

ДИНАМИКА АЛМАЗНО-КАНАТНОГО УСТРОЙСТВА

В данной работе разработана динамическая модель и получены дифференциальные уравнения движения алмазно-канатного устройства. Сделан анализ зависимостей режимных, конструктивных и силовых параметров процесса резания природного камня.

Ключевые слова: алмазно-канатная устройства, дифференциальные уравнения, природный камень, эксплуатации канатных устройств.

DYNAMICS OF THE DIAMOND-ROPE DEVICE

In this paper we developed a dynamic model and obtained the differential equations of motion of the diamond-rope device. Made an analysis of dependencies regime, constructive and force parameters of natural stone cutting process.

Keywords: diamond-lift devices, differential equations, natural stone, operation of cable devices.

Результаты испытаний и эксплуатации канатных устройств позволили установить, что при движении режущих канатов с различными скоростями, долговечность отдельных элементов этих устройств существенно отличаются.

Необходимо отметить, что при движении режущий канат располагается на шкиве по правильному многоугольнику. В связи с этим, при равномерном вращении шкива скорость режущего каната не постоянна и движение втулок с резцами являются неравномерными. Неравномерность движения приводит к возникновению динамических реакций действующих на ось шкива, увеличению инерционных нагрузок действующих на элементы алмазно-канатного устройства. В результате, которого появляются шумы и вибрации алмазно-канатного устройства, эксплуатационные качества их уменьшаются, долговечность основных элементов режущих канатов снижаются.

В связи с вышеизложенным, возникает необходимость исследования динамики и определения дифференциальных уравнений движения алмазно-канатных устройств.

Для исследования динамики рассмотрим конструкции алмазно-канатных устройств АКУ-1 и АКУ-1м, разработанные совместными усилиями сотрудников научно-исследовательского центра «Природный камень» Кыргызско-Узбекского университета и ОсО «Таш-Махал» Араванского района Ошской области (рис.1 и 2). Данные конструкции алмазно-канатных устройств отличаются простотой конструкции, легкостью, мобильностью и универсальностью применения, а также дешевизной изготовления.

Алмазно-канатные устройства АКУ-1 и АКУ-1м предназначены для резания вертикальных щелей шириной 8-10 мм в природных камнях малой и средней прочности (до 150-160 МПа) типа мрамор, мраморизованный известняк, известняк-ракушечник, доломит и др. подобных им горных пород. Данные устройства позволяют осуществить распиловку товарных и некондиционных блоков камня на заготовки в стационарных условиях на малых камнеобрабатывающих предприятиях. Этих устройств можно использовать также непосредственно на карьерах при разделке и пассивировке блоков, на добычных работах при выпиливании блоков из массива камня.

