

## ВВЕДЕНИЕ

Теорема об изменении кинетической энергии является наиболее важной и универсальной теоремой, позволяющей изучить любое движение тел и механической системы в целом. С помощью данной теоремы можно количественно оценить преобразование механического движения в машинах в другие формы движения: тепловые, электрические и т. д.

В результате изучения теоремы необходимо: усвоить методику и основные формулы определения кинетической энергии тел и механической системы, работы и мощности сил; научиться использовать основные выводы и положения для определения силовых и кинематических характеристик системы.

### СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарг, С. М. Краткий курс теоретической механики / С. М. Тарг. – Москва : Высш. шк., 2010. – 416 с.
2. Яблонский, А. А. Курс теоретической механики. Динамика / А. А. Яблонский, В. М. Никифорова. – 5-е изд. – Москва : Высш. шк., 1984. – 402 с.
3. Добронравов, В. В. Курс теоретической механики / В. В. Добронравов, Н. Н. Никитин. – Москва : Высш. шк., 1983. – 575 с.
4. Мищерский, И. В. Сборник задач по теоретической механике / И. В. Мищерский. – Москва : Наука, 1986. – 418 с.

## 1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ С ПОМОЩЬЮ ТЕОРЕМЫ ОБ ИЗМЕНЕНИИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СИСТЕМЫ

Рассмотрим методику применения теоремы об изменении кинетической энергии системы в интегральной, или конечной, форме к исследованию движения механических систем.

Теорема об изменении кинетической энергии системы в интегральной форме формулируется так: изменение кинетической энергии механической системы при ее перемещении из одного положения в другое равно сумме работ всех внешних и внутренних сил, действующих на систему на этом перемещении.

$$T - T_0 = \sum_{k=1}^n A(F_k^e) + \sum_{k=1}^n A(F_k^i), \quad (1)$$

где  $T_0$  и  $T$  – кинетическая энергия системы в начальном и конечном положениях;

$\sum_{k=1}^n A(F_k^e) + \sum_{k=1}^n A(F_k^i)$  – сумма работ всех внешних  $F_k^e$  и внутренних  $F_k^i$  сил, действующих на систему.

Кинетическая энергия системы равна сумме кинетических энергий тел, входящих в систему:

$$T = \sum_{k=1}^n T_k = T_1 + T_2 + \dots + T_n, \quad (2)$$

где  $T_1, T_2, \dots, T_n$  – кинетическая энергия каждого тела, входящего в механическую систему.

Кинетическая энергия твердого тела вычисляется по формулам:

1) при поступательном движении тела

$$T = \frac{1}{2} mV^2, \quad (3)$$

где  $m$  – масса тела;

$V$  – скорость любой его точки;

2) при вращении тела вокруг неподвижной оси  $z$

$$T = \frac{1}{2} I_z \omega^2, \quad (4)$$

где  $I_z$  – момент инерции твердого тела относительно оси вращения  $z$ ;

$\omega$  – угловая скорость тела;

3) при плоском движении тела

$$T = \frac{1}{2} mV_c^2 + \frac{1}{2} I_{z_c} \omega^2, \quad (5)$$

где  $V_c$  – скорость центра масс тела;

$I_{z_c}$  – момент инерции тела относительно оси  $z$ , проходящей через его центр масс и перпендикулярной неподвижной плоскости.

Работа силы, постоянной по модулю и направлению, на конечном прямолинейном перемещении определяется скалярным произведением вектора силы и вектора перемещения точки ее приложения, т. е. работа равна произведению модуля силы, модуля перемещения данной точки и косинуса угла между ними:

$$A_F = FS \cos(\bar{F} \wedge \bar{S}). \quad (6)$$

Работа силы может быть положительной, отрицательной или равной нулю. Это зависит от косинуса угла между направлениями вектора силы  $\bar{F}$  и вектора перемещения  $\bar{S}$  точки приложения силы.

Если вектор силы  $\bar{F}$  образует острый угол с направлением вектора перемещение  $\bar{S}$ , то работа силы положительна, если угол тупой – работа отрицательна, а если угол равен  $90^\circ$ , то работа силы равна нулю.

Работа постоянного момента силы  $M$ , приложенного к твердому телу, вращающемуся вокруг неподвижной оси, равна взятому с соответствующим знаком произведению этого момента на конечное изменение угла поворота  $\varphi$  тела.

$$A_M = \pm M\varphi. \quad (7)$$

Работа положительна, если направление момента силы совпадает с направлением угла поворота тела, и отрицательна, если момент силы противоположен углу поворота тела.

Если механическая система состоит из абсолютно твердых тел и на них наложены идеальные связи, такая механическая система называется неизменяемой. Сумма работ внутренних сил такой системы равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n A(F_k^i) = 0. \quad (8)$$

Тогда для неизменяемой механической системы равенство (1), выражающее теорему об изменении кинетической энергии в интегральной форме, имеет вид:

$$T - T_0 = \sum_{k=1}^n A(F_k^e). \quad (9)$$

Теорема об изменении кинетической энергии механической системы в интегральной форме получила широкое распространение при изучении движения механических систем, механизмов и машин. Она применяется в тех случаях, когда в число данных и искомых величин входят инерционные характеристики системы (массы и моменты инерции), скорости (линейные или угловые) в начальный и конечный момент времени, силы и моменты пар сил, перемещения (линейные или угловые).

Решение задач с помощью теоремы об изменении кинетической энергии системы в интегральной (конечной) форме рекомендуется проводить в такой последовательности:

1. Изобразить механическую систему тел в произвольном промежуточном положении.

