ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

УДК 631.332.7:631.316.44

В.А. Завора,
И.М. Зорин

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К РАСЧЕТУ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРОДОЛЬНОЙ ГОРКИ КАРТОФЕЛЕУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ

При рассмотрении движения тел принимаем, что они имеют шарообразную форму и двигаются по гладкой наклонной поверхности.

На тело, находящееся на наклонной движущейся поверхности, действуют касательная сила T, равная по величине и противопоставлении силе трения F, и вес тела P.

Движение тела в этом случае может быть описано уравнением Лагранжа второго рода, которое в обобщенных координатах имеет вид:

$$\delta q_1\left[\frac{d}{dt}\left(\frac{dT}{dq}\right)-\frac{dT}{dq}-Q\right]+\delta q_2\left[\frac{d}{dt}\left(\frac{dT}{dq_2}\right)-\frac{dT}{dq_2}-Q_2\right]+\delta q_S\left[\frac{d}{dt}\left(\frac{dT}{dq_S}\right)-\frac{dT}{dq_S}-Q_S\right]=0, \qquad (1)$$

где $q_1,\ q_2,\ldots\ldots q_S$ – обобщенные координаты;

$q_1,\ q_2,\ldots\ldots q_S$ – обобщенные скорости;

$\delta q_1,\ \delta q_2,\ldots\ldots\delta q_S$ – обобщенные возможные перемещения системы;

$Q_1,\ Q_2,\ldots\ldots Q_S$ – обобщенные силы;

T – кинематическая энергия системы.

Так как тело в процессе перемещения по движущейся наклонной поверхности имеет две степени свободы:

1. Вращение тела вокруг собственной оси.
2. Перемещение по движущейся наклонной поверхности, –

то уравнение Лагранжа второго рода примет вид:

$$\delta q_1\left[\frac{d}{dt}\left(\frac{dT}{dq_1}\right)-\frac{dT}{dq_1}-Q_1\right]+\delta q_2\left[\frac{d}{dt}\left(\frac{dT}{dq_2}\right)-\frac{dT}{dq_2}-Q_2\right]=0. \qquad (2)$$

Принимая за обобщенные координаты угол поворота вокруг своей оси γ, перемещение по движущейся наклонной поверхности S, имеем:

$$\delta\gamma\left[\frac{d}{dt}\left(\frac{dT}{d\gamma}\right)-\frac{dT}{d\gamma}-Q_1\right]+\delta_S\left[\frac{d}{dt}\left(\frac{dT}{dS}\right)-\frac{dT}{dS}-Q_2\right]=0. \qquad (3)$$

Так как в уравнении (3) возможные перемещения системы не могут быть равны нулю, то

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{dT_1}{d\gamma}\right)-\frac{dT_1}{d\gamma}-Q_1=0; \qquad (4)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{dT_2}{d\gamma}\right)-\frac{dT_2}{dS}-Q_2=0. \qquad (5)$$

Кинематическая энергия твердого тела, вращающегося вокруг собственной оси, равна

$$T_1=\frac{1}{2}\cdot J_1\cdot\gamma^2, \qquad (6)$$

где T_1 – кинематическая энергия тела;

J_1 – момент инерции тела.

Кинематическая энергия тела, перемещающегося по движущейся наклонной поверхности, равна

$$T_2=\frac{1}{2}\cdot\frac{P}{q}\cdot S^2. \qquad (7)$$

Учитывая, что в выражение кинетической энергии T не входят обобщенные координаты γ и S, имеем

$$\frac{dT_1}{d\gamma}=0 \text{ и } \frac{dT_2}{dS}=0,$$

тогда уравнения (4) и (5) примут вид:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{dT_1}{d\gamma}\right)=Q_1; \qquad (8)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{dT_2}{dS}\right)=Q_2. \qquad (9)$$

Подставив значения кинематической энергии в формулы (8) и (9), будем иметь

$$J_1\ddot{\gamma}=Q_1; \qquad (10)$$

$$\frac{P}{q}\cdot\ddot{S}=Q_2. \qquad (11)$$

Для нахождения обобщенных сил как коэффициентов в выражении суммы элементарных работ вычислим сумму работ всех сил при соответствующих возможных перемещениях:

$$\delta A_\gamma=\delta A_\gamma(T);$$

$$\delta A_S=\delta A_S(T)-\delta A_S(P\sin\alpha),$$

где $\delta A_\gamma(T)=T_r\delta\gamma$;

$\delta A_S(T)=T\delta_S$;

$\delta A_S(P\sin\alpha)=P\sin\alpha\delta_S$;

r – радиус тела.

