

В.М. Булгаков, проф., д-р техн. наук, чл.-кор. УААН,

Национальный аграрный университет, г.Киев

М.И. Черновол, проф., д-р техн. наук, чл.-кор. УААН,

Н.А. Свирень, проф., канд. техн. наук,

Кировоградский национальный технический университет

Теоретические исследования роторного ботвосрезающего аппарата

Исследовано и проанализировано технологический процесс работы роторного ботвосрезающего аппарата с горизонтальной осью вращения перпендикулярной к оси строки корнеплодов. Составлены новые дифференциальные уравнения взаимодействия дугообразного ножа ротора с пучком ботвы сахарной свеклы

роторный барабан с горизонтальной осью вращения, номограмма, скорость резания, уравнение движения конца ножа, дифференциальное уравнение прямолинейного движения пучка ботвы

Применение массового срезания ботвы кроме безусловных преимуществ, таких как простота конструкции устройств, которые могут его осуществить, и высокая производительность работы, имеет и существенные недостатки. Так, отсутствие индивидуального подхода к обрезанию ботвы с каждого корнеплода приводит к тому, что с одних корнеплодов некачественно срезается ботва (что имеет место для корнеплодов, которые расположены низко, или ниже поверхности почвы), со вторых (которые выступают над уровнем поверхности почвы) наоборот – отрезается и удаляется значительная масса головки корнеплода. Ботва, которая срезана аппаратами массового срезания, которые имеют горизонтальную ось вращения, не всегда пригодна для дальнейшего использования, поскольку она слишком измельчена (из-за повторных срезов). Указанные аппараты в процессе работы могут захватывать частицы почвы и пыль, которая также ухудшает качество срезанной массы ботвы. Использование ботвосрезающих аппаратов такого принципа со значительной шириной захвата также снижает качество их работы, поскольку при этом значительно ухудшается копирование поверхности почвы, особенно в поперечном направлении. Фактически в пределах ширины захвата осуществляется только копирование среднего уровня поверхности почвы (т.е. уровня, который определяется неровностями поверхности двух междурядий), а не самой поверхностью, которая образована головками корнеплодов.

Наиболее распространенным ботвосрезающим аппаратом массового срезания является аппарат роторного барабана с горизонтальной осью вращения, которая в процессе работы перпендикулярна к оси строки корнеплодов. Срезающие ножи у него установлены шарнирно и осуществляют вращение в вертикальных плоскостях.

Рассмотрим рабочий процесс такого ботвосрезающего аппарата (рис. 1), используя основные положения, изложенные в [1].

Пусть барабан радиуса r вращается с угловой скоростью ω вокруг оси, которая поступательно движется в горизонтальном направлении со скоростью V_M . Движение ножей является встречно-вращательным. Важнейшим моментом при этом является установление траектории движения концов ножей барабана, которые находятся на радиусах R , при их вращении вокруг оси барабана при поступательном перемещении ботвосрезающей машины.

