

**Лекция №4**

**Тема: СИЛА ТЯГИ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗОВ**

*Вопросы для рассмотрения:*

1. Общие сведения о силе тяги.
2. Перемещение сосредоточенных грузов.
3. Общие положения перемещение распределенных грузов.
4. Перемещение прямолинейного отрезка.
5. Сила тяги на поворотных пунктах.
6. Сила тяги при перемещении последовательной цепи элементов и натяжения тягового органа.
7. Сила тяги приводного блока.

**Раздаточный материал:**

1. К определению силы тяги при перемещении сосредоточенных грузов.
2. Схема к определению силы тяги при перемещении распределенных грузов.
3. Тяговое усилие приводного блока.

**5.1. Общие замечания.**

Силой тяги при рассмотрении средств транспорта называют внешнюю силу, которую необходимо реализовать машиной для осуществления перемещения (транспортирования) груза. Под грузом в этом случае часто понимают не только непосредственно тело, которое необходимо переместить, но и все движущиеся с ним части (детали, элементы) транспортной установки, например вагонетку, цепь со скребками, ленту и др.

Реализуется сила тяги у разных машин по-разному: путем сцепления (трения) ведущих колес с дорогой, сцепления (трения) ленты о приводной барабан и др.

Источником силы тяги на транспортных машинах являются двигатели: электрические, внутреннего сгорания, пневматические, инерционные и др.

Каждый вид двигателя имеет свою характеристику и вместе с передачей (трансмиссией) формирует закономерности изменения силы тяги в зависимости от изменения режимов транспортирования.

В транспортных машинах сила тяги необходима для:

- преодоления различного рода сопротивлений движению, связанных с трением качения, скольжения, перемешивания сыпучего груза и др.;
- преодоления сил инерции в период разгона или торможения;
- преодоления сил тяжести при транспортировании по наклонному пути.

Первая из перечисленных сил всегда имеет место при транспортировании, другая и третья могут и не быть.

Ниже рассмотрены основные задачи определения необходимых значений силы тяги, а также способы ее реализации на различных транспортных установках.

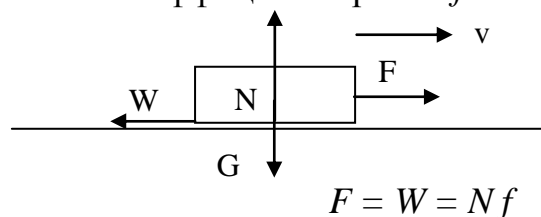
Отдельно рассмотрена задача определения мощности на валу исполнительного органа машины и мощности двигателя ее.

## 5.2. Перемещение сосредоточенных грузов.

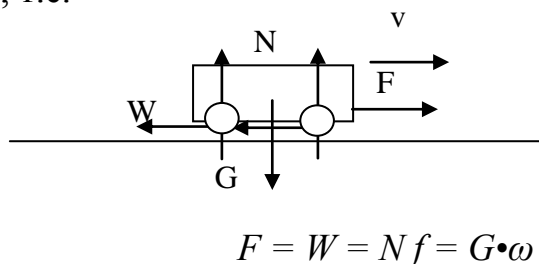
Сосредоточенные грузы (вагонетки, оборудование, крепление и др.) перемещаются в большинстве случаев на колесах (или катках), или скольжением по почве, настилу, направляющим и др.

Сила тяги на перемещение таких грузов определяется (находится) из аналитического выражения, связывающего все действующие силы и называемого уравнением движения (уравнением равновесия при движении). При составлении уравнения размерами груза пренебрегают и считают, что вся его масса сосредоточена в одной точке.

При перемещении груза весом  $G$  скольжением по горной плоскости с постоянной скоростью  $V$  сила тяги  $F$  равна силе трения  $W$ , т.е. произведению нормальной реакции  $N$  на коэффициент трения  $f$ .



При перемещении груза любым способом на колесах (катках, роликах) сила тяги  $F$  также равна  $W$ , т.е.



$\omega$  – коэффициент сопротивления движению.

Формально  $\omega$  аналогичен  $f$ , т.е. равен отношению силы трения к нормальной реакции, существо же этих коэффициентов различно. При скольжении  $W$  зависит только от свойств трущихся поверхностей. Сопротивление движению учитывает состояние трущихся поверхностей, сопротивления движению среды, диаметр колеса, вязкость смазки и определяется экспериментально.

На рис. 5.1, а) и б) показаны силы, действующие на сосредоточенный груз при перемещении его вверх или вниз со скоростью  $v \neq const$  по плоскости, наклоненной к горизонту под углом  $\beta$  (общий случай движения). Сила тяжести  $G$  разложена на составляющие:

$G' = G \cdot \cos \beta$  – нормальную, перпендикулярную плоскости движения;

$T = G \cdot \sin \beta$  – продольную, параллельную плоскости движения.