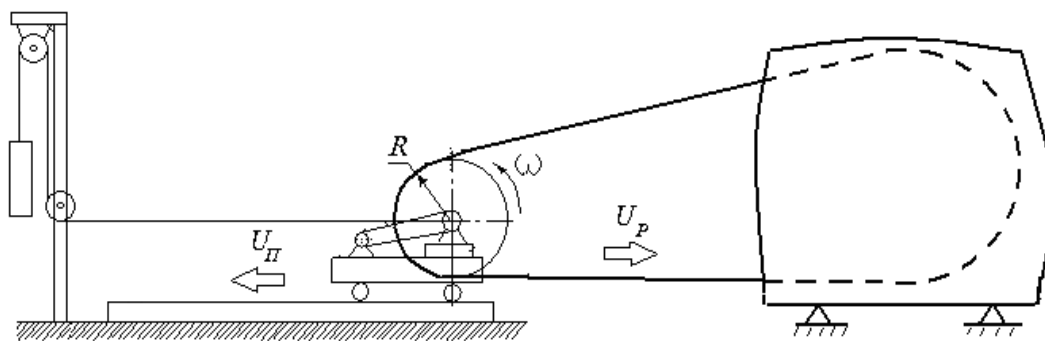


Рис. 1. Конструктивная схема алмазно-канатного устройства АКУ-1

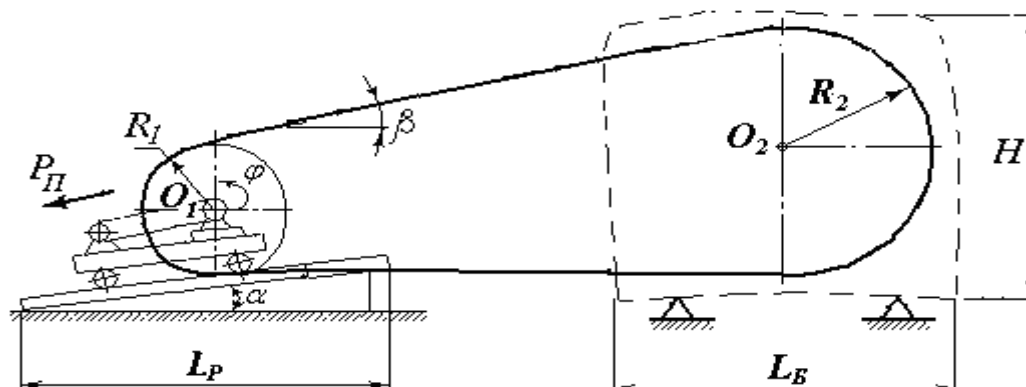


Рис. 2. Конструктивная схема алмазно-канатного устройства АКУ-1м

Для исследования динамики алмазно-канатного устройства в процессе резания природного камня разработана расчетная схема (рис.3).

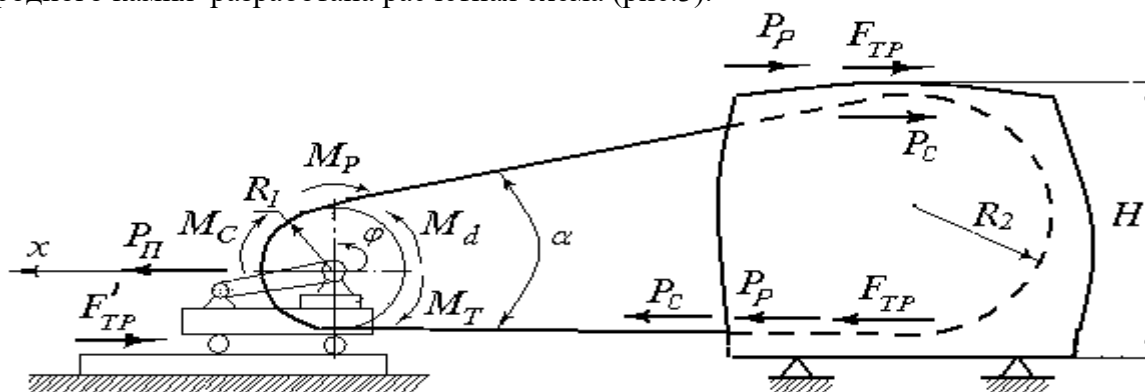


Рис.3. Расчетная схема алмазно-канатного устройства

В процессе резания природного камня режущий канат совершает плоскопараллельное движение в пространстве, имея две степени свободы: горизонтальное перемещение канатного устройства и вращение шкива (приводящее в движение режущий канат). Для определения уравнения движения алмазно-канатного устройства разработана динамическая модель (рис.4.). При разработке данной модели были приняты следующие допущения:

1. Натяжение режущего каната в достаточных пределах;
2. Колебание и боковые биения шкива отсутствуют;
3. Режущий канат располагается на шкиве по дуге окружности.

В качестве обобщенных координат принимаем горизонтальное перемещение (x) канатного устройства и угол поворота (φ) шкива (рис. 4.). Тогда закон движения ЦРО можно записать зависимостью вида

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}'} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} &= Q_1; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}'} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} &= Q_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия алмазно-канатного устройства; Q_1 и Q_2 – обобщенные силы, действующие на алмазно-канатное устройство.