2. Если направление движения тел не задано, то предварительно выбрать его какую-нибудь сторону.

3. Освободить систему от внешних связей, изобразить на рисунке все внешние и внутренние силы и реакции связей (в случае неизменяемой системы – только внешние силы и реакции связей).

4. Определить сумму работ всех внешних и внутренних сил и реакций связей на перемещениях точек системы (в случае неизменяемой системы – только сумму работ внешних сил и реакций связей).

5. Выразить все перемещения точек системы и углы поворотов тел, входящие в работу сил, через одно перемещение (заданное или которое нужно определить) и вычислить сумму работ всех сил, подставив численные значения.

6. Если сумма работ всех сил оказалась отрицательной, то необходимо изменить направление движения тел системы, пересмотреть направление всех реакций и заново подсчитать работу всех сил. Если и в этом случае работа сил окажется отрицательной, следовательно, под действием заданных сил система находится в состоянии покоя.

7. Определить кинетическую энергию системы материальных тел в конечном и начальном положении системы.

8. Выразить все скорости, входящие в кинетическую энергию тел, через одну (заданную или которую нужно определить) и вычислить кинетическую энергию всей механической системы, подставив численные значения параметров, в нее входящих.

9. Воспользовавшись результатами вычислений пунктов 5 и 8, записать теорему об изменении кинетической энергии системы и определить искомую величину.

## 2. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Применить изложенную методику для решения примера.

### Пример.

Определить скорость тела 1, когда оно пройдет по наклонной плоскости путь  $S_1$  (рис. 1).

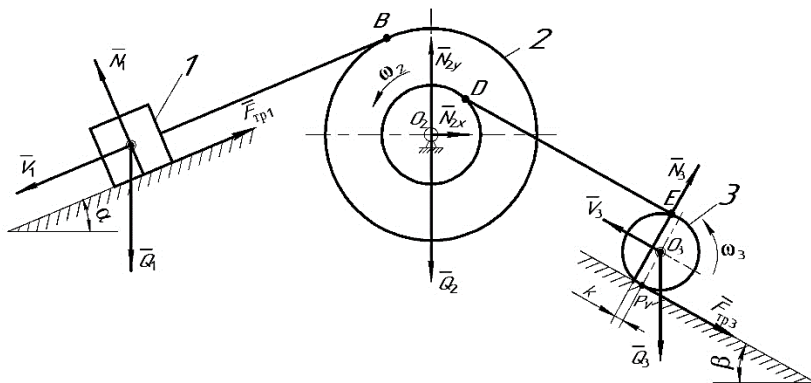


Рис. 1. Механическая система тел

Дано:  $m_1 = 100$  кг;  $m_2 = 200$  кг;  $R_2 = 0,8$  м;  $r_2 = 0,4$  м;  $i_2 = 0,6$  м;  
 $m_3 = 40$  кг;  $r_3 = 0,4$  м;  $\alpha = 60^\circ$ ;  $\beta = 30^\circ$ ;  $f = 0,1$ ;  $k = 0,02$  м;  $S_1 = 2$  м.

### Решение.

1. Вычертим механическую систему тел в произвольном промежуточном положении (рис. 1).
2. Предположим, что тело 1 движется вниз по наклонной плоскости.
3. Изобразим все внешние силы и реакции связей.
4. Определим работу всех внешних сил и сил реакций связей на перемещениях точек их приложения.

$$\sum A_k^e = A_{Q_1} + A_{F_{\text{тр}1}} + A_{Q_2} + A_{N_{2,x}} + A_{N_{2,y}} + A_{Q_3} + A_{M_{\text{тр}3}} + A_{A_{F_{\text{тр}3}}}. \quad (10)$$

При вычислении работ пользуемся формулами (6) и (7).

Так как перемещения точек  $O_2$  и  $P_V$  равны нулю, то работа сил  $P_2$ ,  $N_{2,x}$ ,  $N_{2,y}$ ,  $N_3$ ,  $F_{\text{тр}3}$  также равна нулю.

Реакция  $N_1$  все время остается перпендикулярна перемещению тела  $I$ , следовательно, работа этой силы равна нулю:

$$A_{N_1} = N_1 S_1 \cos 90^\circ = 0.$$

Работу совершают силы  $Q_1$ ,  $F_{\text{тр}_1}$ ,  $Q_3$  и момент трения качения  $M_{\text{тр}_3}$ .

Работа силы тяжести  $Q_1$

$$A_{Q_1} = Q_1 S_1 \cos(90^\circ - \alpha) = Q_1 S_1 \sin \alpha = m_1 g S_1 \sin 60^\circ.$$

Работа силы трения скольжения  $F_{\text{тр}_1}$

$$A_{F_{\text{тр}_1}} = F_{\text{тр}_1} S_1 \cos 180^\circ = -F_{\text{тр}_1} S_1.$$

Так как  $F_{\text{тр}_1} = -f N_1 \cos \alpha = -f m_1 g \cos \alpha$ , то

$$A_{F_{\text{тр}_1}} = -f m_1 g S_1 \cos \alpha = -f m_1 g S_1 \cos 60^\circ.$$

Работа силы тяжести  $Q_3$

$$A_{Q_3} = Q_3 S_3 \cos(90^\circ + \beta) = -Q_3 S_3 \sin \beta = -m_3 g S_3 \sin 30^\circ.$$

Работа момента трения качения катка  $3$

$$A_{M_{\text{тр}_3}} = -M_{\text{тр}_3} \varphi_3,$$

где  $M_{\text{тр}_3} = N_3 k$ ;

$\varphi_3$  – угол поворота катка  $3$ .