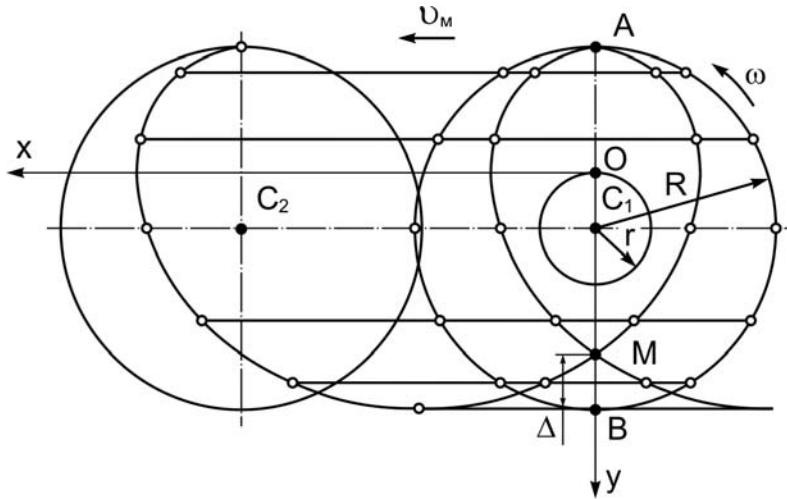


Рисунок 1 – Траектория движения ножей роторного ботвосрезающего аппарата

Пусть ротор из положения 1 переместился в положение 2 (т.е. центр барабана C_1 занял положение C_2). Отследим траекторию движения одного из ножей ротора, который шарнирно закреплен в точке O и имеет конец – точку A . С точкой O свяжем плоскую прямоугольную систему координат xOy . Концы лезвий ножей барабана (в том числе и точка A) в абсолютном движении перемещаются по удлинненным циклоидам, которые в принятой системе координат будут иметь такие параметры:

$$\left. \begin{aligned} x &= r(\omega t - \lambda \sin \omega t), \\ y &= r(1 - \lambda \cos \omega t). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\lambda = \frac{R}{r}$ – отношение радиуса конца лезвия к радиусу барабана;

r – радиус барабана, м;

R – радиус концов лезвий ножей ротора, м;

ω – угловая скорость ротора, c^{-1} .

Как видим из траектории движения точки A , неравномерность среза ботвы Δ отвечает длине отрезка BM на схеме, которая может быть определена таким соотношением

$$\Delta = R + r - OM. \quad (2)$$

Отрезок OM является координатой узловой точки M при $x = 0$, т.е.

$$OM = r(1 - \lambda \cos \omega t_o), \quad (3)$$

где ωt_o – наименьший плюсовой корень трансцендентного уравнения

$$\frac{\omega t_o}{\lambda} = \sin \omega t_o. \quad (4)$$

Корни уравнения (4) (кроме очевидного $\omega t = 0$) могут быть определены графически. Они отвечают точкам пересечения прямых $\frac{\omega t}{\lambda}$ с синусоидой $y = \sin \omega t$.

С учетом изложенного, уравнения (2) окончательно можно записать в таком виде

$$\Delta = R(1 + \cos \omega t_o). \quad (5)$$

Решим уравнение (5) и подадим графически в виде номограммы (рис. 2), которая дает возможность определить неравномерность высоты среза для любых параметров роторного ботвосрезающего аппарата.

Определим неравномерность среза ботвы по высоте при разных параметрах роторного ботвосрезающего аппарата. Например, если ботвосрезающий аппарат движется с поступательной скоростью $V_M = 2,0 \text{ м/с}$ и круговая скорость концов его ножей равняется $V_o = 44,7 \text{ м/с}$, то при диаметре ротора $D = 570 \text{ мм}$ неравномерность среза будет составлять $2,7 \text{ мм}$.

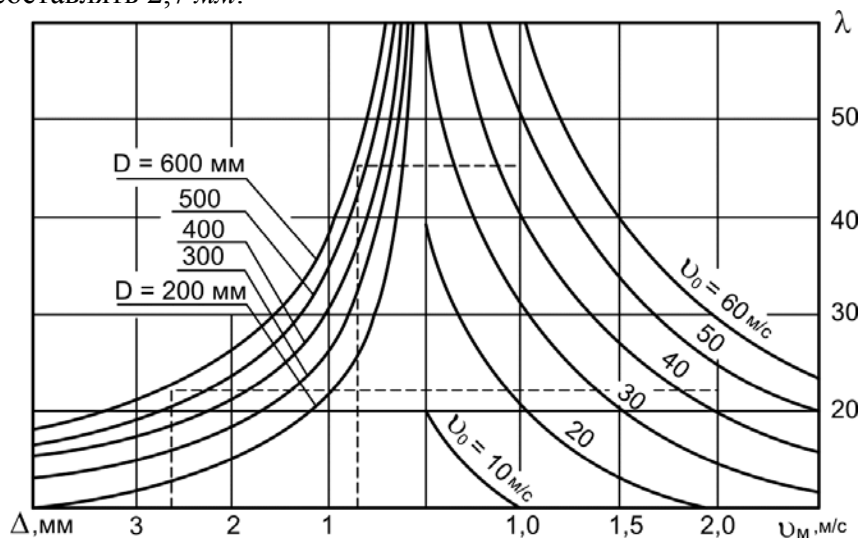


Рисунок 2 – Номограмма для определения параметров роторных ботвосрезающих аппаратов

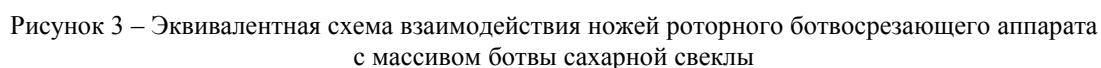
Таким образом, в ботвосрезающих аппаратах роторного типа, при достаточно высокой скорости резания, неравномерность высоты среза, которая определяется траекторией движения концов ножей, является незначительной.