Эти две силы своего направления не меняют в зависимости от направления движения (вверх или вниз движется тело).

$P_u = m \cdot a = \frac{G}{g} a$  – сила инерции; направление ее определяется знаком

ускорения (ускоренное движение  $+a$ , замедленное  $-a$ ) и не зависит от направления движения.

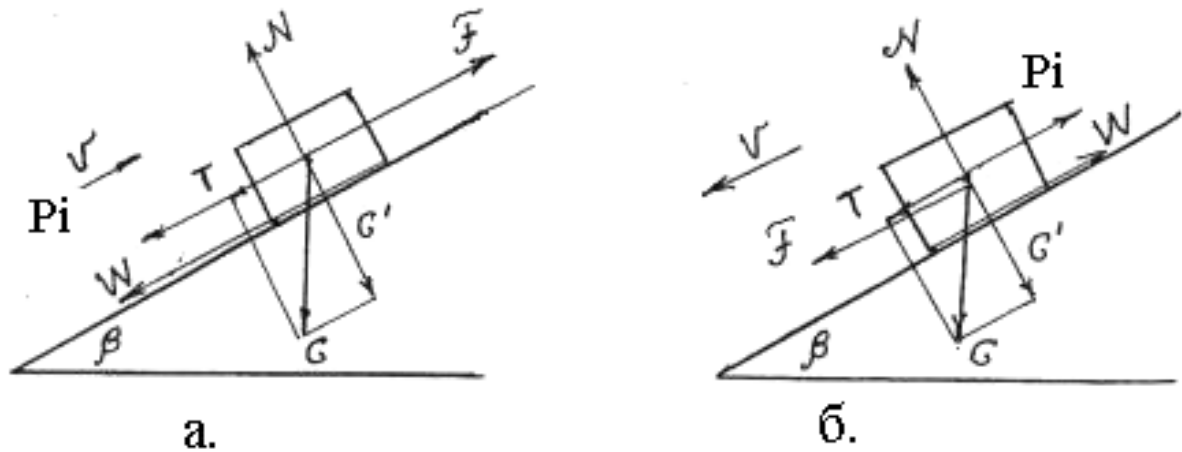


Рис. 5.1. К определению силы тяги при перемещении сосредоточенных грузов

$W = w \cdot G \cdot \cos \beta$  – сила сопротивления движению от трения. При перемещении скольжением коэффициент сопротивления движению  $w$  равен коэффициенту трения скольжения,  $w = f$ . При перемещении на колесах  $w$  учитывает все виды трения, какие при этом имеют место.

Оба коэффициента определяются только экспериментально путем измерений силы тяжести, силы тяги (сопротивления) при перемещении по горизонтальной плоскости  $\beta = 0$  с  $v = const$ , ( $a = 0$ ).

Сила сопротивления от трения  $W$  всегда направлена в сторону, противоположную движению.  $F$  – сила тяги – внешняя сила, приложенная к телу для осуществления его движения.

В теоретической механике известны два метода решения задач на равновесие сил: метод проектирования сил на координатные оси и метод возможных перемещений, когда приравнивается нулю сумма произведений возможных перемещений на проекцию сил на эти перемещения. Поскольку возможные перемещения всех точек груза считаются одинаковыми, следует правило силовых расчетов: сумма проекций сил на траекторию движения равна нулю. За положительные направления принимается в этих случаях направление скорости (направление движения).

В рассматриваемом случае на траекторию движения (линию, параллельную плоскости движения) проектируются силы  $F, T, W, P_u$ . В случае перемещения на колесах (катках) сила инерции перемещающихся частей определяется из выражения:

$$F_u = m \cdot a \cdot \delta = \frac{G}{g} \cdot a \cdot \delta, \quad (5.1)$$

где  $\delta$  – коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся масс, т.к. они участвуют в двух движениях – поступательном и вращательном, что при  $v \neq const$  увеличивает инерцию поступательного движения системы.

Из рис. 5.1, а) уравнение равновесия: (уравнение движения):

$$F - T - P_u - W = 0, \quad (5.2)$$

откуда сила тяги

$$F = W + T + P_u. \quad (5.3)$$

Из рис. 5.1, б):

$$F = W - T + P_u, \quad (5.4)$$

объединяя оба случая в одно выражение имеем:

$$F = W \pm T + P_u. \quad (5.5)$$

Знак + ставится при движении вверх, -- вниз. Записав значение каждой силы имеем:

$$F = G \left( w \cos \beta \pm \sin \beta + \frac{\delta \cdot a}{q} \right), \text{ н}, \quad (5.6)$$

или

$$F = m \cdot g \left( w \cos \beta \pm \sin \beta + \frac{\delta \cdot a}{q} \right), \text{ н}.$$

### 5.3. Перемещение распределенных грузов.

#### 5.3.1. Общие положения.

Гибкий тяговый орган средств транспорта (лента, цепь, канат) с присоединенными к нему грузонесущими устройствами и сыпучим грузом представляет собой распределенный груз, характеризующийся тем, что он: может изгибаться, образуя криволинейную траекторию; имеет длину, несоизмеримо большую по сравнению с другими размерами; в любом сечении всегда растянут.