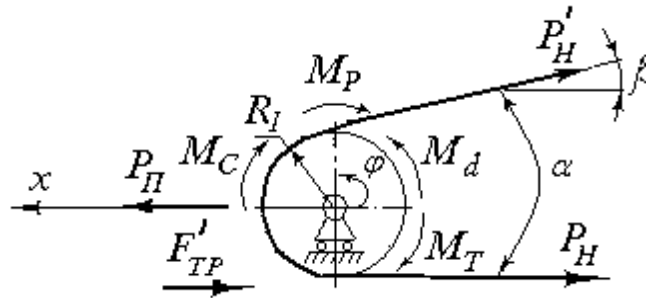


Рис. 4. Динамическая модель алмазно-канатного устройства

Сообщаем алмазно-канатному устройству возможное перемещение δx , при котором $\delta x > 0$, а $\varphi = \text{const}$ (рис.4.). На этом перемещении работу совершают суммарное усилие подачи P_{II} , силы натяжения режущего каната P_H и P_H' и сила трения качению F_{TP}' . Определим элементарную работу на этом перемещении

$$\delta A_1 = (P_{II} - P_H' \cdot \cos \beta - P_H - F_{TP}') \cdot \delta x, \quad (2)$$

Из уравнения (2) определим величину обобщенной силы Q_1 ,

$$Q_1 = P_{II} - P_H' \cdot \cos \beta - P_H - F_{TP}', \quad (3)$$

Аналогичным образом, сообщаем алмазно-канатному устройству другое возможное перемещение $\delta \varphi$, при котором $\delta \varphi > 0$, а $x = \text{const}$. Как видно из рис. 4, что на этом перемещении работу совершают моменты сил, действующие на шкив: M_d - движущий (вращающий) момент; $M_T = F_{TP}' \cdot R_1$ - момент от пары сил трения скольжения $F_{TP}' = P_{II} \cdot f$, возникающее между режущим канатом и обрабатываемой поверхностью природного камня (где P_{II} – суммарное усилие подачи); $M_P = P_P \cdot R_1$ - момент от суммарной силы резания P_P ; $M_C = P_C \cdot R_1$ - момент от суммарной силы сопротивления P_C (возникающей при повороте и от дополнительного натяжения режущего каната); $M_H = P_H \cdot R_1$ - момент от силы натяжения ведомой ветви режущего каната; $M_H' = P_H' \cdot R_1$ - момент от силы натяжения ведущей ветви режущего каната. Тогда элементарная работа выражается зависимостью

$$\delta A_2 = \left[M_d - (P_{II} \cdot f + P_P + P_C + P_H' - P_H) \cdot R_1 \right] \cdot \delta \varphi, \quad (4)$$

Из уравнения (2.11) определим величину Q_2

$$Q_2 = M_d - (P_{II} \cdot f + P_P + P_C + P_H' - P_H) \cdot R_1, \quad (5)$$

Кинетическую энергию алмазно-канатного устройства вместе с режущим канатом можно определить по следующей формуле

$$T = T_1 + T_2 + T_3, \quad (6)$$

где T_1 и T_2 - соответственно кинетическая энергия шкива и режущего каната; T_3 - кинетическая энергия алмазно-канатного устройства при поступательном его перемещении.

Определим кинетическую энергию шкива алмазно-канатного устройства

$$T_1 = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2} + \frac{J_1 \cdot (\varphi')^2}{2}, \quad (7)$$

где $U_1 = x^I$ – скорость шкива при его поступательном перемещении вдоль оси X;

$J_1 = \frac{m_1 \cdot R_1^2}{2}$ – момент инерции шкива относительно оси вращения; φ' и m_1 –

соответственно, угловая скорость и масса шкива. Подставляя значение J_1 в уравнение (7) определим величину кинетической энергии шкива

$$T_1 = \frac{m_1 \cdot (x^I)^2}{2} + \frac{m_1 \cdot R_1^2 \cdot (\varphi')^2}{4}, \quad (8)$$

Кинетическую энергию режущего каната с достаточной степени точности можно представить в виде

$$T_2 = \frac{m_2 \cdot U_a^2}{2}, \quad (9)$$

где m_2 – масса режущего каната; $U_a^2 = U_{II}^2 + U_P^2 + 2U_{II} \cdot U_P \cdot \cos \beta$ – абсолютная скорость режущего каната. Как видно из рис. 4., что $U_{II} = x^I$, $U_P = R_1 \cdot \varphi^I$.