Теоретические расчеты скорости резания ботвы сахарной свеклы ботвосрезающими аппаратами роторного типа можно считать аналогичными расчетам, которые касаются косилок с ротационным режущим аппаратом [2]. Проведем такие расчеты для роторного ботвосрезающего аппарата, который осуществляет бесподпорный бескопирный сплошной срез ботвы сахарной свеклы. Предметом такого исследования будет также определение зоны резания ботвы в зависимости от кинематических и конструктивных параметров ротационного ботвосрезающего аппарата, условия полного перерезания пучка ботвы при одноразовом столкновении с лезвием ножа дугообразной формы и аналитическое определение других конструктивных параметров режущего аппарата. Для этого, прежде всего, составим эквивалентную схему взаимодействия ножей ротационного ботвосрезающего аппарата с пучками ботвы. Рассмотрим ботвосрезающий аппарат в продольно-вертикальной плоскости и представим его в виде ротора, на периферии которого расположены дугообразные ножи, установленные шарнирно (рис. 3).

Ротор движется поступательно (направление скорости $\bar{V}_M$ поступательного движения показано стрелкой) и одновременно вращается (с угловой скоростью ω) в направлении, которое совпадает с направлением поступательного перемещения. При этом ось ротора (на схеме точка O) установлена на высоте H_1 над уровнем поверхности почвы. Ротор движется вдоль строки корнеплодов сахарной свеклы, в которых высота расположения ботвы над уровнем поверхности почвы обозначена через H . Ротор выполняет сплошной срез ботвы на установленной высоте h над уровнем поверхности почвы. Проведем через центр ротора (точка O) прямоугольную плоскую декартову систему координат Oxy , у которой ось x совпадает с направлением поступательного движения ротора, а ось y направлена книзу. Покажем на эквивалентной схеме дугообразный нож 1 в наиболее низком положении ротора (точка O_1), при котором он

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= v_M t + R \sin \omega t, \\ y_1 &= R \cos \omega t, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где v_M – поступательная скорость движения ботвосрезающей машины;
 R – радиус ротора к кромке лезвия;
 ω – угловая скорость ротора.



Рассмотрим дальше движение второго ножа ротора. Соседний нож 2, который расположен на роторе сразу за ножом 1 и смещен по длине круга ротора на величину центрального угла α , опишет точно такую же кривую, но смещенную в направлении вектора $\vec{v}_M$ на величину x_b (поскольку нож 2 начинает срезание ботвы в точке b). При этом центр ротора (точка O) переместится поступательно на величину $v_M t_b$. Таким образом, величина x_b будет равняться:

где α – центральный угол между двумя соприкасающимися, но такими, что двигаются по одному следу, ножами 1 и 2;

Уравнения движения конца ножа 2 с учетом (6), как видим из рис. 3, в параметрической форме будут иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= v_M t + R \sin(\omega t - \alpha), \\ y_2 &= R \cos(\omega t - \alpha). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Траекторией конца ножа 2 будет кривая bc .

Определив траектории O_1a и bc движения двух соседних ножей (1 и 2) ротора, есть возможность определить зону срезания S двух ножей по длине срезания. В проекции на ось x зона срезания S равняется:

$$S = x_c - x_b, \quad (9)$$

где x_c – абсцисса точки c , т.е. точки конца срезания.