Рассмотрим движущийся изогнутый распределенный груз. Вырежем сечениями *A-A* и *B-B* (рис. 5.2, а) отрезок 1-2 распределенного груза – тягового органа.

Заменяем действие отрезанных частей в сечениях растягивающими силами  $F_1$  и  $F_2$ , которые назовем натяжениями. Они действуют «от сечения», поскольку тяговый орган всегда растянут. При движении изогнутого отрезка тягового органа, кроме сил  $F_1$  и  $F_2$ , на них (по длине) действуют силы сопротивления от трения, от груза, от продольной составляющей силы тяжести и др. Приведем эти силы к одной, в общем случае произвольно направленной силе  $P$  (их может быть сколько угодно), которую раскладываем на две составляющие: тангенциальную  $P_\tau$  и нормальную  $P_n$ . За ось отсчета сил принимаем траекторию тягового органа (пунктир) с положительным направлением в сторону движения.

Уравнения равновесия отрезка 1-2 (уравнение движения) (рис. 5.2, а):

$$F_2 - F_1 - P_\tau = 0.$$

Заменяем  $F_1$  и  $F_2$  их равнодействующей  $F_{2-1}$  (рис. 5.2, б) – силой тяги, равной разности натяжения по концам отрезка:

$$F_{2-1} = F_2 - F_1 = P_\tau. \quad (5.7)$$

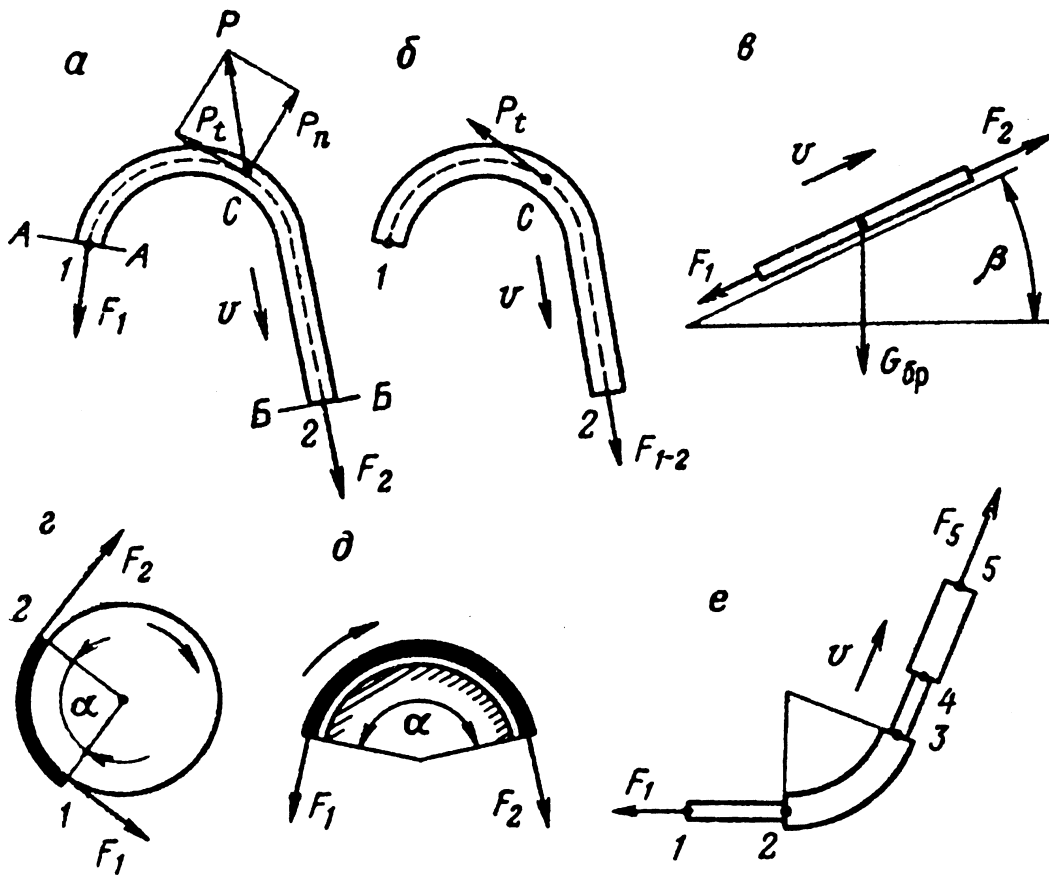


Рис. 5.2. К определению силы тяги при перемещении распределенных грузов.