Подставляя значения U_a в уравнение (9) получим

$$T_2 = \frac{m_2 \cdot (x^I)^2}{2} + \frac{m_2 \cdot R_1^2 \cdot (\varphi')^2}{2} + m_2 \cdot R_1 \cdot x^I \cdot \varphi^I \cdot \cos \beta, \quad (10)$$

Кинетическая энергия машины при ее поступательном перемещении

$$T_3 = \frac{m_3 \cdot U_3^2}{2} = \frac{m_3 \cdot (x^I)^2}{2}, \quad (11)$$

где m_3 и $U_3 = x^I$ – соответственно, масса алмазно-канатного устройства без режущего каната со шкивом и скорость его при поступательном движении вдоль оси X.

Подставляя полученные значения T_1 , T_2 и T_3 в уравнение (6) и произведя соответствующие преобразования имеем

$$T = \frac{(m_1 + m_2 + m_3) \cdot (x^I)^2}{2} + \frac{(m_1 + m_2) \cdot R_1^2 \cdot (\varphi')^2}{2} + m_2 \cdot R_1 \cdot x^I \cdot \varphi^I \cdot \cos \beta, \quad (12)$$

В полученном уравнении сумма $m_1 + m_2 + m_3$ дает нам массу M алмазно-канатного устройства со шкивом и режущим канатом. Тогда уравнению (12) можно записать в виде

$$T = \frac{M \cdot (x^I)^2}{2} + \frac{(m_1 + m_2) \cdot R_1^2 \cdot (\varphi')^2}{2} + m_2 \cdot R_1 \cdot x^I \cdot \varphi^I \cdot \cos \beta, \quad (13)$$

Отсюда беря производные от T по x^I , x , φ^I и φ имеем

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x^I} &= M \cdot x^I + m_2 \cdot R_1 \cdot \varphi^I \cdot \cos \beta, & \frac{\partial T}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial T}{\partial \varphi^I} &= (m_1 + m_2) \cdot R_1^2 \cdot \varphi^I + m_2 \cdot R_1 \cdot x^I \cdot \cos \beta, & \frac{\partial T}{\partial \varphi} &= 0, \end{aligned} \quad (14)$$

Беря производные от полученных выражений по времени t , имеем

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}^I} \right) = M \cdot \ddot{x}^I + m_2 \cdot R_1 \cdot \ddot{\varphi}^I \cdot \cos \beta,$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}^I} \right) = (m_1 + m_2) \cdot R_1^2 \cdot \ddot{\varphi}^I + m_2 \cdot R_1 \cdot \ddot{x}^I \cdot \cos \beta, \quad (15)$$

Подставляя значения величин из равенств (3), (5), (14) и (15) в уравнение (1) получим искомые дифференциальные уравнения движения алмазно-канатного устройства в процессе резания природного камня

$$M \cdot \ddot{x}^I + m_2 \cdot R_1 \cdot \ddot{\varphi}^I \cdot \cos \beta = P_{II} - P_H^I \cdot \cos \beta - P_H - F_{TP}^I, \quad (16)$$

$$(m_1 + m_2) \cdot R_1^2 \cdot \ddot{\varphi}^I + m_2 \cdot R_1 \cdot \ddot{x}^I \cdot \cos \beta = M_d - (P_{II} \cdot f + P_P + P_C + P_H^I - P_H) \cdot R_1,$$

Переходим к определению зависимостей $\ddot{x}^I, \ddot{\varphi}^I$ от конструктивных, режимных и силовых параметров алмазно-канатного устройства в процессе резания природного камня.