Абсциссу x_c точки c конца резания определим следующим образом. Если H – высота пучка ботвы, H_1 – высота установления оси ротора над уровнем поверхности почвы, а δ – величина, которая равняется $\delta = H_1 - H$, тогда координата y_c точки c конца срезания будет равняться:

$$y_c = \delta = R \cos(\omega t_c - \alpha), \quad (10)$$

откуда находим

$$\cos(\omega t_c - \alpha) = \frac{\delta}{R} \quad (11)$$

и окончательно определяем из (11) время t_c :

$$t_c = \frac{1}{\omega} \left[\alpha + \arccos\left(\frac{\delta}{R}\right) \right]. \quad (12)$$

Теперь, для момента времени $t = t_c$, используя (8), определяем абсциссу x_c . Она будет равняться:

$$x_c = v_M t_c + R \sin(\omega t_c - \alpha). \quad (13)$$

Дальше, возведем в квадрат обе части выражения (11), что будет равняться $\cos^2(\omega t_c - \alpha) = \frac{\delta^2}{R^2}$, тогда:

$$\sin(\omega t_c - \alpha) = \sqrt{1 - \cos^2(\omega t_c - \alpha)} = \sqrt{1 - \frac{\delta^2}{R^2}} = \frac{\sqrt{R^2 - \delta^2}}{R}. \quad (14)$$

Подставляя выражения (12) и (14) в (13), будем иметь:

$$x_c = \frac{v_M}{\omega} \left[\alpha + \arccos\left(\frac{\delta}{R}\right) \right] + \sqrt{R^2 - \delta^2}. \quad (15)$$

Подставим (15) и (7) в (9), окончательно получим значение длины зоны срезания S :

$$\begin{aligned} S &= \frac{v_M}{\omega} \left[\alpha + \arccos\left(\frac{\delta}{R}\right) \right] + \sqrt{R^2 - \delta^2} - \frac{v_M \alpha}{\omega} = \\ &= \frac{v_M}{\omega} \arccos\left(\frac{\delta}{R}\right) + \sqrt{R^2 - \delta^2}. \end{aligned} \quad (16)$$

Определим дальше величину проникновения лезвия дугообразного ножа в пучок ботвы в процессе его первого столкновения с пучком ботвы. Для этого рассмотрим взаимодействие отдельного пучка ботвы условного диаметра d , расположенного на головке корнеплода, и отдельного дугообразного ножа, который вращается с угловой скоростью ω вместе с ротором (рис. 4). При этом последовательно рассматриваем движение пучка ботвы, которая имеет одну степень свободы и приведенную массу $m_{np.}$, и движение дугообразного ножа, который имеет приведенную массу $M_{np.}$. Отсчет начала движения пучка ботвы под действием удара лезвия дугообразного ножа начинается от вертикали, проведенной через точку O , которая определяет положение

недеформированного пучка ботвы. Через точку O проведем горизонтальную ось x . Примем такое предположение, что перемещение приведенной массы $m_{np.}$ пучка ботвы

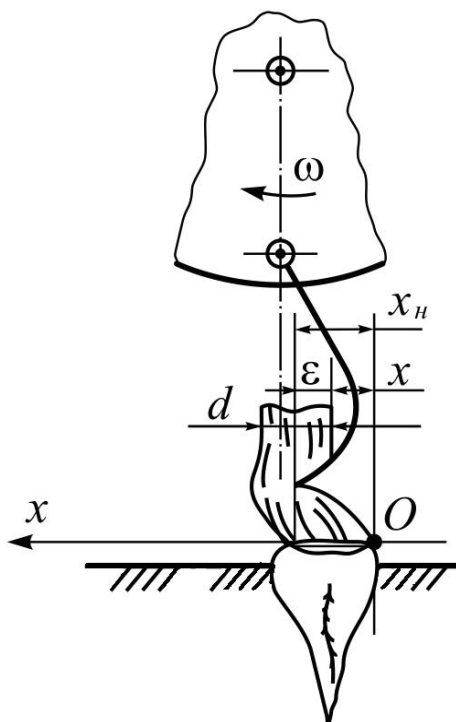


Рисунок 4 – Схема взаимодействия дугообразного ножа с пучком ботвы сахарной свеклы

и приведенной массы $M_{np.}$ лезвия дугообразного ножа во время удара будут прямолинейными на всем участке срезания. Тогда пучок ботвы отклонится от начального положения (точка O) на расстояние x , а конец лезвия дугообразного ножа переместится на расстояние x_n . Таким образом, для определения величины проникновения лезвия ножа в пучок ботвы необходимо отдельно составить дифференциальные уравнения движения приведенной массы пучка ботвы и приведенной массы дугообразного ножа, для определения их законов перемещений, а потом рассмотреть разность этих перемещений, которая и будет величиной проникновения ϵ ножа в пучок ботвы.