Общее сопротивление сил трения в точке касания тела с поверхностью равно

$$F=\frac{2}{7}P\cos\alpha\left(tg\alpha-\frac{5}{2}\cdot\frac{K}{r}\right), \qquad (12)$$

где K – коэффициент трения качения;

$\frac{K}{r}$ – приведенный коэффициент трения качения;

P – вес тела.

Скольжения тела не будет, если выполняется условие

$$F \prec fN \text{ или } F\le fP\cos\alpha,$$

что необходимо для разделения круглых тел от плоских. Из выражения (12) и условия качения тел без скольжения следует, что $tg\alpha \succ 0$, т.е. наименьший диаметр тела, которое может катиться, должен быть

$$2r\ge\frac{10}{7}\cdot\frac{K}{f}, \qquad (13)$$

где f – коэффициент трения.

Так как касательная сила T равна по величине силе трения, от обобщенные силы будут равны

$$Q_1=\frac{2}{7}rP\cos\alpha\left(tg\alpha+\frac{5}{2}\cdot\frac{K}{r}\right); \qquad (14)$$

$$Q_2=\frac{2}{7}P\cos\alpha\left(tg\alpha+\frac{5}{2}\cdot\frac{K}{r}\right)-P\sin\alpha. \qquad (15)$$

Подставив обобщенные значения Q_1 и Q_2 в формулы (10) и (11), получим два уравнения движения тел по движущейся наклонной поверхности:

$$J\ddot{\gamma}=\frac{2}{7}rP\cos\alpha\left(tg\alpha+\frac{5}{2}\cdot\frac{K}{r}\right); \qquad (16)$$

$$\frac{\delta}{q}\ddot{S}=\frac{2}{7}P\cos\alpha-P\sin\alpha. \qquad (17)$$

Момент инерции тела, вращающегося вокруг собственной оси, определяется выражением

$$J_1=\frac{2}{5}mr^a. \qquad (18)$$

Подставив в уравнения (16) и (17) значение момента инерции тела J_1 и сделав некоторые преобразования, получим

$$\frac{2}{5}r\ddot{\gamma}=\frac{2}{7}q\cos\alpha\left(tg\alpha+\frac{5}{2}\cdot\frac{K}{r}\right); \qquad (19)$$

$$\ddot{S} = \frac{2}{7} q \cos\alpha \left(tg\alpha + \frac{5}{2} \cdot \frac{K}{r} \right) - q \sin\alpha . \quad (20)$$

После интегрирования уравнений (19) и (20) имеем

$$\frac{2}{5} r\dot{\gamma} = \frac{2}{7} qt \cos\alpha \left(tg\alpha + \frac{5}{2} \cdot \frac{K}{r} \right) + C_1 ; \quad (21)$$

$$\dot{S} = \frac{2}{7} qt \cos\alpha \left(tg\alpha + \frac{5}{2} \cdot \frac{K}{r} \right) - qt \sin\alpha + C_2 . \quad (22)$$

В начале движения при $t = 0,\ \gamma = 0,\ C_1 = 0$.

$C_2 = V_{нач}$, то есть произвольная постоянная C_2 равна составляющей от скорости, с которой движется тело горизонтально оси ОХ, в момент соприкосновения тела с поверхностью.

Таким образом, начальная скорость движения тел по движущейся наклонной поверхности определяется из уравнения

$$V_{нач} = V_X \cdot \cos\alpha , \quad (23)$$

где V_X – горизонтальная составляющая скорость в момент соприкосновения тела с поверхностью;

α – угол наклона движущейся поверхности.