Тогда

$$A_{M_{\text{тр}_3}} = -N_3 k \varphi_3 \cos 30^\circ = -m_3 g k \varphi_3 \cos 30^\circ.$$

Тогда сумма работ всех внешних сил равна:

$$\begin{aligned} \sum A_k^e &= m_1 g S_1 \sin 60^\circ - f m_1 g S_1 \cos 60^\circ - \\ &- m_3 g S_3 \sin 30^\circ - m_3 g k \varphi_3 \cos 30^\circ. \end{aligned} \quad (11)$$

На основании равенства перемещений точек связи тел системы выражаем все перемещения, входящие в выражение (11), через заданное перемещение груза  $l$ .

Перемещение груза  $l$  равно перемещению точки  $B$  блока 2:

$$S_1 = S_B. \quad (12)$$

Но

$$S_B = \varphi_2 R_2.$$

Следовательно,

$$S_1 = \varphi_2 R_2.$$

Откуда

$$\varphi_2 = \frac{S_1}{R_2}. \quad (13)$$

Перемещение точки  $D$  блока 2 равно перемещению точки  $E$  катка 3:

$$S_D = S_E. \quad (14)$$

Учитывая расстояние от точки  $D$  до оси вращения блока 2 и расстояние от точки  $E$  до мгновенного центра скоростей ( $P_V$ ) катка 3, вышеприведенное равенство можем записать в следующем виде:

$$\varphi_2 r_2 = \varphi_3 EP_V.$$

Учитывая выражение (13), получим:

$$\varphi_3 = \frac{\varphi_2 r_2}{EP_V} = \frac{S_1 r_2}{R_2 2r_3} = \frac{S_1 r_2}{2r_3 2r_3} = \frac{S_1}{4r_3}. \quad (15)$$

Перемещение центра масс катка 3 равно произведению угла поворота катка и расстояния от этой точки до мгновенного центра скоростей ( $P_V$ ):

$$S_3 = \varphi_3 O_3 P_V.$$

Учитывая формулу (15), получим:

$$S_3 = \frac{S_1 r_3}{4r_3} = \frac{S_1}{4}. \quad (16)$$

Подставляя выражения (15) и (16) в уравнение (11), окончательно определяем сумму работ всех внешних сил через заданное перемещение  $S_1$ .

$$\begin{aligned}
 \sum A_k^e &= m_1 g S_1 \sin 60^\circ - f m_1 g S_1 \cos 60^\circ - m_3 g \frac{S_1}{4} \sin 30^\circ - \\
 &- m_3 g K \frac{S_1}{4 r_3} \cos 30^\circ = S_1 \left( m_1 g \sin 60^\circ - f m_1 g \cos 60^\circ - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{m_3 g \sin 30^\circ}{4} - \frac{m_3 g k \cos 30^\circ}{4 r_3} \right) = \\
 &= 2 \cdot (100 \cdot 9,8 \cdot 0,87 - 0,1 \cdot 100 \cdot 9,8 \cdot 0,5 - \\
 &\quad - \frac{40 \cdot 9,8 \cdot 0,5}{4} - \frac{40 \cdot 9,8 \cdot 0,02 \cdot 0,87}{4 \cdot 0,4}) = \\
 &= 2 \cdot (852,6 - 49,0 - 49,0 - 4,3) = \\
 &= 2 \cdot 750,3 = 1500,6 \text{ Дж.}
 \end{aligned} \tag{17}$$

Сумма работ всех внешних сил оказалась положительной, следовательно, направление движения тел выбрано правильно.

5. Вычислим кинетическую энергию системы в начальном и конечном положениях.

Так как тела, входящие в систему, совершают поступательное, вращательное или плоское движения, то для вычисления кинетической энергии этих тел пользуемся формулами (3), (4), (5), а кинетическую энергию системы определяем по формуле (2).

В начальный момент система находилась в состоянии покоя, поэтому кинетическая энергия системы в начале движения

$$T_0 = 0. \tag{18}$$

Кинетическая энергия системы в конечном положении равна сумме кинетических энергий всех тел, входящих в систему, т. е.

$$T = T_1 + T_2 + T_3. \tag{19}$$

Кинетическая энергия груза  $I$ , совершающего поступательное движение, равна:

$$T_1 = \frac{1}{2} m_1 V_1^2 = \frac{1}{2} 100 V_1^2 = 50 V_1^2. \tag{20}$$

Кинетическая энергия барабана 2, совершающего вращательное движение вокруг неподвижной оси:

$$T_2 = \frac{1}{2} I_{O_2} \omega_2^2. \quad (21)$$

Учитывая, что:

$$I_{O_2} = m_2 i_2^2,$$

получим:

$$T_2 = \frac{1}{2} m_2 i_2^2 \omega_2^2 = \frac{1}{2} 2000,6^2 \omega_2^2 = 36 \omega_2^2.$$

Кинетическая энергия диска 3, совершающего плоское движение, определяется по формуле

$$T_3 = \frac{1}{2} m_3 V_{O_3}^2 + \frac{1}{2} I_{O_3} \omega_3^2. \quad (22)$$

Учитывая, что:

$$I_{O_3} = \frac{m_3 r_3^2}{2},$$

находим:

$$\begin{aligned} T_3 &= \frac{1}{2} m_3 V_{O_3}^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} m_3 r_3^2 \omega_3^2 = \frac{1}{2} \cdot 40 \cdot V_{O_3}^2 + \\ &+ \frac{1}{4} \cdot 40 \cdot 0,4^2 \cdot \omega_3^2 = 20 V_{O_3}^2 + 1,6 \omega_3^2. \end{aligned}$$

Кинетическая энергия всей системы в конце движения будет равна:

$$T = 50 V_1^2 + 36 \omega_2^2 + 20 V_{O_3}^2 + 1,6 \omega_3^2. \quad (23)$$

Выразим угловые скорости  $\omega_2$  и  $\omega_3$  и линейную скорость  $V_{O_3}$  через скорость груза  $V_1$ , которую нужно определить.