Составим дифференциальное уравнение прямолинейного движения пучка ботвы, которое будет иметь такой вид (рис. 4):

$$m_{np.} \ddot{x} = P(\epsilon) - cx, \quad (17)$$

где $m_{np.}$ – масса пучка ботвы, приведенная к точке удара;

x – прямолинейное перемещение приведенной массы $m_{np.}$;

$P(\epsilon)$ – сила, которая действует на пучок ботвы со стороны ножа, которая зависит от величины ϵ проникновения ножа в пучок;

cx – сила упругого сопротивления изгиба пучка ботвы.

Для решения уравнения необходимо определить значение силы $P(\epsilon)$. Зависимость силы P от ϵ обычно носит нелинейный характер. Однако, как показали предыдущие исследования [2], для определения силы $P(\epsilon)$ можно исходить из следующего выражения:

$$P(\epsilon) = P_{cp.} = \frac{A}{d}, \quad (18)$$

где $P_{cp.}$ – средняя сила резания;

A – работа, необходимая для поперечного перерезания пучка ботвы;

d – диаметр пучка ботвы.

Подставляя (18) в (17), будем иметь такое уравнение движения пучка ботвы при срезании дугообразным ножом:

$$m_{np} \ddot{x} + c x = P_{cp}. \quad (19)$$

Проинтегрируем полученное дифференциальное уравнение (19). Очевидно, что общее решение однородного дифференциального уравнения имеет следующий вид:

$$x_{одн.} = C_1 \sin \sqrt{\frac{c}{m_{np}}} t + C_2 \cos \sqrt{\frac{c}{m_{np}}} t. \quad (20)$$

Найдем частичное решение неоднородного дифференциального уравнения. По виду правой части уравнения (19) можно написать:

$$x_{част.} = M,$$

где M – неопределенная константа.

Подставив данное решение в уравнение (19), получим:

$$M = \frac{P_{cp.}}{c}. \quad (21)$$

Итак, частичное решение неоднородного дифференциального уравнения будет:

$$x_{част.} = \frac{P_{cp.}}{c}.$$

Таким образом, общее решение дифференциального уравнения (19) имеет такой вид:

$$x = C_1 \sin \sqrt{\frac{c}{m_{np}}} t + C_2 \cos \sqrt{\frac{c}{m_{np}}} t + \frac{P_{cp.}}{c}. \quad (22)$$

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 находим по следующим начальным условиям: при $t = 0$: $x = 0$, $\dot{x} = 0$ ($C_1 = 0$, $C_2 = -\frac{P_{cp.}}{c}$).

В результате получим окончательное выражение, которое описывает перемещение приведенной массы m_{np} пучка ботвы в любой момент времени t :

$$x = \frac{P_{cp}}{c} \left(1 - \cos \sqrt{\frac{c}{m_{np}}} t \right). \quad (23)$$

Для нахождения закона движения дугообразного ножа необходимо составить дифференциальное уравнение его прямолинейного движения на участке срезания. Данное дифференциальное уравнение будет иметь такой вид:

$$M_{np} \ddot{x}_n = -P_{cp.} + \mu (\upsilon_n t - x_n), \quad (24)$$

где M_{np} – приведенная масса ножа (масса ножа, которая приведена к точке удара лезвия об пучок ботвы);

x_n – перемещение приведенной массы ножа;

υ_n – критическая скорость поступательного перемещения ножа, при которой возможен бесподпорный срез свободно стоящих пучков ботвы;

$\upsilon_n t$ – перемещение кромки лезвия ножа в момент времени t при отсутствии столкновения с пучком ботвы, когда нож находится в радиальном положении;

$(\upsilon_n t - x_n)$ – отклонение ножа от радиального его положения вследствие столкновения с пучком ботвы в процессе срезания;

μ – коэффициент пропорциональности (интенсивность нагрузки, которая действует на нем при отклонении его на единицу длины).

