем. Кроме того, изготовление изделий из порошков — практически безотходное производство. Другое направление получения дешевых конструкционных материалов состоит в применении пластмасс, новых покрытий и т. п. Тончайшая пленка из порошковых смесей на поверхности детали, образуемая плазменным напылением, повышает надежность сопрягаемых и трущихся друг о друга деталей машин, защищает их от коррозии и существенно увеличивает их износостойкость.

Развитие машиностроения на современном этапе в соответствии с решением XXVI съезда КПСС характеризуется комплексной механизацией и автоматизацией производства на основе широкого применения автоматических манипуляторов * (промышленных роботов), встроенных систем автоматического управления с использованием микропроцессов и мини-ЭВМ.

При внедрении в промышленность новых машин широко применяется модульный принцип оборудования, т. е., например, станок или несколько станков и манипулятор. На базе этого принципа создаются и вступают в строй не отдельные машины, а их системы — автоматические линии, цехи, заводы, обеспечивающие законченный технологический процесс производства конкретного изделия. Все это, вместе взятое, позволяет при снижении затраты материалов на изготовление и общей стоимости повысить их мощность, качество, производительность и сделать экономными в потреблении энергии.

Успешное развитие современного машиностроения в конечном счете зависит от качества и глубины профессиональной подготовки специалиста с высшим и средним образованием. Приобретение учащимися техникумов всех специальных знаний и навыков базируется на хорошей общетехнической подготовке, в основе которой наряду

---

* От латинского «manus» — рука.

с другими лежат знания и навыки, полученные при изучении предмета «Техническая механика».

Чтобы понять работу какой-либо машины, необходимо знать, из каких частей она состоит и как они между собой взаимодействуют. А чтобы создать такую машину, нужно сконструировать и рассчитать каждую ее деталь. Третий раздел учебника и посвящен частично решению этой задачи — расчету и конструированию деталей машин общего назначения, деталей, без которых не обходится ни одна машина или механизм.

Расчеты деталей машин базируются на знании основ сопротивления материалов — науки о прочности и жесткости механических конструкций и методах их расчета. Безошибочность же всех действий в современной технической практике определяется знанием основных положений теоретической механики, в которой изучаются законы движения механических систем и общие свойства этих движений.

Каждый человек с помощью органов чувств познает разнообразный и бесконечный окружающий мир, существующий независимо от нас. Весь этот объективный мир определяется одним словом «материя». Непрерывная изменчивость материального мира — основная форма его существования — называется движением, понимаемым в самом широком смысле. «В мире нет ничего, кроме движущейся материи, и движущаяся материя не может двигаться иначе, как в пространстве и во времени» *. Действительно, в мире постоянно происходят различные явления, события, процессы, отмечая которые мы стремимся зафиксировать, где и когда они произошли. Следовательно, пространство и время — формы существования материи.

Изучением самой простой формы движения материального мира, изучением перемещения тел относительно друг друга и во взаимодействии друг с другом и занимается теоретическая механика. Перемещение тела относительно другого тела или, иначе говоря, изменение положения одного тела по отношению к другому называется *механическим движением*. Обычно теоретическая механика разделяется на три части: статику, кинематику и динамику. Статика — раздел теоретической механики, занимающийся изучением сил и условий их равновесия. Кинематика занимается изучением механического движения без учета действия сил. Динамика изучает законы механического движения в отношении их причин и следствий.

---

* *Ленин В. И.* Полн. собр. соч., 1961, т. 18, с. 181.

Раздел первый
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

СТАТИКА

Глава 1
ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СТАТИКИ

§ 1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Окружающие нас реальные тела отличаются многими качествами и в том числе формой, размерами, материалом, массой. Объектом изучения теоретической механики служат не реально существующие тела, а наделенные идеальными свойствами их абстрактные образы (модели) — материальная точка и абсолютно твердое тело.

Материальной точкой называют геометрическую точку, обладающую массой. Так, при решении некоторых задач механики формой и размерами реальных тел пренебрегают, считая их материальными точками Например, при изучении движения небесных тел астрономы учитывают только массу этих тел и расстояние между ними, а форму и размеры самих тел не принимают во внимание.

Абсолютно твердым телом называют такое материальное тело, в котором расстояние между любыми двумя точками всегда остается неизменным.

Способность тел сопротивляться изменению их формы и размеров называется жесткостью. Следовательно, тела с абсолютно неизменяемыми размерами и формой следует считать не только абсолютно твердыми, но и абсолютно жесткими. Любое абсолютно твердое тело рассматривают как систему материальных точек, неизменно связанных между собой, т. е. лишенных возможности перемещаться относительно друг друга. Далее абсолютно твердое тело кратко будем называть просто твердым телом.

