

УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ БАРОВОЙ ЗЕМЛЕРЕЗНОЙ МАШИНЫ

И. Г. БАСОВ, Б. Л. СТЕПАНОВ

(Представлена кафедрой горных машин, рудничного транспорта и горной механики)

Во время работы баровая землерезная машина находится под воздействием внешних сил — сил сопротивления движению установки, сопротивления резанию мерзлого грунта, а также сил инерции машины.

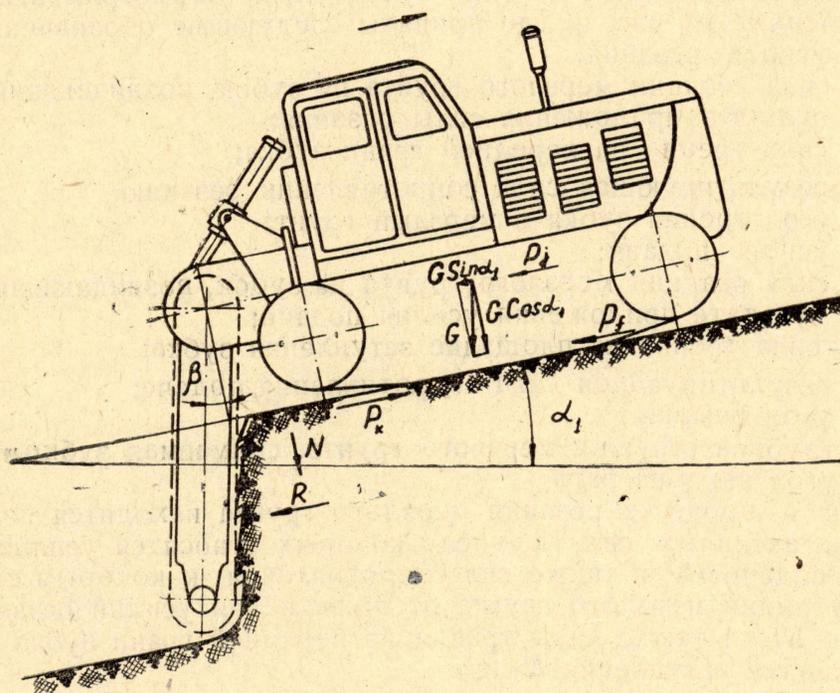


Рис. 1. Схема работы баровой землерезной машины

Уравнение тягового баланса землерезной машины для общего случая (машина работает на участке, наклоненном под углом α_1 с баром, наклоненным под углом β , рис. 1) можно записать в следующем виде:

$$P_k = P_f + P_a + P_j + R. \quad (1)$$

Рассмотрим отдельные составляющие уравнения (1).

Движущей силой, вызывающей перемещение землерезной машины, является касательная сила тяги P_k , направленная параллельно пути движения машины.

Сила сопротивления качению P_j равняется произведению коэффициента сопротивления качению машины f на составляющую от ее веса G :

$$P_j = fG \cos \alpha_1. \quad (2)$$

Так как машина работает на участке, наклоненном под углом α_1 , то появляется еще одна составляющая от веса G , оказывающая сопротивление подъему

$$P_\alpha = G \sin \alpha_1. \quad (3)$$

При работе машины на горизонтальном участке это сопротивление равно нулю, при работе на спуске оно будет иметь знак минус.

Сопротивление сил инерции может быть найдено из уравнения

$$P_j = \delta_{вр} \frac{G}{g} \cdot j, \quad (4)$$

где $\delta_{вр}$ — коэффициент, учитывающий влияние инерции вращающихся масс землерезной машины;

g — ускорение силы тяжести;

j — ускорение прямолинейно-поступательного движения машины.

Последним членом уравнения тягового баланса является составляющая силы сопротивления резанию мерзлого грунта R , параллельная пути движения машины. Чтобы ее определить, необходимо знать силы, действующие на один зубок бара. Рассмотрим эти силы, представленные на рис. 2, где приняты следующие обозначения:

P_p — усилие резания;

N_p — сила реакции мерзлого грунта на зубок, возникающая в результате приложения силы резания;

$N_p \operatorname{tg} \rho$ — сила трения на передней грани зубка;

N_p — результирующая сила сопротивления резанию;

ρ — угол трения зубка о мерзлый грунт;

P_n — усилие подачи;

N_n — сила реакции мерзлого грунта на зубок, возникающая в результате приложения усилия подачи;

$N_n \operatorname{tg} \rho$ — сила трения на площадке затупления зубка;

N_n — результирующая сила сопротивления подаче;

α — угол резания;

h — глубина стружки мерзлого грунта, снимаемая зубком;

β — угол наклона бара.

Зубок в процессе резания мерзлого грунта находится под воздействием активных сил, к числу которых относятся усилия резания P_p и подачи P_n , а также сил сопротивления, к которым следует отнести реакции мерзлого грунта от приложения усилий резания N_p и подачи N_n , а также силы трения на передней грани зубка $N_p \operatorname{tg} \rho$ и на площадке затупления $N_n \operatorname{tg} \rho$.