Скорость груза  $I$  равна скорости точки  $B$  блока 2:

$$V_1 = V_B. \quad (24)$$

Но  $V_B = \omega_2 R_2$ , следовательно,  $V_1 = \omega_2 R_2$ .

Тогда

$$\omega_2 = \frac{V_1}{R_2}. \quad (25)$$

Скорость точки  $D$  блока 2 равна скорости точки  $E$  катка 3:

$$V_D = V_E. \quad (26)$$

Но  $V_D = \omega_2 r_2$ , а  $V_E = \omega_3 EP_V$ , где  $EP_V$  – расстояние от точки  $E$  до мгновенного центра скоростей ( $P_V$ ) катка 3.

Тогда равенство (26) можно записать в виде:

$$\omega_2 r_2 = \omega_3 EP_V.$$

Откуда

$$\omega_3 = \frac{\omega_2 r_2}{EP_V} = \frac{V_1 r_2}{R_2 2r_3} = \frac{V_1 r_2}{2r_3 2r_3} = \frac{V_1}{4r_3}. \quad (27)$$

Скорость центра масс  $O_3$  катка 3 равна произведению угловой скорости катка и расстояния от этой точки до мгновенного центра скоростей  $P_V$ :

$$V_{O_3} = \omega_3 O_3 P_V.$$

Учитывая равенство (27), получим:

$$V_{O_3} = \frac{V_1 r_3}{4r_3} = \frac{V_1}{4}. \quad (28)$$

Подставляя равенства (25), (27) и (28) в уравнение (23), определим кинетическую энергию системы, выраженную через скорость груза  $I$ , которую нужно определить:

$$\begin{aligned} T &= 50V_1^2 + 36\left(\frac{V_1}{R_2}\right)^2 + 20\left(\frac{V_1}{4}\right)^2 + 1,6\left(\frac{V_1}{4r_3}\right)^2 = \\ &= V_1^2 (50 + 56,25 + 1,25 + 0,625) = 108,1V_1^2. \end{aligned} \quad (29)$$

6. Согласно теореме (9) приравняем значение  $T$  и  $\sum A_k^e$ , определенные по формулам (29) и (17):

$$108,1V_1^2 = 1500,6,$$

откуда

$$V_1 = \sqrt{\frac{1500,6}{108,1}} = 3,7 \text{ м/с.}$$

**Ответ:** скорость груза  $V_1$  через 2 м пути после начала движения будет равна 3,7 м/с.

### 3. ЗАДАНИЕ

#### 3.1. Условие задачи

Механическая система тел, соединенных гибкими, невесомыми, нерастяжимыми нитями, приходит в движение из состояния покоя под действием сил тяжести. Учитывая наличие сил трения скольжения и трения качения между телами и опорными поверхностями и пренебрегая трением в подшипниках, необходимо определить направление движения тел системы, а также скорость груза  $1$  при его перемещении на  $S$  метров.

При определении моментов инерции круглые тела, имеющие одну ступень, считать сложными однородными дисками соответствующего большого радиуса  $R_2$ ,  $R_3$  или  $R_4$ .

Для тел 2, 3 и 4, имеющих две ступени, радиусы инерции определять по формулам:

$$i_2 = \frac{R_2 + r_2}{2}; \quad i_3 = \frac{R_3 + r_3}{2}; \quad i_4 = \frac{R_4 + r_4}{2}.$$

Радиусы дисков 2, 3 и 4 принять равными:

$$R_3 = 2r_3; \quad r_2 = r_3; \quad R_2 = 2r_3; \quad r_4 = 2r_3; \quad R_4 = 2r_4.$$

Во всех схемах, где тело движется по наклонной плоскости, образующей с горизонталью угол  $\beta$ , принять значение этого угла равным  $30^\circ$ .

Дополнительные указания приведены на схемах. Расчетные схемы к задачам приведены в приложении, необходимые данные – в таблице.