Материальные тела находятся друг с другом во взаимодействии. Взаимодействие тел Солнечной системы обеспечивает гармонию движения планет со своими спутниками вокруг Солнца; реки приводят в движение моторы гидравлических турбин; во время бури морские волны способны разбить корабль или выбросить его на берег; подъемные краны переносят строительные конструкции, материалы и т. д. Во всех этих примерах наблюдается взаимодействие тел.

Мера механического действия одного материального тела на другое называется силой. Сила — величина векторная, она определяется, во-первых, числовым значением (модулем), во-вторых, точкой приложения (местом контакта взаимодействующих тел) и, в-третьих, направлением действия.

Численно равные силы, но приложенные к телу в разных точках и различным образом направленные, производят на тело не одинаковое по своим последствиям действие. Например, нажимая на стул рукой в верхней части спинки в горизонтальном направлении

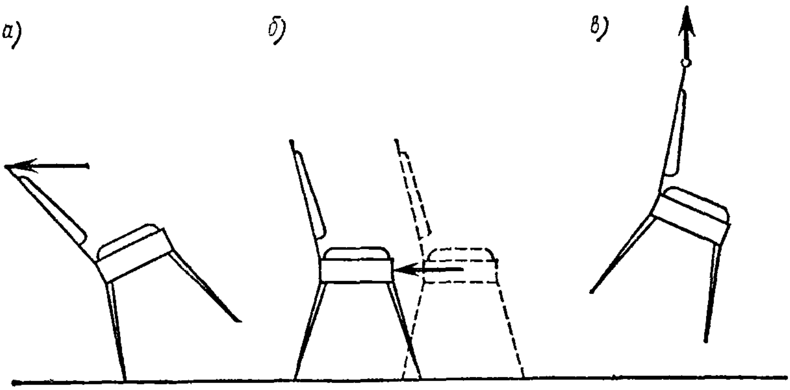

Рис. 1.1

(рис. 1.1, *а*), можно его опрокинуть; если же нажимать на стул в горизонтальном направлении, но в точке на уровне сиденья (рис. 1,1, *б*), то можно сдвинуть стул, а если потянуть стул за спинку вертикально вверх (рис. 1.1, *в*), то стул поднимется.

Из физики известно, что непосредственное измерение числового значения сил производится с помощью различных динамометров.

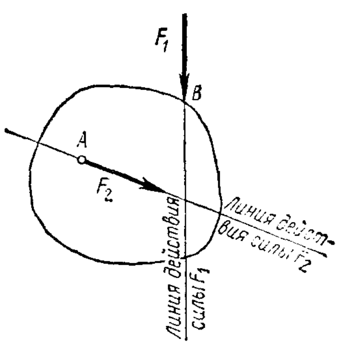

Рис. 1.2

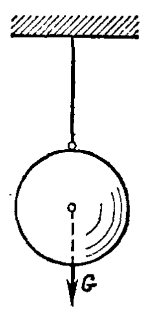

Рис. 1.3

В Международной системе единиц (СИ) сила выражается в ньютонах (сокращенное обозначение Н). 1 Н — небольшая сила, поэтому часто употребляют кратные единицы — килоньютон (1 кН$=10^3$ Н) и меганьютон (1 МН$=10^6$ Н).

Как всякий вектор, силу можно изобразить графически в виде направленного отрезка (рис. 1.2). Обычно начало или конец вектора силы совпадает с точкой приложения силы; прямая, вдоль которой направлен вектор, изображающий силу, называется *линией действия силы;* стрелка на конце вектора показывает, в какую сторону действует сила. Если, например, сказано, что сила действует вертикально, то этим определено положение линии действия и необходимо еще указать, в какую сторону действует сила — вверх или вниз. Так, например, сила тяжести тел всегда направлена вертикально вниз (рис. 1.3). Далее векторы сил условимся обозначать буквами $\mathbf{F}$, $\mathbf{R}$, $\mathbf{G}$ и др., набранными жирным шрифтом, а их числовые значения (модули) будем обозначать теми же буквами, но набранными светлым курсивом (F, R, G).