Усилие P_p действует по линии резания, а усилие P_n — в направлении, параллельном пути движения машины, т. е. оси x . В связи с этим для их определения необходимо силы сопротивления разложить на составляющие, параллельные и перпендикулярные линии резания и параллельные осям x и y (рис. 2). Аналитические выражения этих составляющих будут иметь следующий вид:

$$N_{p1} = N_p \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos \rho}, \quad (5)$$

$$N_p = N_p^2 \frac{\cos(\alpha + \rho)}{\cos \rho}, \quad (6)$$

$$N_{px} = -N_p \frac{\cos(\beta + \alpha + \rho)}{\cos \rho}, \quad (7)$$

$$N_{py} = N_p \frac{\sin(\beta + \alpha + \rho)}{\cos \rho}, \quad (8)$$

$$N_{nx} = N_n \frac{\cos(\beta - \rho)}{\cos \rho}, \quad (9)$$

$$N_{ny} = N_n \frac{\sin(\beta - \rho)}{\cos \rho}. \quad (10)$$

Усилие резания представляет сумму сил сопротивления, действующих параллельно линии резания, и может быть найдено из выражения

$$P_p = N_{p1} + N_n \operatorname{tg} \rho.$$

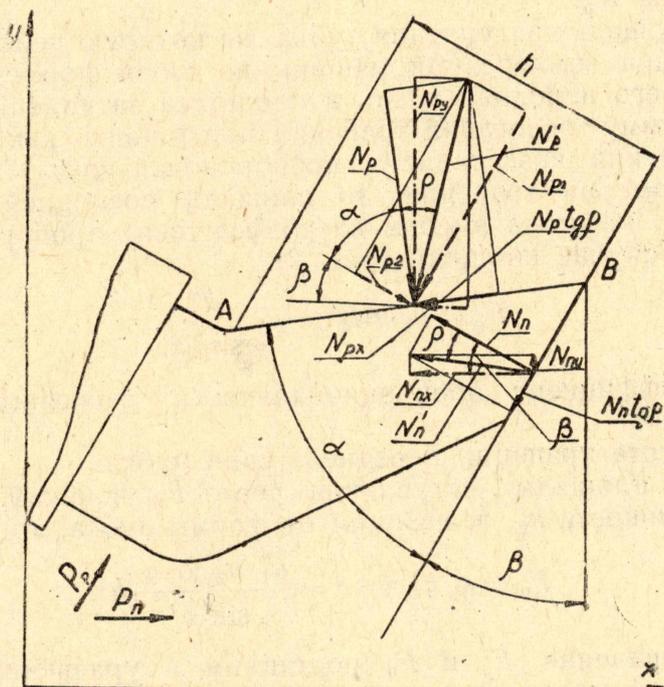


Рис. 2. Схема сил, действующих на режущий зубок.

После замены N_{p1} значением из (5) и соответствующих преобразований последнее уравнение примет вид

$$P_p = \frac{N_p \sin(\alpha + \rho) + N_n \sin \rho}{\cos \rho}. \quad (11)$$

Усилие подачи равно сумме сил, действующих параллельно оси x (рис. 2):

$$P_n = N_{nx} + N_{px}.$$

Подставив в последнее выражение значения (9) и (7), получим

$$P_n = \frac{N_n \cos(\beta - \rho) - N_p \cos(\beta + \alpha + \rho)}{\cos \rho}. \quad (12)$$

Действующая на зубок сила, параллельная оси y , равна сумме составляющих сил сопротивления резанию N_{py} и подаче N_{ny} (рис. 2)

$$N_{py} - N_{ny} = \frac{N_p \sin(\beta + \alpha + \rho) - N_n \sin(\beta - \rho)}{\cos \rho}. \quad (13)$$

В уравнениях (11—13) усилия P_p и P_n , а также сила $N_{py} - N_{ny}$ зависят от сил реакции мерзлого грунта N_p и N_n . Чтобы связать эти силы с перемещением землерезной машины во время работы, выразим их через толщину стружки h , снимаемой зубком.

Силы реакции мерзлого грунта

$$N_p = \sigma_{вр} F_p; \quad (14)$$

$$N_n = \sigma_{вр} F_n; \quad (15)$$

где $\sigma_{вр}$ — усредненное временное сопротивление мерзлого грунта сжатию по глубине щели, прорезаемой баром;

F_p — площадь передней грани зуба, на которую действует сила N_p ;

F_n — площадка затупления зубка, на которую действует сила N_n

Зубок бара землерезной машины по своей форме представляет пирамиду, а его передняя грань и площадка затупления — трапеции. Если полусумму оснований трапеции представить как произведение высоты на некий коэффициент пропорциональности, зависящий от формы и размеров трапеции, то площадь последней будет равна произведению квадрата высоты на коэффициент пропорциональности.