### Исходные данные

№ схемы	№ вари- анта	$m_1$ , кг	$m_2$ , кг	$m_3$ , кг	$m_4$ , кг	$r_3$ , м	$k$ , м	$f$	$\alpha^\circ$	$S_1$ , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	75	120	20	15	0,3	–	0,20	75	1,5
	2	100	100	30	10	0,5	–	0,10	60	1,0
	3	120	120	40	20	0,4	–	0,15	30	1,2
	4	50	150	80	60	0,2	–	0,05	45	2,0
2	1	120	100	75	–	0,2	0,015	0,15	30	1,5
	2	50	400	200	–	0,5	0,020	0,10	75	1,0
	3	200	150	100	–	0,3	0,010	0,05	45	2,0
	4	40	300	150	–	0,4	0,005	0,20	60	1,2
3	1	200	50	80	50	0,3	0,020	–	60	1,0
	2	120	250	120	200	0,4	0,010	–	45	2,0
	3	100	200	100	150	0,5	0,005	–	30	2,0
	4	250	80	60	60	0,2	0,015	–	75	1,5
4	1	100	140	100	–	0,3	0,020	0,20	15	1,3
	2	30	80	200	–	0,5	0,012	0,15	60	1,0
	3	20	100	180	–	0,4	0,015	0,10	75	2,0
	4	120	120	80	–	0,2	0,010	0,05	30	1,5
5	1	80	80	50	10	0,3	–	0,05	60	1,5
	2	20	60	50	50	0,2	–	0,10	15	2,0
	3	10	50	60	40	0,4	–	0,20	30	1,5
	4	60	–	30	20	0,1	–	0,15	75	1,3
6	1	30	100	100	60	0,4	0,005	–	60	1,0
	2	150	200	50	100	0,2	0,010	–	45	1,5
	3	200	250	80	140	0,3	0,015	–	30	1,2
	4	40	150	120	80	0,5	0,020	–	75	2,0
7	1	20	150	80	10	0,4	0,005	0,05	75	1,2
	2	100	40	40	40	0,3	0,015	0,10	15	1,5
	3	40	100	200	20	0,5	0,020	0,15	60	2,0
	4	80	60	30	30	0,2	0,010	0,10	30	1,0
8	1	40	50	200	10	0,5	0,010	–	60	1,5
	2	150	40	60	50	0,3	0,020	–	30	1,0
	3	100	30	50	40	0,2	0,005	–	15	2,0
	4	30	60	150	20	0,4	0,015	–	75	1,4
9	1	100	150	80	–	0,2	0,010	0,10	30	2,0
	2	120	180	100	–	0,4	0,015	0,20	75	1,4
	3	80	200	120	–	0,5	0,005	0,15	45	1,6
	4	140	160	80	–	0,3	0,020	0,05	60	1,0
10	1	20	50	40	20	0,4	0,020	–	30	2,0
	2	60	30	10	10	0,1	0,005	–	75	1,5
	3	80	40	15	10	0,2	0,010	–	60	1,3
	4	30	60	30	30	0,3	0,015	–	15	1,0

Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
11	1	50	200	200	40	0,4	0,020	–	60	1,0
	2	150	100	80	60	0,2	0,010	–	30	1,2
	3	200	120	100	80	0,3	0,015	–	15	1,5
	4	60	250	220	20	0,5	0,013	–	75	2,0
12	1	100	100	50	10	0,1	0,010	–	60	1,5
	2	40	80	100	150	0,3	0,013	–	30	2,0
	3	180	120	20	100	0,2	0,020	–	45	1,2
	4	50	100	120	140	0,5	0,015	–	75	1,0
13	1	100	120	40	60	0,2	0,015	–	15	1,4
	2	60	100	400	130	0,4	0,010	–	60	1,0
	3	50	100	350	100	0,3	0,012	–	75	2,0
	4	120	140	50	140	0,5	0,020	–	30	1,5
14	1	80	100	80	20	0,4	–	0,10	75	1,0
	2	20	40	30	80	0,1	–	0,15	30	2,0
	3	15	30	30	70	0,2	–	0,20	45	1,3
	4	60	40	40	10	0,3	–	0,05	60	1,5
15	1	80	60	100	80	0,3	0,013	–	30	2,0
	2	20	30	180	100	0,4	0,010	–	60	1,5
	3	30	50	200	120	0,5	0,020	–	75	1,2
	4	60	80	40	80	0,2	0,015	–	45	1,0
16	1	70	100	60	50	0,3	–	0,20	30	2,0
	2	10	40	70	60	0,4	–	0,05	60	1,2
	3	15	50	80	70	0,5	–	0,15	75	1,5
	4	80	80	50	40	0,2	–	0,10	45	1,0
17	1	20	40	30	50	0,4	–	0,15	15	1,5
	2	10	20	10	20	0,2	–	0,05	30	1,2
	3	15	30	20	40	0,3	–	0,10	45	2,0
	4	30	50	50	60	0,5	–	0,20	60	1,0
18	1	10	50	50	30	0,4	0,005	–	15	1,0
	2	20	40	10	20	0,1	0,015	–	30	2,0
	3	15	60	60	40	0,5	0,010	–	45	1,5
	4	30	80	15	50	0,2	0,020	–	60	1,2
19	1	200	120	70	20	0,4	0,020	–	60	1,5
	2	40	80	60	100	0,3	0,005	–	30	1,3
	3	50	100	80	80	0,5	0,010	–	15	1,0
	4	180	120	50	20	0,2	0,015	–	45	2,0
20	1	40	50	100	80	0,4	0,010	–	30	1,2
	2	100	60	50	10	0,2	0,015	–	60	1,5
	3	120	70	40	15	0,1	0,020	–	75	2,0
	4	30	50	80	100	0,3	0,005	–	15	1,0
21	1	25	15	30	10	0,3	0,015	0,10	15	1,0
	2	20	10	40	50	0,4	0,020	0,15	30	1,3
	3	50	20	20	25	0,2	0,005	0,05	45	1,5
	4	30	15	15	20	0,1	0,015	0,20	60	2,0
22	1	15	15	30	5	0,2	0,012	–	15	1,5
	2	50	10	25	20	0,1	0,010	–	30	1,2
	3	10	20	40	30	0,4	0,015	–	75	1,0
	4	20	25	30	10	0,3	0,020	–	60	2,0
23	1	20	30	30	50	0,2	0,020	0,15	30	2,0
	2	30	40	50	10	0,4	0,015	0,10	15	1,0
	3	10	25	40	30	0,3	0,013	0,20	45	1,5
	4	60	50	60	20	0,5	0,010	0,05	60	1,2