В (5.7) подставляют абсолютную величину сил  $F_1$  и  $F_2$ , поскольку их знак уже учтен.  $F_{2-1}$  может получиться как положительной, так и отрицательной.

Траектория движения тягового органа (трасса) в общем случае представляет собой комбинацию прямолинейных и криволинейных участков. Криволинейные участки, в свою очередь, делятся на собственно криволинейные и на поворотные пункты. Поворотный пункт – криволинейный участок, на котором из-за небольшой длины массой тягового органа можно пренебречь.

Собственно криволинейные участки могут быть как в плане, так и в профиле. Криволинейность профиля в тех пределах, которые встречаются на практике, учитывается следующим образом. Конвейер с плавным изменением профиля для расчета сопротивлений (силы тяги) заменяют прямолинейным конвейером с углом наклона к горизонту, равным среднему углу наклона конвейера. Если конвейер имеет резкий излом профиля, то этот излом считают как поворотный пункт. Следовательно, в таких случаях, специальных задач сопротивления от криволинейного профиля решать не приходится. Сопротивление криволинейных в плане участков необходимо учитывать только при расчете пластинчатых конвейеров. Т. о. основными задачами являются определение сопротивления (силы тяги) прямолинейных участков трассы и сопротивление поворотных пунктов.

### 5.3.2. Перемещение прямолинейного отрезка.

Постановка задачи: Дано (рис. 5.2, в):  $l$  – длина отрезка, м;  $q$  – линейная (погонная) масса полезного груза, кг/м;  $q_0$  – то же для мертвых масс (тяговый орган с присоединенными к нему частями), кг/м;  $\omega$  и  $\omega_0$  – коэффициенты сопротивления движению соответственно для полезных и мертвых масс;  $\beta$  – угол наклона. Определить  $F_{2-1} = F_2 - F_1$ , – силу тяги для перемещения отрезка.

Определение силы тяги не отличается от определения силы тяги для перемещения сосредоточенных грузов:

$$F_{2-1} = lqg(\omega \cos \beta \pm \sin \beta) + lq_0g(\omega_0 \cos \beta \pm \sin \beta), \text{ н.} \quad (5.8)$$

Если полезный и мертвый грузы перемещаются как одно целое (например, в пластинчатом конвейере), т.е.  $\omega = \omega_0$ , то

$$F_{2-1} = lq_{\bar{p}}g(\omega \cos \beta \pm \sin \beta), \text{ н.} \quad (5.9)$$

где  $q_{\bar{p}}$  – суммарная погонная (линейная) масса полезного и мертвого грузов, кг/м.

### 5.3.3. Сила тяги на поворотных пунктах.

Постановка задачи. Дано (рис. 5.2, г, д):  $F_1$  –натяжение до поворотного пункта;  $\alpha$  – угол поворота, рад. Определить  $F_2$  –натяжение после поворотного пункта и  $F_{2-1}$  – силу тяги.

Из опытов установлено, что

$$F_2 = k_n F_1, \quad (5.10)$$

где  $k_n$  – опытный коэффициент сопротивления поворотного пункта.

Для неподвижной направляющей (рис. 5.2, д) по формуле Эйлера

$$k_n = e^{\omega'' \alpha},$$

где  $\omega''$  – коэффициент сопротивления перемещению по криволинейной направляющей.

Для отклоняющих вращающихся барабанов, блоков (рис. 5.2, г) с подшипниками качения при  $\alpha = 180^\circ$ ;  $k_n = 1,01 - 1,02$  – для лент и канатов;  $k_n = 1,1 - 1,15$  для цепей. Сопротивление блоков, барабанов складывается из трения в подшипниках и сопротивления жесткости на изгиб. Для цепей последнее вызывается трением в шарнирах цепи, возникающем при относительном повороте звеньев цепи при набегании и сбегании с блока, звездочки. Для лент и канатов сопротивление жесткости объясняется тем, что энергия, идущая на сгибания при набегании, не отдается полностью при выпрямлении тягового органа в точке сбегания. Сила тяги поворотного пункта

$$F_{2-1} = F_2 - F_1 = F_1(k_n - 1), \quad (5.11)$$

т.е. сила тяги пропорциональна натяжению  $F_1$ , для любых типов поворотных пунктов, что является характерным отличием от прямолинейных участков тягового органа.