Введем обозначения: $P_{II} - P_H^I \cdot \cos \beta - P_H - F_{TP}^I = A$;

$$M_d - (P_{II} \cdot f + P_P + P_C + P_H^I - P_H) \cdot R_1 = B.$$

Тогда уравнения (16) имеют вид $M \cdot \ddot{x}^I + m_2 \cdot R_1 \cdot \ddot{\varphi}^I \cdot \cos \beta = A$,

$$(17) (m_1 + m_2) \cdot R_1^2 \cdot \ddot{\varphi}^I + m_2 \cdot R_1 \cdot \ddot{x}^I \cdot \cos \beta = B, \quad (18)$$

Из уравнения (17) определим

$$\ddot{x}^I = \frac{A - m_2 \cdot R_1 \cdot \ddot{\varphi}^I \cdot \cos \beta}{M}, \quad (19)$$

Подставляя полученное значение \ddot{x}^I в уравнение (18) имеем

$$(m_1 + m_2) \cdot R_1^2 \cdot \ddot{\varphi}^I + m_2 \cdot R_1 \cdot \cos \beta \cdot \frac{(A - m_2 \cdot R_1 \cdot \ddot{\varphi}^I \cdot \cos \beta)}{M} = B, \quad (20)$$

Откуда, через определенные преобразования определим величину $\ddot{\varphi}^I$

$$\ddot{\varphi}^I = \frac{B \cdot M - A \cdot m_2 \cdot R_1 \cdot \cos \beta}{R_1^2 \cdot [M \cdot (m_1 + m_2) - m_2^2 \cdot \cos \beta]}, \quad (21)$$

Подставляя значения А и В, получим

$$\ddot{\varphi}^I = \frac{M \cdot [M_d - R_1 \cdot (P_{II} \cdot f + P_P + P_C - P_H^I - P_H)]}{R_1^2 \cdot [M \cdot (m_1 + m_2) - m_2^2 \cdot \cos^2 \beta]} - \frac{(P_{II} - P_H^I \cdot \cos \beta - P_H - F_{TP}^I) \cdot m_2 \cdot R_1 \cdot \cos \beta}{R_1^2 \cdot [M \cdot (m_1 + m_2) - m_2^2 \cdot \cos^2 \beta]}, \quad (22)$$

Полученное уравнение (22) характеризует зависимости углового ускорения шкива от конструктивных, режимных и силовых параметров алмазно-канатного устройства в процессе резания природного камня.

Подставляя значение $\ddot{\varphi}^I$ из (22) в уравнение (19) и через определенные преобразования получим

$$x'' = \frac{P_{II} - P'_H \cdot \cos \beta - P_H - F'_{TP}}{M} - \frac{M \cdot m_2 \cdot \cos \beta \cdot [M_d - R_1 \cdot (P_{II} \cdot f + P_P + P_C - P'_H - P_H)]}{M \cdot R_1 \cdot [M \cdot (m_1 + m_2) - m_2^2 \cdot \cos^2 \beta]}, \quad (23)$$

$$\frac{m_2^2 \cdot \cos^2 \beta \cdot (P_{II} - P'_H \cdot \cos \beta - P_H - F'_{TP})}{M \cdot [M \cdot (m_1 + m_2) - m_2^2 \cdot \cos^2 \beta]}$$

Полученное уравнение (23) есть закон поступательного перемещения алмазно-канатного устройства в процессе резания природного камня.

Таким образом, полученные дифференциальные уравнения движения алмазно-канатного устройства позволяют сделать анализ зависимостей режимных, конструктивных и силовых параметров процесса резания природного камня. Выявить возможные пути увеличения надежности и производительности работы алмазно-канатных устройств, снижения их вибрации в процессе резания природного камня.

Литература:

1. Исманов М.М. Динамика процесса резания камня цепным режущим органом. Матер. Межд. науч.-практ. конф. «Теория машин и рабочих процессов», посв. 90-летию со дня рожд. академика О.Д. Алимова. Бишкек: ИМаш. НАН КР, 2013. – 276 с/с.207-213.
2. Першин Г.Д. Эффективность разделки монолитов природного камня канатно-алмазными пилами // Строительные материалы. - №10, 1994. – С.14-17. – Москва, 1994;
3. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. –М.: Выс. шк., 1986-416с.;