Несколько сил, действующих на какое-либо одно твердое тело, называются *системой сил.* Различные системы сил, производящие на твердое тело одинаковое механическое действие, называются *эквивалентными.* Если систему сил, приложенных к твердому телу, заменить иной, но эквивалентной системой, то механическое состояние тела не нарушится. Сила, эквивалентная данной системе сил, называется ее *равнодействующей.*

Силы, действующие на твердое тело со стороны других тел, называются *внешними.* Силы, действующие на материальные точки твердого тела со стороны других точек того же тела, называются *внутренними.*

§ 1.2. АКСИОМЫ СТАТИКИ

Как указывалось выше, статика занимается изучением условий равновесия сил, но, кроме того, статика занимается задачами *сложения сил*, т. е. заменами заданных систем сил более простыми эквивалентными системами, а также задачами *разложения сил*, т. е. заменами заданной силы эквивалентной системой сил. Все теоремы и методы, с помощью которых решаются эти задачи, основываются на нескольких аксиомах.

Аксиома 1 (принцип инерции). *Всякая изолированная материальная точка находится в состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока приложенные силы не выведут ее из этого состояния.*

Эта аксиома, сформулированная впервые Галилеем, называется принципом инерции потому, что прямолинейное и равномерное движение материальной точки, происходящее без воздействия сил, называется движением по инерции (от латинского «inertia» — бездеятельность).

Состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения точки называют *равновесием.* Так как твердое тело есть неизменяемая система материальных точек, то рассмотренная аксиома справедлива и для него. Если точка или твердое тело под действием системы сил находится в равновесии, то такую систему сил называют *уравновешенной.*

Аксиома 2 (условие равновесия двух сил). *Две силы, приложенные к твердому телу, образуют уравновешенную систему тогда и* *только тогда, когда* (рис. 1.4) *они равны по модулю и действуют вдоль одной прямой в противоположные стороны.*

Аксиома 3 (принцип присоединения и исключения уравновешенных сил). *Действие данной системы сил на твердое тело не изменится, если к ней добавить или от нее отнять уравновешенную систему сил.*

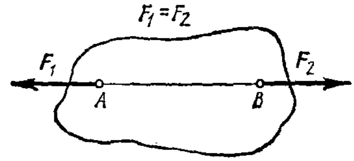

Рис. 1.4

Иначе говоря, если к данной системе сил присоединить уравновешенные силы или из данной системы сил их исключить, то вновь образованная система сил эквивалентна данной.

Следствие 1. *Силу, приложенную к твердому телу, можно переносить вдоль линии ее действия в любую другую точку, действие силы на тело при этом не нарушится.*

Доказательство. Допустим, что к твердому телу в точке A приложена сила $\boldsymbol{F}$ и требуется перенести эту силу в точку B, лежащую на линии действия силы (рис. 1.5, *а*). Приложим к телу в точке B вдоль линии действия силы $\boldsymbol{F}$ уравновешенные силы $\boldsymbol{F}'$ и $\boldsymbol{F}''$ (рис. 1.5, *б*), численно равные силе $\boldsymbol{F}$. По аксиоме 3 действие силы $\boldsymbol{F}$ при этом не нарушится.

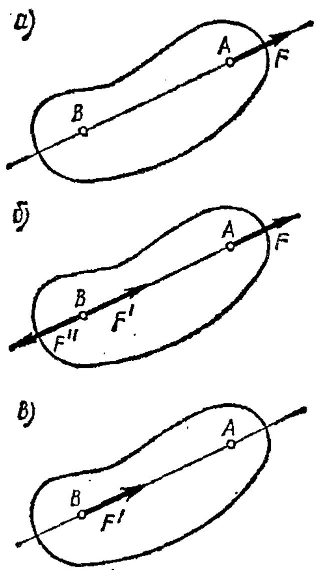

Рис. 1.5

Согласно второй аксиоме, силы $\boldsymbol{F}$ и $\boldsymbol{F}''$ уравновешивают друг друга, а по третьей аксиоме их можно исключить из получившейся системы сил (рис. 1.5, *в*). Оставшаяся сила $\boldsymbol{F}'$, приложенная в точке B, численно равна силе $\boldsymbol{F}$ ($F=F'$) и направлена вдоль той же прямой, т. е. векторы $\boldsymbol{F}$ и $\boldsymbol{F}'$ равны ($\boldsymbol{F}=\boldsymbol{F}'$), а это равносильно тому, что сила $\boldsymbol{F}$ из точки A вдоль линии ее действия перенесена в точку B.

Следствие 1 можно коротко сформулировать так: *сила, приложенная к твердому телу, — скользящий вектор.*

Необходимо заметить, что это свойство вектора силы справедливо только в теоретической механике (механике абсолютно твердого тела). Допустим, к телу AB приложены две численно равные силы $\boldsymbol{F}_1$ и $\boldsymbol{F}_2$, как показано на рис. 1.6, *а*; если силу $\boldsymbol{F}_1$ перенести вдоль линии ее действия из точки A в точку B, а силу $\boldsymbol{F}_2$ — из точки B в точку A (рис. 1.6, *б*), то с точки зрения теоретической механики действие сил на тело не изменилось. При действии сил на реальные тела такой перенос может значительно изменить форму и размеры тела, а иногда и вообще невозможен, например в том случае, если тело AB — цепь.