Продолжение

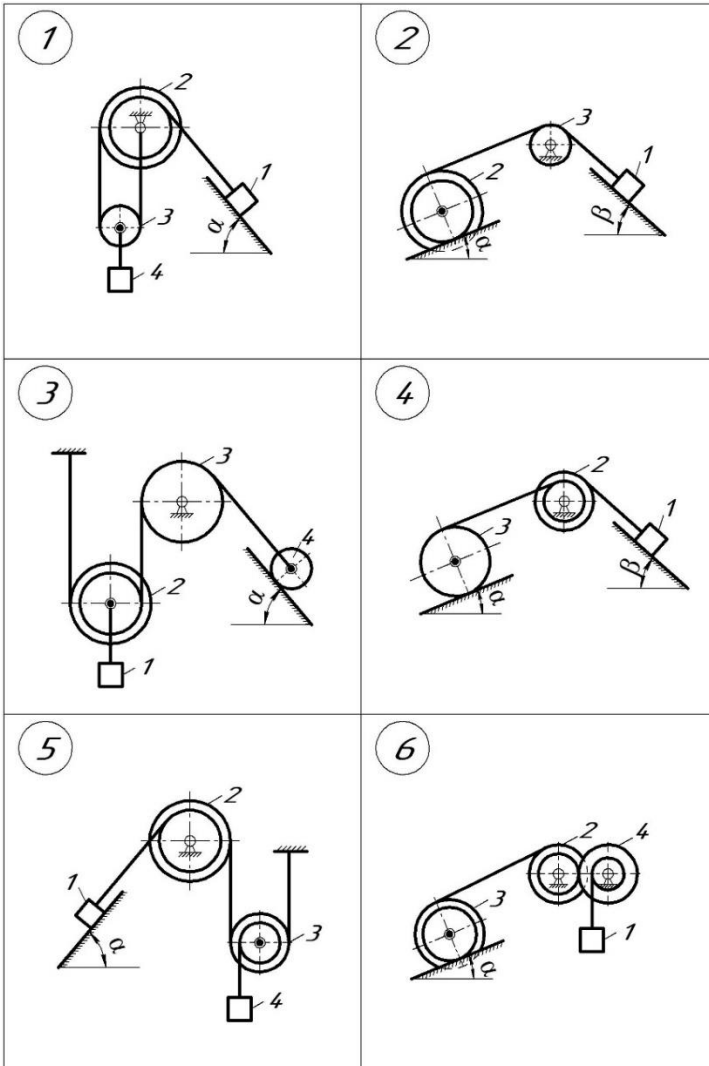
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
24	1	40	25	40	15	0,3	–	0,05	60	1,2
	2	20	70	60	60	0,5	–	0,10	30	2,0
	3	50	20	50	20	0,4	–	0,15	75	1,5
	4	10	25	20	30	0,2	–	0,20	45	1,0
25	1	30	50	15	10	0,2	0,015	–	45	1,5
	2	15	40	40	20	0,4	0,010	–	75	1,0
	3	20	30	10	15	0,1	0,012	–	30	2,0
	4	10	20	30	25	0,3	0,020	–	60	1,3
26	1	25	50	10	–	0,1	0,020	–	30	1,3
	2	15	20	50	–	0,4	0,015	–	60	1,5
	3	40	40	20	–	0,2	0,010	–	45	2,0
	4	20	80	60	–	0,5	0,013	–	75	1,0
27	1	15	40	50	20	0,4	0,015	–	45	1,2
	2	30	50	15	10	0,2	0,020	–	75	1,0
	3	10	30	40	15	0,3	0,013	–	30	1,5
	4	20	20	10	5	0,1	0,010	–	60	2,0
28	1	30	50	10	15	0,1	0,013	–	30	2,0
	2	40	60	15	10	0,2	0,020	–	45	1,5
	3	15	80	80	15	0,5	0,015	–	60	1,0
	4	10	30	60	10	0,4	0,010	–	75	1,4
29	1	20	40	10	30	0,2	0,012	–	60	1,2
	2	10	30	90	60	0,5	0,020	–	30	1,0
	3	5	20	60	40	0,4	0,010	–	45	1,5
	4	15	25	10	50	0,1	0,015	–	15	2,0
30	1	15	80	20	10	0,2	0,005	–	30	1,5
	2	10	50	15	80	0,1	0,015	–	60	1,0
	3	30	60	30	20	0,4	0,020	–	45	1,3
	4	5	90	25	60	0,3	0,010	–	75	2,0
31	1	100	100	50	150	0,1	0,020	–	15	2,0
	2	50	150	100	200	0,4	0,015	–	45	1,5
	3	80	120	80	160	0,3	0,010	–	75	1,2
	4	60	80	60	100	0,2	0,013	–	30	1,0
32	1	50	70	50	30	0,2	0,020	–	30	1,0
	2	30	100	100	150	0,4	0,015	–	60	1,2
	3	70	120	120	40	0,5	0,010	–	45	1,5
	4	40	150	80	180	0,3	0,005	–	75	2,0
33	1	40	120	40	200	0,1	0,005	–	30	1,5
	2	10	60	100	100	0,3	0,020	–	60	1,3
	3	80	150	60	140	0,2	0,015	–	45	2,0
	4	15	160	200	180	0,4	0,010	–	75	1,0
34	1	15	20	30	–	0,2	0,010	–	45	2,0
	2	20	30	25	–	0,1	0,020	–	15	1,0
	3	30	25	40	–	0,4	0,005	–	60	1,2
	4	40	60	30	–	0,3	0,015	–	30	1,5