5.3.4. *Сила тяги при перемещении последовательной цепи элементов и натяжения тягового органа.*

Постановка задачи. Дано: последовательная цепь элементов гибкого тягового органа (рис. 5.2, е), точки сопряжения которых (сечения) нумеруются по ходу движения;  $F_1$  – натяжение в первой (начальной) точке;  $F_{2-1}, F_{3-2}, F_{4-3}, F_{5-4}$  – силы тяги элементов последовательной цепи. Определить натяжения в точках  $F_2, F_3, F_4, F_5$  и общую силу тяги  $F_{5-1}$  для перемещения всей цепи элементов. В соответствии с (5.7)

$$F_2 = F_1 + F_{2-1} . \quad (5.12)$$

Выражение (5.12) называют формулой расчета обходом контура: натяжение в последующей точке (в любой точке) равно натяжению в предыдущей (по ходу) точке плюс сила тяги на перемещение участка между этими точками. Применяя (5.12) последовательно от точки к точке имеем:

$$\begin{aligned} F_2 &= F_1 + F_{2-1} , \\ F_3 &= F_2 + F_{3-2} , \\ F_4 &= F_3 + F_{4-3} , \\ F_5 &= F_4 + F_{5-4} = F_1 + F_{2-1} + F_{3-2} + F_{4-3} + F_{5-4} , \end{aligned} \quad (5.13)$$

т.е. сила тяги последовательной цепи элементов равна сумме сил тяги отдельных элементов. Расчет можно вести и в обратном ходу тягового органа направлении:

$$F_1 = F_2 - F_{1-2} . \quad (5.14)$$

В выражениях (5.12), (5.13), (5.14) натяжения тягового органа  $F_1$  и  $F_2$  подставляют по абсолютной величине (по модулю), т.к. их знак уже учтен, а силы тяги  $F_{2-1}, F_{3-2}$  и т.д. – со своими знаками. Если натяжение в каком-то сечении получается с отрицательным знаком, то это означает, что натяжение действует «к сечению», т.е. тяговый орган сжат, чего не может быть. Нужно увеличить натяжение до такой степени, чтобы во всех сечениях обеспечить растяжение.

5.3.5. *Сила тяги приводного блока.*

Гибкий тяговый орган транспортного средства может иметь замкнутый или разомкнутый контур. Последний является частным случаем первого (натяжение одной из ветвей приводного блока равно нулю – разомкнутый контур), поэтому, рассмотрим транспортное средство (рис. 5.3), гибкий тяговый орган которого замкнут (представляет собой бесконечную ленту, цепь, канат). Рассечем контур замкнутого тягового органа на приводном блоке сечением  $A-A$  (рис. 5.3, а). Из условия равновесия правой от сечения части органа (рис. 5.3, б) тяговое усилие приводного блока, т. е. сила, приложенная к тяговому органу со стороны приводного блока

$$F_{H-C} = F_H - F_C , \quad (5.15)$$

где  $F_H$  и  $F_C$  – натяжения набегающей и сбегающей ветвей.

При двигательном режиме  $F_H > F_C$  и  $F_{H-C}$  положительно, т. е. приложено к тяговому органу по направлению движения (рис. 5.3, б): при тормозном режиме  $F_H < F_C$  и  $F_{H-C}$  отрицательно, т. е. действует на тяговый орган в направлении, обратном направлению движения (рис. 5.3, в).