Аксиома 4 (правило параллелограмма). *Две приложенные к* *точке тела силы имеют равнодействующую, приложенную в той же точке и равную диагонали параллелограмма, построенного на этих силах, как на сторонах.*

Операцию замены системы сил их равнодействующей называют сложением сил. Таким образом, четвертая аксиома постулирует

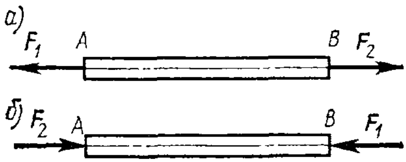

Рис. 1.6

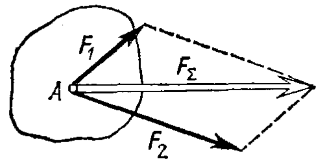

Рис. 1.7

геометрическое сложение двух сил, приложенных к точке тела, где равнодействующая $\boldsymbol{F}_\Sigma$, изображаемая диагональю параллелограмма, построенного на силах $\boldsymbol{F}_1$ и $\boldsymbol{F}_2$ (рис. 1.7), иначе называется геометрической *суммой* этих сил.

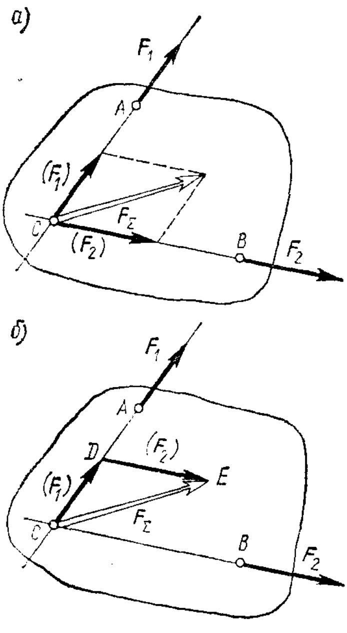

Рис. 1.8

Правило параллелограмма сил (четвертая аксиома) выражается векторным равенством:

$$\boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2 = \boldsymbol{F}_\Sigma. \tag{1.1}$$

Если две силы $\boldsymbol{F}_1$ и $\boldsymbol{F}_2$ приложены к разным точкам тела, но линии их действия лежат в одной плоскости, то, имея в виду, что сила — скользящий вектор, можно, как показано на рис. 1.8, *а*, силы $\boldsymbol{F}_1$ и $\boldsymbol{F}_2$ из точек A и B по линиям действия перенести в точку C их пересечения (модули перенесенных векторов указаны в скобках), а затем сложить по правилу параллелограмма.

Из правила параллелограмма может быть получено правило треугольника сложения двух сил, действующих на тело в одной плоскости (рис. 1.8, *б*). Проведя линии действия заданных сил $\boldsymbol{F}_1$ и $\boldsymbol{F}_2$ и определив точку C пересечения этих линий, строим треугольник CDE, в котором $\overrightarrow{CD} = \boldsymbol{F}_1$ и $\overrightarrow{DE} = \boldsymbol{F}_2$, а $\overrightarrow{CE} = \boldsymbol{F}_\Sigma$, причем сторона CE называется замыкающей стороной силового треугольника.

Правило треугольника формулируется так: *равнодействующая двух сил, приложенных к точке тела, равна замыкающей стороне треугольника, две другие стороны которого равны данным силам.*

Основываясь на правиле параллелограмма, можно поставить и обратную задачу — задачу разложения данной силы на две составляющие, приложенные к той же точке. Для решения этой задачи достаточно на заданном векторе силы, как на диагонали, построить параллелограмм, стороны которого и будут искомыми составляющими. Чтобы задачу разложения силы на две составляющие сделать определенной (на заданной диагонали можно построить бесчисленное количество параллелограммов), кроме силы, которую требуется разложить, необходимо задать дополнительные условия, например направления искомых составляющих. В такой постановке задача разложения силы по правилу параллелограмма встречается чаще всего.

