

Во многих практически интересных случаях равновесия можно пренебрегать как трением скольжения, так и трениями качения и верчения (см. § 4). В других случаях (п. 18) существенное влияние оказывает только трение скольжения, трениями же качения и верчения можно пренебречь, так как эффект их весьма мал по сравнению с эффектом трения скольжения.

Наконец, бывают также случаи, тоже важные для приложений, когда необходимо принимать во внимание трение качения и трение верчения (или одно из них), чтобы увидеть наиболее существенные черты реального явления. Высказанное общее правило как раз и позволяет поставить и исследовать такие вопросы.

§ 7. Возникающее движение паровоза. Наибольшая сила тяги

33. В качестве заключительного приложения законов трения рассмотрим паровоз веса P , установленный на n парах колес, который должен тянуть поезд. Представим себе, что паровоз находится в таком состоянии готовности к движению, какое требуется при нормальной его работе, когда движение его колес представляет собой чистое качение без скольжения.

Силы, действующие на паровоз, находятся в состоянии *предельного равновесия относительно качения*, так что всякая опора оказывает наибольшее сопротивление качению, на которое она способна, т. е. момент реактивной пары имеет для каждой опоры наибольшее возможное для него значение. В то же время, так как мы исключаем возможность скольжения, реакции трения скольжения не будут наибольшими из возможных. Силы, действующие на паровоз, должны удовлетворять основным уравнениям равновесия. Для вывода, который мы имеем в виду, достаточно приравнять нулю результирующую всех *внешних сил*, которые (если пренебречь сопротивлением воздуха) сводятся к следующим:

- 1) вес P паровоза;
- 2) $2n$ реакций рельсов;
- 3) реакция состава, равная и противоположная силе тяги T , приложенной к составу и стремящейся сдвинуть состав, преодолевая трение качения (колес о рельсы).

Если предположим, что путь горизонтален, то вертикальные силы сведутся к весу P и нормальным реакциям N_1, N_2, \dots, N_{2n} отдельных опор (обязательно направленным вверх), поэтому мы должны прежде всего иметь

$$\sum_{i=1}^{2n} N_i = P; \quad (8)$$

можно предположить, что вес равномерно распределен между $2n$ опорами.

Горизонтальные силы, т. е. реакция состава и трение в опорах, также должны уравновеситься, что можно выразить векторным соотношением:

сила тяги $T =$ результирующей сил трения в опорах.

Это делает очевидным одно важное (и на первый взгляд парадоксальное) обстоятельство. Сначала может показаться, что результирующая сил трения, будучи направлена в ту же сторону, как и сила тяги, т. е. в сторону движения, имеет характер движущей силы. В действительности трение скольжения опор не должно рассматриваться ни как движущая сила, ни как сопротивление, так как, поскольку колеса не скользят, скорость точки соприкосновения каждого из них, как лежащей на соответствующей мгновенной оси вращения, равна нулю. Истинным пассивным сопротивлением в рассматриваемом здесь случае является трение качения, которое должно быть преодолено движущим моментом, передаваемым от давления пара посредством поршней, шатунов и т. д. на оси колес.

Далее, из указанного выше условия равновесия, так как абсолютное значение результирующей не может превосходить сумму абсолютных значений составляющих, следует соотношение

$$T \leq \text{сумме абсолютных значений сил трения.}$$

Так как во всякой отдельной опоре, для которой N_i является величиной соответствующей нормальной реакции, и f_i — соответствующим коэффициентом трения, сила трения не может превышать $f_i N_i$, то мы будем иметь

$$T \leq \sum_{i=1}^{2n} f_i N_i$$

или, обозначая через f наибольший из коэффициентов f_i (на практике можно считать $f_i = f$ для всех $2n$ колес) и принимая во внимание равенство (8),

$$T \leq fP.$$

Таким образом, мы приходим к важному результату: *сила тяги паровоза* (т. е. усилие, на которое он способен) *не может превышать некоторой части его веса, выражающейся дробью f , или, точнее, наибольшей силы трения скольжения, которая может возникнуть между ведущими колесами и рельсами.*

Эта дробь, называемая *коэффициентом сцепления*, колеблется между $\frac{1}{3}$ и $\frac{1}{12}$, смотря по состоянию поверхностей соприкосновения; при помощи струи воды или песка коэффициент сцепления может искусственно поддерживаться высоким (вплоть до $\frac{1}{3}$). На практике при нормальной работе паровоза сила тяги составляет около $\frac{1}{7} P$.

Предыдущее неравенство делает понятной причину продолжающегося увеличения веса современных паровозов. Не достаточно увеличить мощность; для того чтобы такое увеличение оказалось полезным, необходим соответствующий вес.

34. Это тем более необходимо, когда речь идет о движении на подъемах.

Если α есть угол наклона к горизонту, то нормальная реакция рельсов будет равна в этом случае $P \cos \alpha$. Наоборот, сила тяги на подъеме будет больше: вместо ее значения T , которое мы при прочих равных условиях имели бы на горизонтальном пути, мы должны подставить теперь сумму $T + q \sin \alpha$, где через q обозначен полный вес всего поезда, включая и локомотив.

Эти результаты можно получить тем же способом, который был указан в предыдущих пунктах: достаточно спроектировать первое основное условие равновесия (результатирующая равна нулю) на нормаль к плоскости дороги и на самую плоскость, имея при этом в виду, что нормаль и плоскость не будут уже более соответственно вертикалью и горизонтальной плоскостью.

УПРАЖНЕНИЯ

1. Теория простых машин. Проверить так называемое золотое правило механики: „что выигрывается в силе, то теряется в пути“, или, точнее, „если отвлечься от трения, то элементарная работа активных сил на всяком перемещении системы из положения равновесия равна нулю“. — Теория весов, См., например, Levy, *Éléments de cinématique et de mécanique*, Paris, 1902, XXII. Эти вопросы рассматриваются также и в тексте (гл. XVI, § 5) как приложение принципа виртуальных работ. Интересно поэтому показать, что те же самые результаты можно также установить более элементарным и прямым путем, обращаясь только к общим предпосылкам механики и статики твердого тела.

2. Показать, что если несколько сил, приложенных к твердому телу, уравновешиваются или, если рассматривать более общий случай, эквивалентны паре сил, то центр тяжести равных масс, расположенных в точках приложения сил, будет также и центром тяжести других масс, тоже равных между собой, но расположенных в свободных концах тех же самых сил.

3. На твердый тетраэдр действуют четыре силы, нормальные к его граням, пропорциональные площадям граней и направленные все или внутрь, или наружу тетраэдра. Показать, что равновесие будет существовать, если точка приложения каждой из сил является центром тяжести перпендикулярной к ней грани или вершиной, противоположной такой грани (ср. упражнение 18 гл. I).

4. Распространить свойство, указанное в предыдущем упражнении, на какой угодно многогранник, а также, переходя к пределу, на твердое тело, ограниченное как плоскими, так и кривыми поверхностями. См. Biscopini, *Esercizi e complementi di meccanica razionale*, Milano, 1927, стр. 254—256.