Второй член правой части уравнения (24) представляет собой усилие, которое возникает при отклонении ножа от радиального положения из-за наличия центробежной силы.

Проинтегрируем дифференциальное уравнение (24). Для этого перепишем данное уравнение следующим образом:

$$\ddot{x}_n + \frac{\mu}{M_{np.}} x_n = -\frac{P_{cp.}}{M_{np.}} + \frac{\mu v_n}{M_{np.}} t. \quad (25)$$

Составив для данного дифференциального уравнения необходимое характеристическое уравнение и определив его корни, можно записать общее решение однородного дифференциального уравнения:

$$x_{n\text{одн.}} = C_1 \sin \sqrt{\frac{\mu}{M_{np.}}} t + C_2 \cos \sqrt{\frac{\mu}{M_{np.}}} t. \quad (26)$$

Частичное решение неоднородного дифференциального уравнения будем искать в виде:

$$x_{n\text{част.}} = At + B, \quad (27)$$

где A и B – неопределенные коэффициенты.

Подставив выражение (27) в выражение (25), находим, что $A = v_n$, $B = -\frac{P_{cp.}}{\mu}$.

Ведь:

$$x_{n\text{част.}} = v_n t - \frac{P_{cp.}}{\mu}. \quad (28)$$

Тогда общее решение уравнения (25) будет иметь такой вид:

$$x_n = C_1 \sin \sqrt{\frac{\mu}{M_{np.}}} t + C_2 \cos \sqrt{\frac{\mu}{M_{np.}}} t + v_n t - \frac{P_{cp.}}{\mu}. \quad (29)$$

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 также находим при следующих начальных условиях: при $t = 0$: $x_n = 0$, $\dot{x}_n = v_n$ ($C_1 = 0$, $C_2 = P_{cp.} / \mu$).

В результате получаем закон движения дугообразного ножа роторного ботвосрезающего аппарата в таком виде:

$$x_n = v_n t - \frac{P_{cp.}}{\mu} \left(1 - \cos \sqrt{\frac{\mu}{M_{np.}}} t \right). \quad (30)$$

Теперь, используя полученные выражения (23) (30), получаем возможность определить величину проникновения ε ножа в пучок ботвы (см. рис. 4):

$$\varepsilon = x_n - x,$$

или:

$$\varepsilon = v_n t - \frac{P_{cp.}}{\mu} \left(1 - \cos \sqrt{\frac{\mu}{M_{np.}}} t \right) - \frac{P_{cp.}}{\mu} \left(1 - \cos \sqrt{\frac{c}{m_{np.}}} t \right). \quad (31)$$

Полученное выражение (31) дает возможность определить условия полного срезания пучка ботвы диаметром d при первом столкновении лезвия дугообразного ножа с пучком ботвы.

Очевидно, что в этом случае необходимо, чтобы $\varepsilon = d$, а потому выражение (31) приобретет такой вид:

$$d = v_n t - \frac{P_{cp.}}{\mu} \left(1 - \cos \sqrt{\frac{\mu}{M_{np.}}} t \right) - \frac{P_{cp.}}{\mu} \left(1 - \cos \sqrt{\frac{c}{m_{np.}}} t \right). \quad (32)$$

Таким образом, выражение (32) дает возможность задавать такие

конструктивные и кинематические параметры роторного ботвосрезающего аппарата, при которых срез пучка ботвы происходит в процессе одноразового столкновения лезвия дугообразного ножа с пучком ботвы. Для срезания пучка ботвы необходимо, чтобы нож проник в пучок на величину его диаметра d прежде, чем изгиб всего пучка x превысит некоторое заданное значение $x_{кр.}$.

Характер решения уравнения (32) будет зависеть главным образом от закона изменения μ , поскольку $\mu = f(v_n)$.