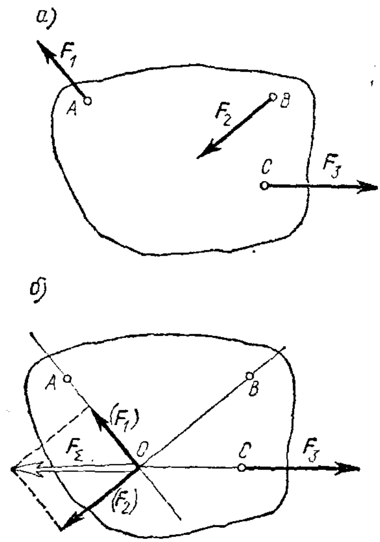

Рис. 1.9

Следствие 2 (теорема о равновесии трех сил). *Если три непараллельные силы, лежащие в одной плоскости, образуют уравновешенную систему, то линии действия этих сил пересекаются в одной точке.*

Доказательство. На твердое тело в точках A, B и C действуют силы $\boldsymbol{F}_1$, $\boldsymbol{F}_2$ и $\boldsymbol{F}_3$ (рис. 1.9, *а*), линии их действия лежат в одной плоскости; силы образуют уравновешенную систему (тело под действием этих сил находится в равновесии).

Так как силы лежат в одной плоскости, то линии действия двух любых из них обязательно пересекутся. Проведем линии действия сил $\boldsymbol{F}_1$ и $\boldsymbol{F}_2$ до пересечения в точке O, перенесем в нее эти силы (рис. 1.9, *б*) и сложим по правилу параллелограмма. Равнодействующая $\boldsymbol{F}_\Sigma$ эквивалентна силам $\boldsymbol{F}_1$ и $\boldsymbol{F}_2$. Таким образом, теперь на тело действуют две силы: $\boldsymbol{F}_\Sigma$ и $\boldsymbol{F}_3$, но равновесие тела не нарушилось, значит силы $\boldsymbol{F}_\Sigma$ и $\boldsymbol{F}_3$ уравновешивают друг друга. Согласно аксиоме 2, эти силы действуют вдоль одной прямой; следовательно, линия действия силы $\boldsymbol{F}_3$ проходит также через точку O — точку пересечения линий действия двух других сил. Теорема доказана. Пересечение линий действия трех сил в одной точке — необходимое условие равновесия трех непараллельных сил, лежащих в одной плоскости, но не достаточное. Линии действия трех сил могут пересекаться в одной точке, но система сил может и не быть уравновешенной.

Аксиома 5 (закон действия и противодействия). *Силы взаимодействия двух твердых тел друг на друга равны по модулю и направлены в противоположные стороны.*

В физике эта аксиома известна как третий закон Ньютона. Пятая аксиома имеет важное значение в механике. Если тело *1* действует на тело *2* с силой $\boldsymbol{F}_{12}$ (рис. 1.10), то тело *2* действует на тело *1* с точно такой же по модулю силой $\boldsymbol{F}_{21}$, но направленной в прямопротивоположную сторону. Хотя силы $\boldsymbol{F}_{12}$ и $\boldsymbol{F}_{21}$ равны по модулю и действуют вдоль одной прямой в противоположные стороны, они не уравновешивают друг друга, так как приложены к разным телам.

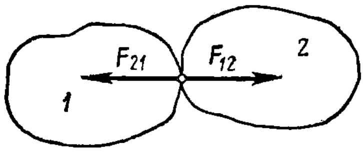

Рис. 1.10

Аксиома 6 (принцип отвердевания). *Если деформируемое тело находится в равновесии, то равновесие этого тела не нарушится, если, не изменяя формы, размеров, положения в пространстве, оно превратится в абсолютно твердое тело, т. е. затвердеет.*

Из этого принципа следует, что условия, необходимые и достаточные для равновесия данного абсолютно твердого тела, необходимы, но не достаточны для равновесия деформируемого тела, по форме и размерам тождественного с данным. Например, если под действием сил резиновое тело находится в равновесии, то равновесие сохранится, когда это тело станет абсолютно твердым. Однако если под действием сил абсолютно твердое тело находилось в равновесии, то, став резиновым, оно теряет равновесное состояние.

§ 1.3. СВЯЗИ И ИХ РЕАКЦИИ

Твердое тело называется *свободным*, если оно может перемещаться в пространстве в любом направлении. В качестве примера свободного тела приведем летящий воздушный шар или ракету в космосе. Твердое тело называется *несвободным*, если его перемещение в пространстве ограничено какими-либо другими телами.

Все тела, которые так или иначе ограничивают перемещение данного тела, называются его *связями*. Например, стул, стоящий на полу (см. рис. 1.1),— несвободное тело; перемещение стула ограничивается полом, для стула пол является связью. Движение шара (см. рис. 1.3) ограничивается нитью; следовательно, для шара связью служит нить.