Подставив значения V_X в формулу, имеем

$$V_{нач} = V_{ЭЛ} \cdot \cos\beta \cdot \cos\alpha , \quad (24)$$

где $V_{ЭЛ}$ – скорость движения полотна элеватора, м/с;

β – угол наклона полотна элеватора, град.

Подставив найденные значения $V_{нач}$ в формулу (22), получим уравнение скорости тел, перемещающихся по движущейся наклонной поверхности:

$$\dot{S} = \frac{2}{7} qt \cos\alpha \left(tg\alpha + \frac{5}{2} \cdot \frac{K}{r} \right) - qt \sin\alpha + V_{ЭЛ} \cdot \cos\beta \cdot \cos\alpha . \quad (25)$$

Из уравнения (21) определяем угловую скорость вращения тела вокруг собственной оси при перемещении по движущейся наклонной поверхности, которое будет равно

$$\dot{\gamma} = \frac{2}{7} \cdot \frac{qt \cos\alpha \left(tg\alpha + \frac{5}{2} \cdot \frac{K}{r} \right)}{r} , \quad (26)$$

где $\dot{\gamma}$ – угловая скорость тела;

r – радиус тела.

Движение тела вверх по движущейся наклонной поверхности прекращается в момент, когда линейная скорость вращения их вокруг собственной оси будет равна линейной скорости перемещения движущейся наклонной поверхности, которая определяется из выражения

$$V_{ПЛ} = \frac{\pi \cdot n \cdot r_Г}{30} , \quad (27)$$

где $r_Г$ – радиус ведущего барабана горки;

n – число оборотов ведущего барабана.

Линейная скорость вращения тела вокруг собственной оси равна

$$V_Г = \frac{2}{7} qt \cos\alpha \left(tg\alpha + \frac{5}{2} \cdot \frac{K}{r} \right) , \quad (28)$$

где K – коэффициент трения качения;

r – радиус тела.

Приравняв линейные скорости $V_{ПЛ}$ и $V_Г$, получим выражение

$$\frac{2}{7} qt \cos\alpha \left(tg\alpha + \frac{5}{2} \cdot \frac{K}{r} \right) = \frac{\pi \cdot n \cdot r_Г}{30} , \quad (29)$$

из которого легко можно определить время движения тела вверх от момента падения на вращающуюся наклонную поверхность до начала его качения вниз:

$$t = \frac{7 \cdot \pi \cdot n \cdot r_Г}{60 \cdot q \cdot cos\alpha \cdot \left(tg\alpha + \frac{5}{2} \cdot \frac{K}{r} \right)} . \quad (30)$$

Анализ уравнения (20) показывает, что тела, имеющие различные коэффициенты трения, перемещаются по движущейся наклонной поверхности с различными ускорениями. Это свойство может быть использовано при разделении клубней и комков, имеющих различные коэффициенты трения и форму.

В момент, когда тело прекращает перемещение вверх по движущейся наклонной поверхности, ускорение будет равно нулю, то есть

$$f \cos\alpha - \sin\alpha = 0 . \quad (31)$$

Подставляя коэффициенты трения комков и клубней в уравнение (31), определяем допустимые пределы углов наклона движущейся поверхности, при которых перемещение клубней и комков вверх прекратится.

Так, допустимый угол наклона движущейся поверхности будет:

для клубней: $\alpha = a \cdot r \cdot c \cdot tg \cdot f_{КЛ}$;

для комков: $\alpha_1 = a \cdot r \cdot c \cdot tg \cdot f_K$,

где $f_{КЛ}$ – коэффициент трения клубней;

f_K – коэффициент трения комков.