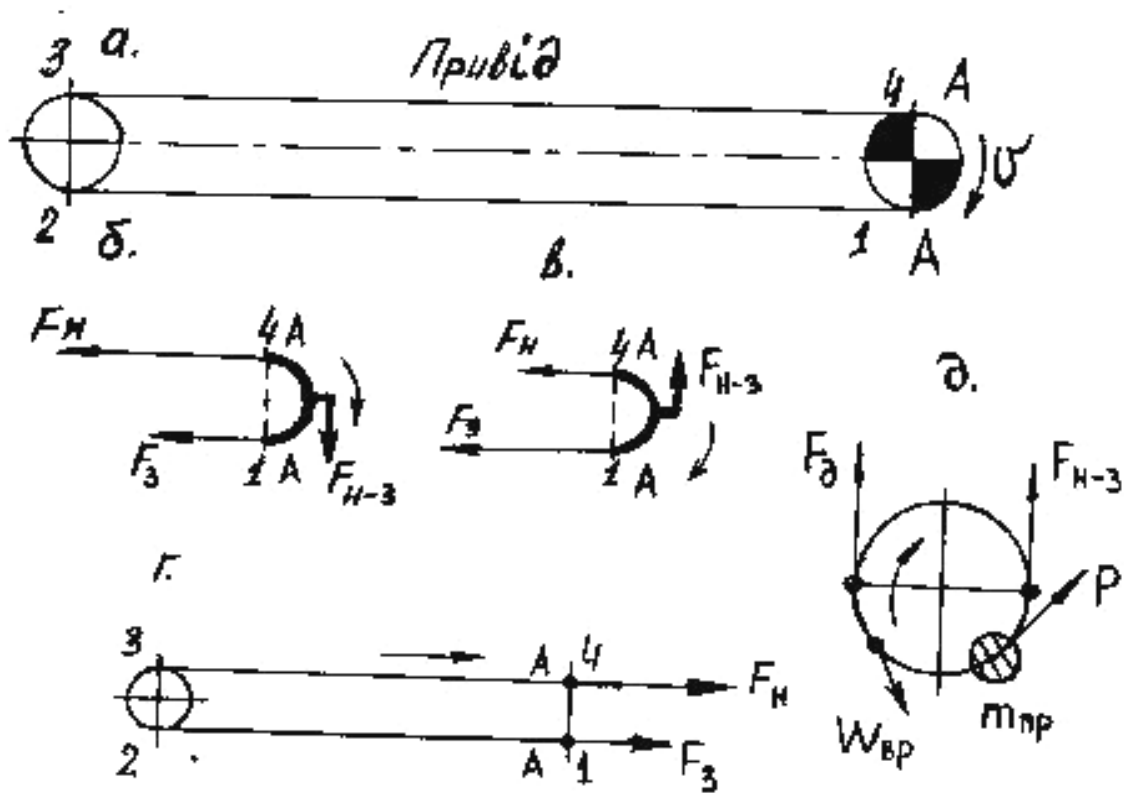


Рис. 5.3. Тяговое усилие приводного блока

Из условия равновесия левой от сечения А-А части (рис.5.3, г) в соответствии с (5.13) и (5.14)

$$F_4 - F_1 = F_H - F_C = F_{H-C} = F_{1-2} + F_{2-3} + F_{3-4}, \quad (5.16)$$

т.е. тяговое усилие приводного блока помимо (5.15) можно также определять как сумму сил тяги всех элементов замкнутого контура тягового органа. Для краткости  $F_{H-C}$  будем именовать тяговым усилием на ободе приводного барабана (звездочки, шкива трения) в отличие от термина «сила тяги», относящегося к силе для перемещения какого-либо одного элемента установки.

### Рекомендуемая литература:

1. Біліченко М.Я. Основи теорії та розрахунки транспортних засобів механізації переміщення вантажів шахт. Навчальний посібник - Дніпропетровськ: НГУ, 2002. – 102с. (стр. )
2. Транспорт на горных предприятиях / Под ред.. проф, Б.Л. Кузнецова. М.: Недра, 1976, - 552 с. (стр. )
3. Основные положения по проектированию подземного транспорта для новых и действующих угольных шахт. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1986, - 355 с. (стр. )
4. Шахтный транспорт шахт и рудников: Справочник / Под ред. Г.Я. Пейсаховича, И.Л. Ремизова. - М.: Недра, 1985. - 565 с. (стр. )



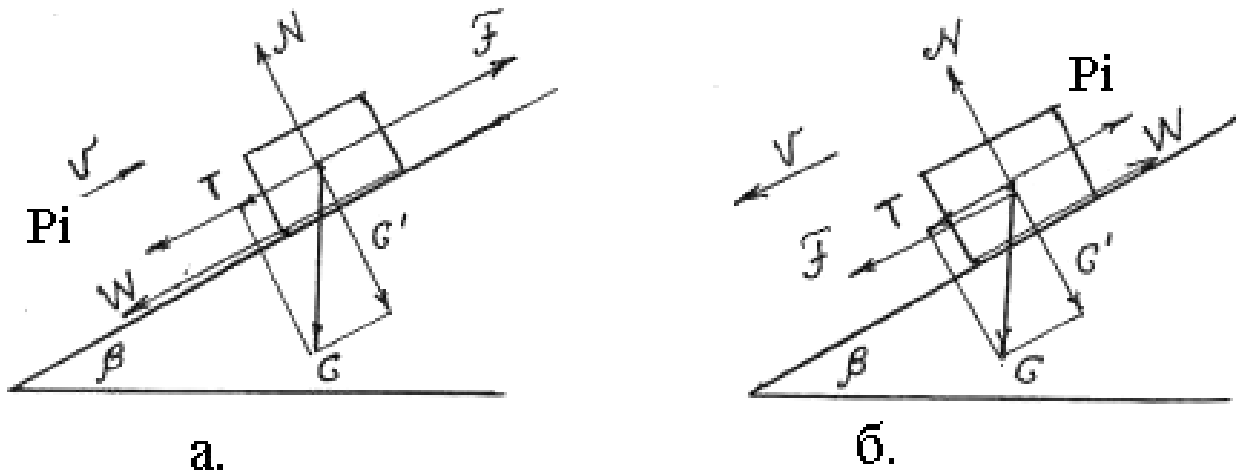


Рис. 5.1. К определению силы тяги при перемещении сосредоточенных грузов

Сила тяжести  $G$  разложена на составляющие:

$G' = G \cdot \cos \beta$  – нормальную, перпендикулярную плоскости движения;

$T = G \cdot \sin \beta$  – продольную, параллельную плоскости движения.

$P_u = m \cdot a = \frac{G}{g} a$  – сила инерции; направление ее определяется знаком

ускорения (ускоренное движение  $+a$ , замедленное  $-a$ ) и не зависит от направления движения.