Как отмечалось выше (см. с. 5), в природе нет абсолютного покоя и тела, стремясь под действием внешних сил перемещаться в пространстве, сами действуют на препятствующие этому перемещению связи. Например, стул (см. рис. 1.1), находясь под действием силы тяжести, давит на пол, а шар (см. рис. 1.3) натягивает нить. Согласно пятой аксиоме, одновременно с возникновением действия тела на связь возникает равная по модулю, но направленная в противоположную сторону сила противодействия связи, приложенная к телу. Действие связи на тело называется силой реакции связи или реакцией связи [от латинского «re...» (против) + «actio» (действие), т. е. ответ на внешнее действие].

Таким образом, на несвободное тело действуют две группы внешних сил: *заданные силы* и *реакции связей*. К заданным относятся все силы, кроме реакций связей. Чаще всего заданные силы являются *активными*, т. е. силами, которые могут вызвать движения тел, например сила тяжести, сила тяги, сила электрического взаимодействия и т. д.

При решении задач статики активные силы, как правило, бывают наперед заданными, а реакции связей неизвестны и их требуется определить. *Задача определения реакций связей — одна из основных задач статики.* Определяя реакции связей, необходимо иметь в виду, что они приложены к телу в точках соприкосновения тела со связью и направлены в сторону, противоположную той, куда связь не дает перемещаться телу. Направление реакции связи зависит от вида связи, ее расположения относительно тела и характера соприкосновения или соединения связи с телом.

Рассмотрим некоторые разновидности связей и правила определения их реакций.

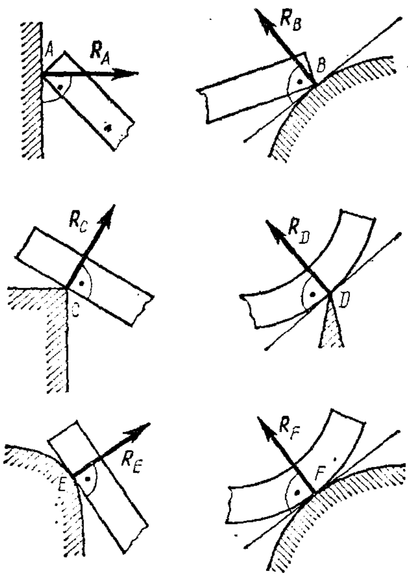

Рис. 1.11

Свободное опирание тела о связь. Примеры этой разновидности связи показаны на рис. 1.11, где тело изображено в виде бруска, а связь заштрихована. Поверхности тела и связи в местах их соприкосновения условимся считать абсолютно гладкими. Во всех случаях связь препятствует движению тела в направлении, перпендикулярном опорной поверхности. Поэтому при опирании тела о связь своим ребром реакция связи направлена перпендикулярно плоской ($\boldsymbol{R}_A$) или криволинейной ($\boldsymbol{R}_B$) поверхности связи; при опирании тела о ребро связи своей поверхностью (плоской или криволинейной) реакция связи направлена перпендикулярно поверхности тела ($\boldsymbol{R}_C$ и $\boldsymbol{R}_D$); при опирании поверхности тела о поверхность связи реакция связи направлена перпендикулярно общей касательной обеих поверхностей ($\boldsymbol{R}_E$ и $\boldsymbol{R}_F$).

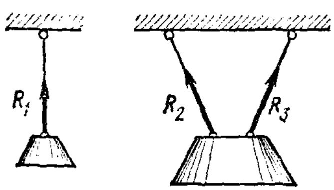

Рис. 1.12

Гибкая связь. Примерами такой связи служат нити или цепи, которые *условно считаем абсолютно нерастяжимыми и невесомыми.* Гибкая связь препятствует передвижению тела только в натянутом состоянии. Поэтому реакции нитей или цепей всегда направлены вдоль самих связей в сторону от тела к связи ($\boldsymbol{R}_1$, $\boldsymbol{R}_2$, $\boldsymbol{R}_3$ на рис. 1.12)

Стержневая связь. Вместо гибкой связи часто употребляют абсолютно жесткие (недеформируемые) и условно принимаемые невесомыми стержни с шарнирными креплениями на концах. Шарнирные крепления позволяют стержню занимать положение, при котором действие на него со стороны удерживаемого тела всегда направлено по прямой, проходящей через оси шарниров (вспомните аксиому 2). Например, груз M, прикрепленный к невесомому криволинейному стержню AB (в точках A и B — цилиндрические шарниры), находится в равновесии в положении, показанном на рис. 1.13, *а*, так как только в этом положении на стержень действует уравновешенная система двух сил: $\boldsymbol{F}_A$ и $\boldsymbol{F}_B$ (рис. 1.13, *б*).