Окончание

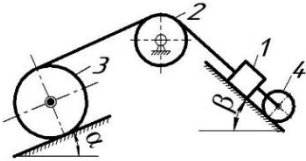
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
35	1	10	30	20	–	0,1	0,020	0,10	60	1,2
	2	15	25	40	–	0,2	0,005	0,15	75	1,0
	3	60	60	80	–	0,4	0,015	0,20	30	2,0
	4	80	80	80	–	0,3	0,010	0,05	45	1,5
36	1	40	50	40	–	0,5	0,005	0,05	60	1,5
	2	30	40	30	–	0,3	0,015	0,10	75	2,0
	3	20	30	20	–	0,2	0,010	0,20	15	1,2
	4	30	60	15	–	0,1	0,020	0,15	30	1,0
37	1	40	40	20	10	0,1	0,005	–	60	1,5
	2	10	30	50	80	0,3	0,015	–	30	1,2
	3	50	50	30	15	0,2	0,010	–	75	2,0
	4	20	80	80	60	0,4	0,020	–	15	1,0
38	1	60	50	60	30	0,1	0,020	0,10	30	1,2
	2	10	40	80	50	0,2	0,010	0,15	75	2,0
	3	60	60	80	40	0,3	0,015	0,05	15	1,0
	4	20	100	150	60	0,4	0,012	0,20	60	1,5
39	1	50	50	20	40	0,2	0,015	0,10	30	1,2
	2	10	40	60	30	0,4	0,010	0,05	75	1,5
	3	60	50	25	100	0,3	0,012	0,15	45	2,0
	4	15	60	80	50	0,5	0,010	0,20	60	1,0
40	1	50	40	40	50	0,2	0,005	–	30	1,0
	2	80	60	50	80	0,3	0,015	–	45	1,3
	3	100	50	60	25	0,4	0,020	–	60	2,0
	4	40	60	80	30	0,5	0,010	–	75	1,5
41	1	100	50	25	50	0,2	0,015	0,10	30	2,0
	2	20	140	180	200	0,5	0,005	0,15	60	1,5
	3	150	60	30	120	0,3	0,020	0,05	45	1,3
	4	15	200	170	250	0,4	0,010	0,20	75	1,0
42	1	40	100	70	10	0,4	0,020	0,10	15	1,2
	2	10	30	50	50	0,1	0,015	0,05	60	1,5
	3	50	80	60	15	0,3	0,005	0,15	30	1,0
	4	20	70	60	80	0,2	0,010	0,20	45	2,0