$W = w \cdot G \cdot \cos \beta$  – сила сопротивления движению от трения.

$$F_u = m \cdot a \cdot \delta = \frac{G}{g} \cdot a \cdot \delta,$$

Из рис. 5.1, а) уравнение равновесия: (уравнение движения):

$$F - T - P_u - W = 0,$$

$$F = W + T + P_u.$$

Из рис. 5.1, б):

$$F = W - T + P_u,$$

объединяя оба случая в одно выражение имеем:

$$F = W \pm T + P_u.$$

Знак  $+$  ставится при движении вверх,  $-$  – вниз.

$$F = G \left( w \cos \beta \pm \sin \beta + \frac{\delta \cdot a}{g} \right), \text{ н.}$$

или

$$F = m \cdot g \left( w \cos \beta \pm \sin \beta + \frac{\delta \cdot a}{g} \right), \text{ н.}$$

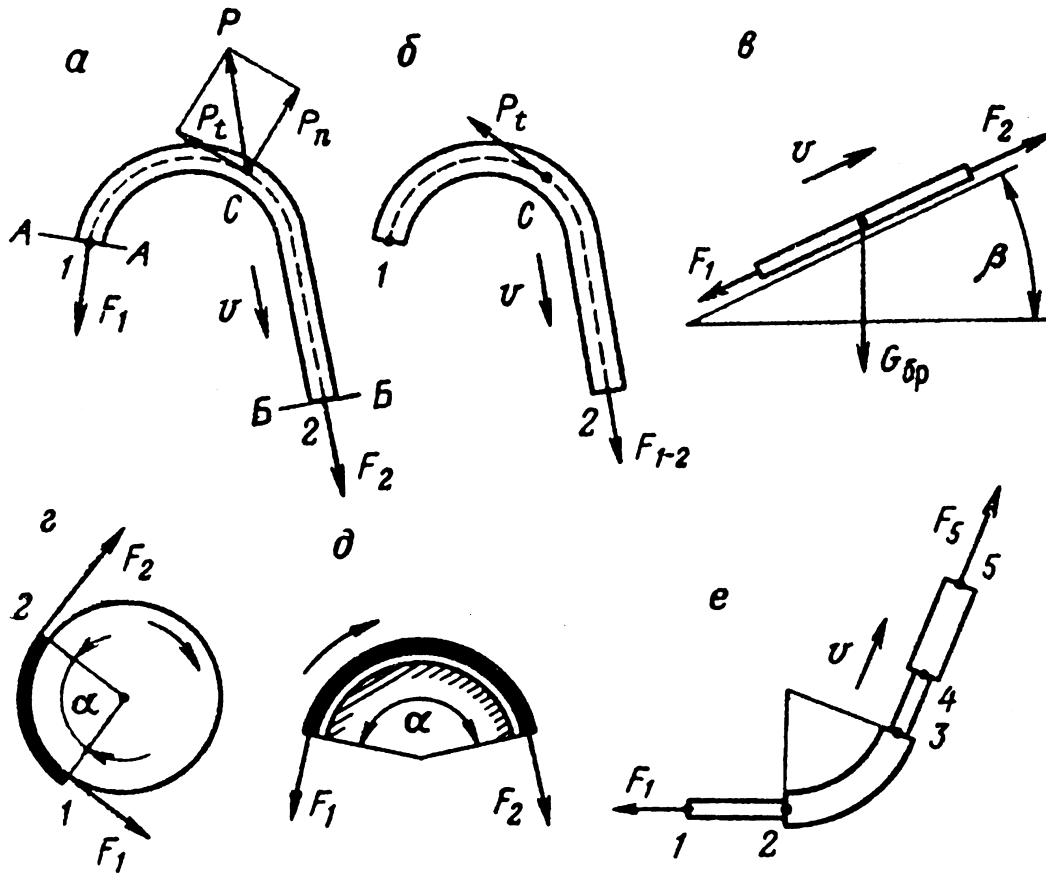


Рис. 5.2. К определению силы тяги при перемещении распределенных грузов

*Перемещение прямолинейного отрезка.*

$$F_{2-1} = lqg (\omega \cos \beta \pm \sin \beta) + lq_0g (\omega_0 \cos \beta \pm \sin \beta), \text{ н.}$$

Если полезный и мертвый грузы перемещаются как одно целое (например, в пластинчатом конвейере), т.е.  $\omega = \omega_0$ , то

$$F_{2-1} = lq_{\delta p}g (\omega \cos \beta \pm \sin \beta), \text{ н.}$$

*Сила тяги на поворотных пунктах.*

$$F_2 = k_n F_1,$$

$$k_n = e^{\omega''\alpha} \text{ - формула Эйлера}$$

$$F_{2-1} = F_2 - F_1 = F_1 (k_n - 1),$$

*Сила тяги при перемещении последовательной цепи элементов и натяжения тягового органа.*

$$F_2 = F_1 + F_{2-1},$$

$$F_3 = F_2 + F_{3-2},$$

$$F_4 = F_3 + F_{4-3},$$

$$F_5 = F_4 + F_{5-4} = F_1 + F_{2-1} + F_{3-2} + F_{4-3} + F_{5-4},$$

т.е. сила тяги последовательной цепи элементов равна сумме сил тяги отдельных элементов.