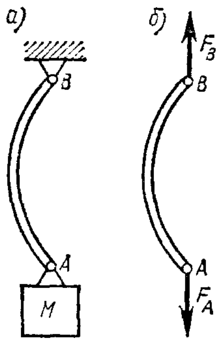

Рис. 1.13

Таким образом, реакции стержневых связей направлены вдоль прямой, проходящей через оси концевых шарниров. Обычно стержни делают прямолинейными и в этих случаях реакции направлены вдоль стержня. Если стержень растянут, то его реакция направлена в сторону от тела к стержню ($\boldsymbol{R}_A$, $\boldsymbol{R}_B$, $\boldsymbol{R}_E$ на рис. 1.14, *а*, *б*). Если стержень сжат, то его реакция направлена в сторону от стержня к телу ($\boldsymbol{R}_C$, $\boldsymbol{R}_D$ на рис. 1.14, *б*). Как видим, в отличие от гибкой связи прямолинейные стержни могут воспринимать со стороны тела не только растягивающие, но и сжимающие силы.

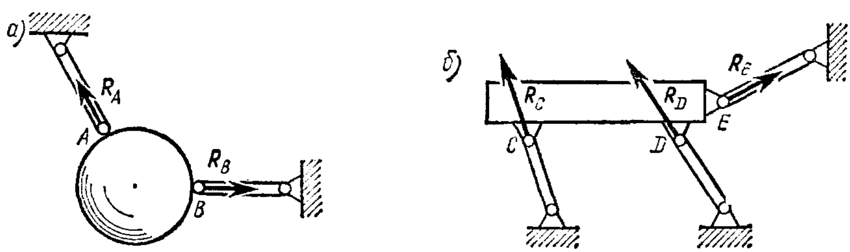

Рис. 1.14

Шарнирно-подвижная опора представляет собой видоизменение свободного опирания. Тело (брус) опирается на опорную поверхность не непосредственно, а через шарнир, поставленный на катки (рис. 1.15, *а*, *б*). Такая опора препятствует перемещению тела только в направлении, перпендикулярном опорной поверхности катков (вдоль опорной поверхности шарнир вместе с прикрепленным к нему телом может перемещаться).

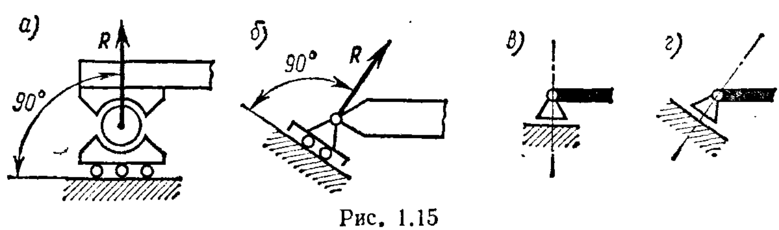

Рис. 1.15

Реакция $\boldsymbol{R}$ шарнирно-подвижной опоры направлена по пересекающей ось шарнира прямой, перпендикулярной его опорной поверхности (рис. 1.15). Условное обозначение шарнирно-подвижной опоры согласно ГОСТ 2.770—68 показано на рис. 1.15, *в*, *г*.

Шарнирно-неподвижная опора (рис. 1.16) дает возможность телу свободно поворачиваться около шарнира, но препятствует поступательному перемещению тела в любом направлении, перпендикулярном оси шарнира. Следовательно, нагруженное тело может действовать на шарнирно-неподвижную опору в любом направлении и направление реакции шарнирно-неподвижной опоры поэтому, как правило, заранее не известно — реакция $\boldsymbol{R}$ (рис. 1.16, *а*) может быть направлена в любом направлении в плоскости, перпендикулярной оси шарнира. Таким образом, при определении реакции шарнирно-неподвижной опоры возникают две неизвестные величины — модуль силы $\boldsymbol{R}$ и ее направление, т. е. угол, образуемый линией действия силы с какой-либо заданной или выбранной линией (осью координат), например угол α на рис. 1.16, *а*. Воспользовавшись тем обстоятельством, что согласно четвертой аксиоме любую силу можно представить в виде двух составляющих, направление которых задано заранее, обычно заменяют искомую реакцию $\boldsymbol{R}$ двумя составляющими $\boldsymbol{R}_x$ и $\boldsymbol{R}_y$, перпендикулярными друг другу (рис. 1.16, *б*). По найденным составляющим $\boldsymbol{R}_x$ и $\boldsymbol{R}_y$ легко найти реакцию $\boldsymbol{R}$ (подробно об этом см. в § 1.4). На рис. 1.16, *в* показано условное изображение шарнирно-неподвижной опоры согласно ГОСТ 2.770—68.