# ПРИЛОЖЕНИЕ

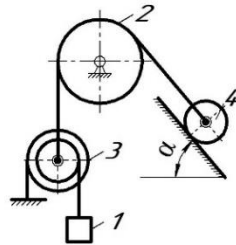
## Исходные схемы



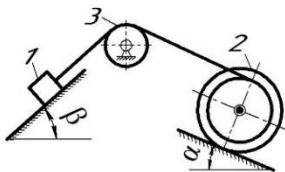
7



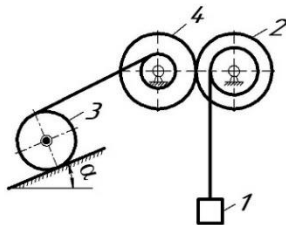
8



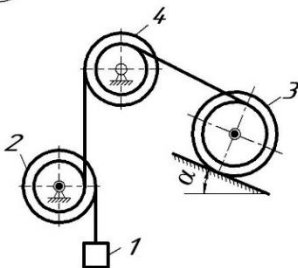
9



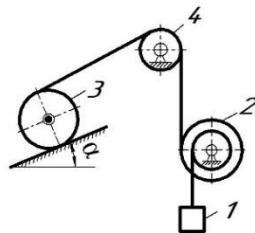
10



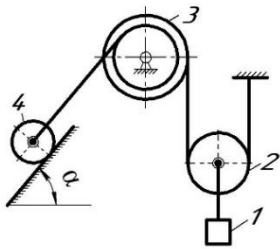
11



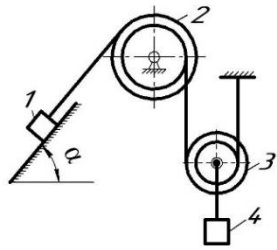
12



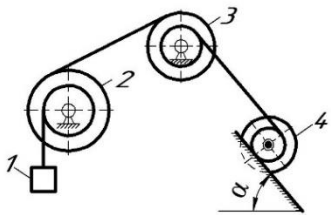
13



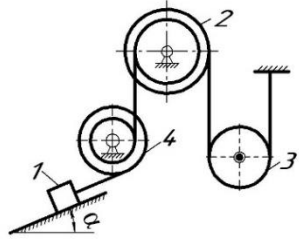
14



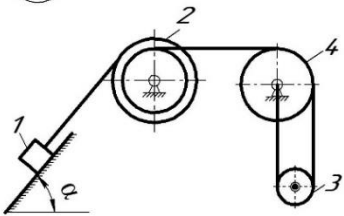
15



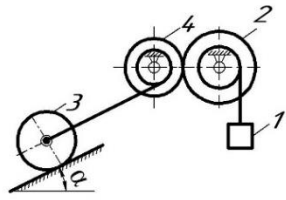
16



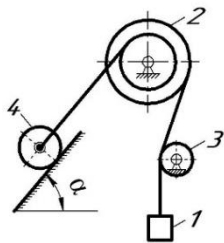
17



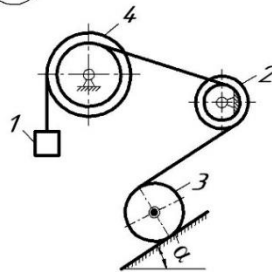
18



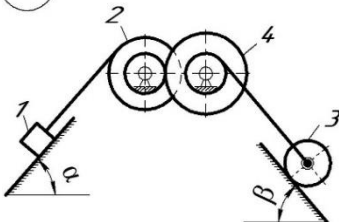
19



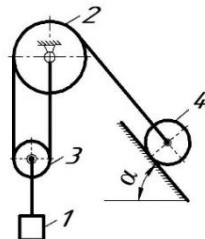
20



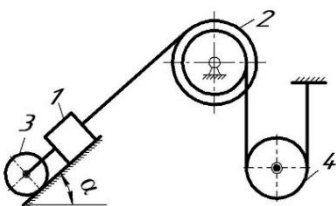
21



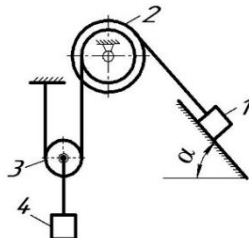
22



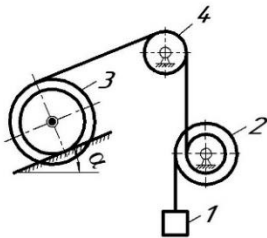
23



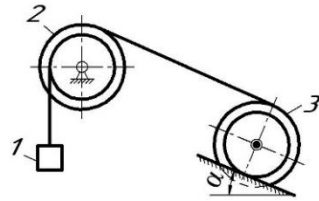
24



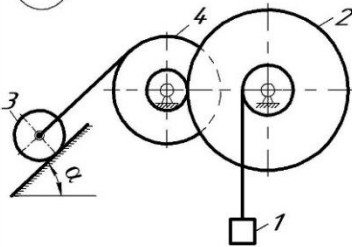
25



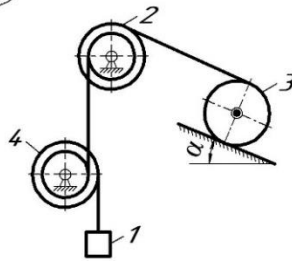
26



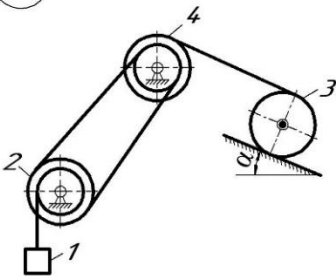
27



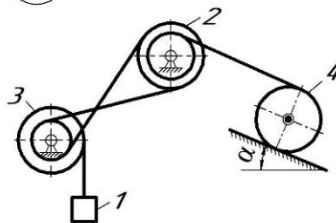
28



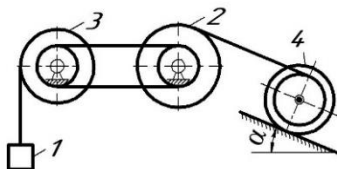
29



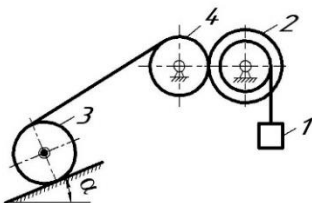
30



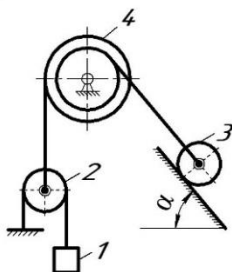
31



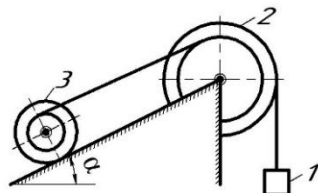
32



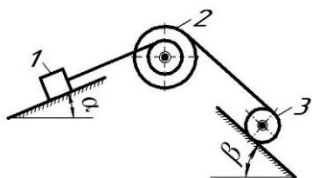
33



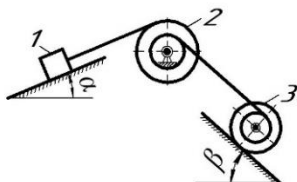
34



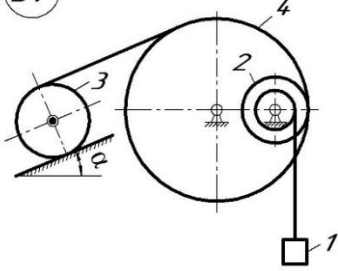
35



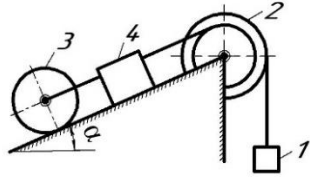
36



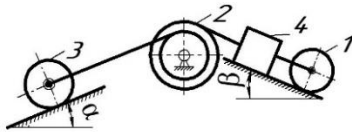
37



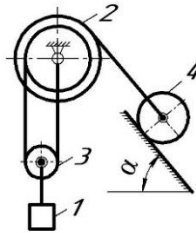
38



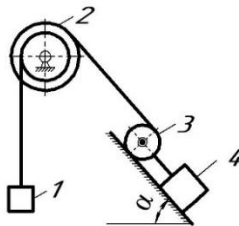
39



40



41



42