В таком случае площадь (рис. 2)

$$F_p = \kappa_1 \cdot AB^2 = \kappa_1 \frac{h^2}{\sin^2 \alpha},$$

где κ_1 — коэффициент пропорциональности, зависящий от формы зубка;

AB — высота трапеции передней грани зубка.

Выразим площадку затупления через F_p и некий коэффициент пропорциональности κ_2 , зависящий от формы зубка, тогда

$$F_n = \kappa_2 F_p \cos \alpha = \frac{\kappa_1 \cdot \kappa_2 \cos \alpha}{\sin^2 \alpha} h^2.$$

Найденные значения F_p и F_n подставим в уравнения (14) и (15) и получим

$$N_p = \frac{\sigma_{вр} \cdot \kappa_1}{\sin^2 \alpha} h^2, \quad (16)$$

$$N_n = \frac{\sigma_{вр} \kappa_1 \kappa_2 \cos \alpha \cdot h^2}{\sin^2 \alpha}. \quad (17)$$

Подставляя в уравнения (11) и (12) значения (16) и (17), получим

$$P_p = \frac{\sigma_{вр} \kappa_1}{\sin^2 \alpha} \left[\frac{\sin(\alpha + \rho) + \kappa_2 \cos \alpha \cdot \sin \rho}{\cos \rho} \right] h^2, \quad (18)$$

$$P_n = \frac{\sigma_{вр} \cdot \kappa_1}{\sin^2 \alpha} \left[\frac{\kappa_2 \cos \alpha \cdot \cos(\beta - \rho) - \cos(\beta + \alpha + \rho)}{\cos \rho} \right] h^2. \quad (19)$$

Для упрощения уравнения (19) обозначим

$$q = \frac{\sigma_{вр} \cdot \kappa_1}{\sin^2 \alpha} \left[\frac{\kappa_2 \cos \alpha \cdot \cos(\beta - \rho) - \cos(\beta + \alpha + \rho)}{\cos \rho} \right],$$

тогда

$$P_n = qh^2. \quad (20)$$

Сила сопротивления мерзлого грунта, действующая на бар в направлении, параллельном пути движения землерезной машины, равна произведению сил сопротивления, действующих на отдельный зубок режущей цепи в том же направлении на количество зубков n , находящихся в контакте с грунтом, т. е.

$$R = P_n \cdot n = qn \cdot h^2. \quad (21)$$

Составляющая силы сопротивления резанию, перпендикулярная пути движения машин (рис. 1)

$$N = (N_{py} - N_{ny}) n.$$

Подставим в это выражение значения (13), (16), (17) и после соответствующих преобразований получим

$$N = \frac{\sigma_{вр} \cdot \kappa_1}{\sin^2 \alpha} nh^2 \frac{\sin(\beta + \alpha + \rho) - \kappa_2 \cos \alpha \cdot \sin(\beta - \rho)}{\cos \rho}. \quad (22)$$

Эта сила не входит в уравнение тягового баланса землерезной машины, но должна учитываться при расчетах устойчивости этих машин и сил сцепления их с почвой.

Поскольку теперь известны все составляющие уравнения тягового баланса, то, подставляя в уравнение (1) значения (2), (3), (4) и (21), получим

$$P_k = fG \cos \alpha + G \sin \alpha + \delta_{вр} \frac{G}{g} j + qnh^2.$$

Величина толщины стружки мерзлого грунта h , снимаемой зубком бара, равна пути x , проходимому машиной за время t .

Но так как бар находится под углом β , то

$$h = \frac{x}{\cos \beta}.$$

Из уравнения тягового баланса определим ускорение прямолинейного поступательного движения машины, предварительно заменив h через x :

$$j = \frac{g(P_k - G \sin \alpha_1 - fG \cos \alpha_1)}{\delta_{вр} G} - \frac{qgn}{\delta_{вр} G \cos^2 \beta} x^2. \quad (23)$$

Для упрощения обозначим

$$\frac{g(P_k - G \sin \alpha_1 - fG \cos \alpha_1)}{\delta_{вр} G} = A^2,$$

$$\frac{qg \cdot n}{\delta_{вр} \cdot G \cos^2 \beta} = B^2.$$

Тогда $j = A^2 - B^2 x^2$.

Поскольку ускорение прямолинейного поступательного движения машины является второй производной от пути x , то уравнение движения баровой землерезной машины может быть записано в дифференциальном виде

$$x'' = A^2 - B^2 x^2. \quad (24)$$

Уравнение (24) является нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка. Решая его методом конечных разностей, можно получить истинные значения скоростей и ускорений, которые необходимо знать при проектировании землерезных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Д. Львов. Теория трактора. Машгиз, М., 1960.
2. М. П. Ситников. Управление движения врубной машины. Научные труды Московского горного института. Вып. 8. Углетехиздат, М.—Л., 1950.
3. Д. А. Чудаков. Основы теории трактора и автомобиля. Сельхозиздат, М., 1962.