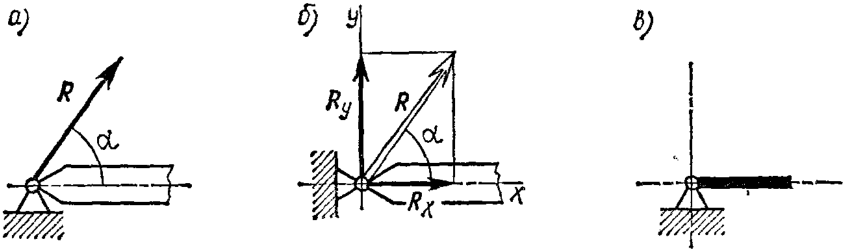

Рис. 1.16

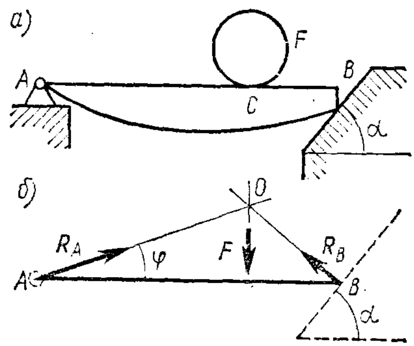

Рис. 1.17

Если же на тело кроме реакции $\boldsymbol{R}$ шарнирно-неподвижной опоры действуют еще две непараллельные силы, то реакция $\boldsymbol{R}$ может быть найдена с помощью теоремы о равновесии трех сил (см. следствие 2 на с. 11).

Представим, что на горизонтально расположенный брус AB, собственной массой которого пренебрегаем, действует вертикальная нагрузка $\boldsymbol{F}$, приложенная в точке C бруса (рис. 1.17, *а*). Левый конец бруса A прикреплен к опоре шарниром, а правый B опирается на гладкую наклонную плоскость.

Изобразим брус схематично отрезком AB, как на рис. 1.17, *б*, и приложим к нему в точке C вертикальную силу $\boldsymbol{F}$. В точке B со стороны наклонной плоскости к брусу приложена ее реакция $\boldsymbol{R}_B$, направленная перпендикулярно плоскости (см. с. 13); линии действия сил $\boldsymbol{F}$ и $\boldsymbol{R}_B$ пересекаются в точке O. Кроме этих сил на брус действует еще одна сила — реакция шарнирно-неподвижной опоры. А так как брус находится в равновесии, то линия действия третьей силы также пройдет через точку O, т. е. реакция $\boldsymbol{R}$ шарнирно-неподвижной опоры направлена вдоль отрезка AO.

Примененный здесь метод рассуждения называется *принципом освобождения тела от связей и замены связей их реакциями*.

Глава 2

ПЛОСКАЯ СИСТЕМА СХОДЯЩИХСЯ СИЛ

§ 1.4. СЛОЖЕНИЕ ДВУХ СИЛ, ПРИЛОЖЕННЫХ В ТОЧКЕ ТЕЛА

Система сил, линии действия которых лежат в одной плоскости и пересекаются в одной точке, называется плоской системой сходящихся сил. Если силы сходящейся системы приложены к разным точкам тела (рис. 1.18, *а*), то, по первому следствию из аксиом статики, каждую силу можно перенести в точку O пересечения линий

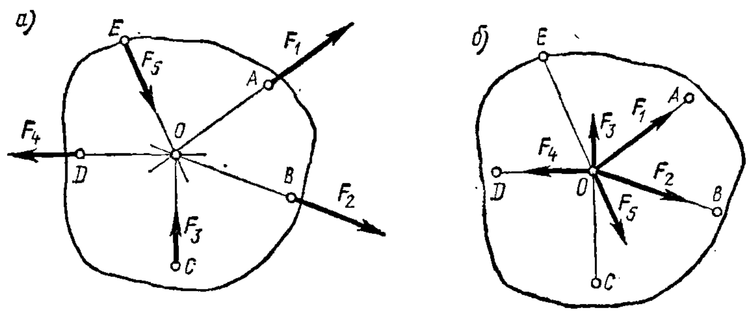

Рис. 1.18

действия и получить эквивалентную систему сил, приложенных к одной точке (рис. 1.18, *б*).

Две силы, приложенные к одной точке тела, образуют простейшую плоскую систему сходящихся сил (две пересекающиеся прямые всегда лежат в одной плоскости). Сложение двух сходящихся сил, или, иначе говоря, определение их геометрической суммы — равнодействующей — производится согласно четвертой аксиоме (см. § 1.2) по правилу параллелограмма.