При коэффициентах трения почвенных комков 0,71 и клубней картофеля 0,47 имеем угол наклона движущейся поверхности $25^\circ \prec \alpha \prec 35^\circ$:

$$S = \frac{2}{3} q \cdot t^2 \cdot \cos\alpha \left(tg\alpha + \frac{5}{2} \cdot \frac{K}{r} \right) - q \cdot t^2 \sin\alpha + V_{нач} \cdot t \cdot \quad (32)$$

Определяющей длиной рабочей части вращающейся наклонной поверхности будет путь, проходимый почвенными комками (круглыми) вместе с лентой, до начала качения их вниз.

Если учесть, что комки повышенной влажности при прокатывании на длине 300-340 мм сплющиваются и начинают двигаться со скольжением (что улучшает процесс отделения повышенным коэффициентом трения), задерживая клубни, то центр подачи сходов должен совпадать с центром отделяющей поверхности.

Следовательно, длина рабочей части поверхности должна быть равной 25 см, а ширина отделяющей поверхности должна выбираться с учетом обеспечения наиболее вероятного одиночного скатывания по всей ширине элеваторов картофелеуборочной машины.

Для этого подача должна обеспечиваться тонким слоем (полосой) по центральной поперечной оси движущейся наклонной поверхности.

Пример расчета основных параметров и режимов работы продольной горки при некоторых заданных параметрах:

угол наклона элеватора $\beta = 25^\circ$;

угол наклона полотна горки $\alpha = 30^\circ$;

линейная скорость полотна элеватора $V_{Эл} = 1{,}47\ м/с$;

радиус ведущего барабана горки $r_l = 0{,}05\ м$;

радиус клубней, комков почвы $r = 0{,}025 - 0{,}05\ м$;

коэффициент трения качения $f_{КЛ} = 0{,}37$; $f_К = 0{,}71$.

Решение.

1. Горизонтальная составляющая скорости тела при полете с элеватора

$$V_X = V_{Эл} \cos\alpha = 1{,}47 \cdot 0{,}9063 = 1{,}33\ м/с.$$

2. Начальная скорость движения тела по отделяющей наклонной поверхности

$$V_{нач} = V_X \cos\alpha = 1{,}33 \cdot 0{,}866 = 1{,}15\ м/с.$$

3. Время движения почвенного комка вместе с отделяющей поверхностью будет равно

$$t = \frac{7 \cdot \pi \cdot n \cdot r_l}{60 \cdot q \cdot \cos\alpha \cdot \left(tg\alpha + \frac{5}{2} \cdot \frac{K}{r} \right)} = \frac{7 \cdot 3{,}14 \cdot 300 \cdot 0{,}05}{60 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}866 \cdot \left(0{,}58 + \frac{5}{2} \cdot 0{,}75 \right)} = \frac{5{,}495}{20{,}8} = 0{,}264\ с.$$

4. Путь, пройденный почвенным комком за время, определится из уравнения (32):

$$S = \frac{2}{3} \cdot 9{,}81 \cdot 0.0697 \cdot 0.866 \left(0{,}58 + \frac{5}{2} \cdot 0{,}755 \right) - 9{,}81 \cdot 0{,}0697 \cdot 0.5 + 1{,}15 \cdot 0.264 = 0{,}32\ м.$$

Так как длина отделяющей поверхности должна быть $2S \geq 340\ мм$, с целью лучшего отделения без потерь клубней в примеси длина разделяющей поверхности продольной горки должна быть 680-700 мм, а ширина ленты – 1100-1200 мм.

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Основными факторами качественного отделения клубней картофеля от почвенных комков являются угол наклона поверхности, количество подаваемой массы и скорость движения ленты.

2. С целью лучшего отделения почвенных комков необходимо увеличить шероховатость отделяющей поверхности ленты и осуществить подачу сходов с элеватора узкой полосой (толщина слоя) по всей ширине отделяющей поверхности.

Библиографический список

1. Завора В.А. Теоретическое обоснование положения горки для разделения клубней и примесей на картофелеуборочных машинах / В.А. Завора, И.М. Зорин // Вестник АГАУ. Барнаул, 2004. № 2(14). С. 189-192.

2. Кусов Т.Т. Элементы теории и исследование процесса отделения клубней от почвенных комков / Т.Т. Кусов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1966. № 5.