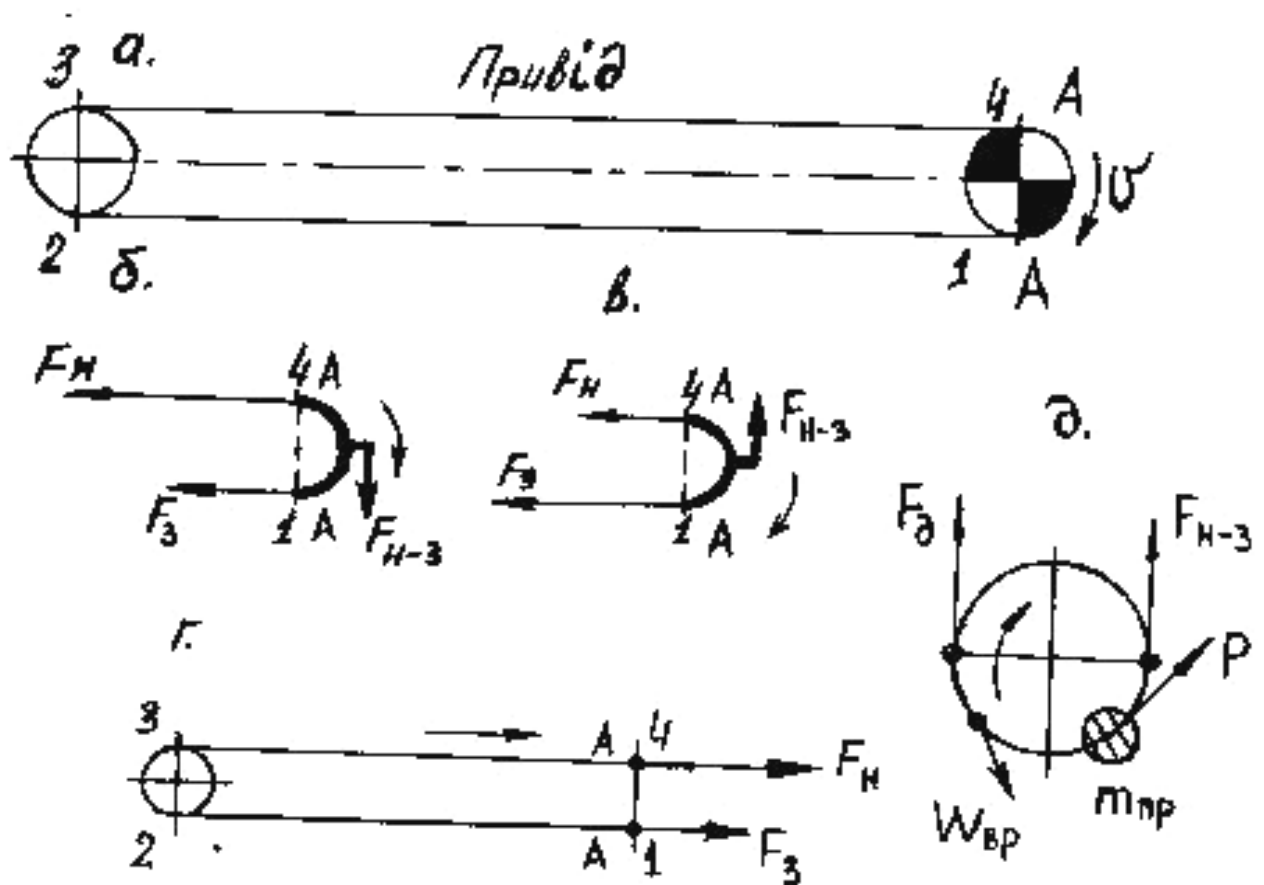


Рис. 5.3. Тяговое усилие приводного блока

$$F_{H-C} = F_H - F_C,$$

где  $F_H$  и  $F_C$  – натяжения набегающей и сбегающей ветвей.

При двигательном режиме  $F_H > F_C$  и  $F_{H-C}$  положительно, т. е. приложено к тяговому органу по направлению движения (рис. 5.3, б): при тормозном режиме  $F_H < F_C$  и  $F_{H-C}$  отрицательно, т. е. действует на тяговый орган в направлении, обратном направлению движения (рис. 5.3, в).

Из условия равновесия левой от сечения А-А части (рис.5.3, г):

$$F_4 - F_1 = F_H - F_C = F_{H-C} = F_{1-2} + F_{2-3} + F_{3-4},$$

т.е. тяговое усилие приводного блока можно также определять как сумму сил тяги всех элементов замкнутого контура тягового органа.