Действительная круговая скорость ротора определяется из условия, что линейная скорость конца ножа должна быть больше критической скорости, необходимой для срезания свободно стоящих пучков ботвы:

$$v = \frac{\pi n R}{30} > v_n, \quad (33)$$

откуда

$$n > \frac{30 v_n}{\pi R}, \quad (34)$$

где R – радиус, или расстояние от оси вращения ротора к кромке лезвия дугообразного ножа.

Радиус ротора выбираем из условия, что размер зоны резания по вертикали не должен превышать величину R , т.е. $R > H - h$. Практически радиус ротора находится в пределах 300...350 мм [2].

Ширину дугообразного ножа принимаем, исходя из максимального диаметра $d_{\max}$ пучка ботвы:

$$B = d_{\max} + (30 \div 50), \text{ мм.} \quad (35)$$

Длина рабочей части ножа $O_1 e$ (см. рис. 3) определяется углом установки ножа τ . При уменьшении угла τ ухудшается сход срезанной массы ботвы с ножа, а при увеличении – значительно возрастает энергия на срезание и преодоление сопротивления воздуха. Экспериментальные исследования [2] показали, что целесообразно угол τ принимать в пределах 30...40°.

Если ботвоуборочная машина срезает массив ботвы без предыдущего наклона, то до конца фазы срезания на рабочей части ножа накапливаются срезанные кусочки ботвы за счет подпора еще не срезанных пучков, а потом под действием центробежных сил они сходят с поверхности ножа. Таким образом, на рабочей поверхности ножа должны поместиться все пучки ботвы, которые срезаются на участке S . Обозначим K – количество пучков ботвы на 1 м^2 ; $\sqrt{K}$ – количество пучков ботвы, размещенных на единице длины; N – количество пучков ботвы на длине S зоны резания; d – диаметр пучка ботвы.

Тогда:

$$O_1 e > N d = \sqrt{K} S d. \quad (36)$$

Определим число рядов ножей, которые проходят по одному следу. Если срезаются длинные, предварительно наклоненные стебли ботвы, или растительные частицы, то за длину срезания l можно принять линию ac . Связь l с числом рядов ножей z получим таким образом: поскольку

$$ac = l = \frac{v_M \alpha}{\omega}, \quad (37)$$

а

$$\alpha = \frac{2\pi}{z}, \quad (38)$$

это

$$l = \frac{2\pi v_M}{z\omega}, \quad (39)$$

отсюда

$$z = \frac{2\pi v_M}{l\omega}. \quad (40)$$

Если же срезаются прямостоящие пучки (стебли) ботвы, то согласно рис. 3 максимальная длина срезания по вертикали с достаточной для практических расчетов точностью также будет $ac = l$. Таким образом, и для данного случая можно пользоваться полученными выше соотношениями.

Рассмотрим дальше подробно уравнивание роторного ботвосрезающего аппарата и выбор параметров ножа.

Во время удара ножа по пучку ботвы со стороны последнего на нож будет действовать импульс силы S (рис. 5).

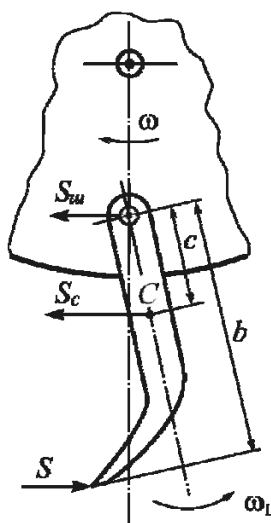


Рисунок 5 – Схема действия импульсов на дугообразный нож во время удара по пучку ботвы

Нож, отклоняясь в сторону, противоположную направлению вращения ротора, с переменной угловой скоростью ω_1 , создает противодействие ударному импульсу: импульсом в центре веса ножа S_C и импульсом в шарнире $S_{ш}$. Тогда дифференциальное уравнение вращения ножа относительно шарнира будет иметь такой вид:

$$J \frac{d\omega_1}{dt} = \sum_{i=1}^n M_i, \quad (41)$$

где J – момент инерции ножа относительно шарнира;

ω_1 – угловая скорость вращения ножа относительно шарнира;

$\sum_{i=1}^n M_i$ – сумма моментов всех внешних сил, которые действуют на нож относительно шарнира.

Если перейти к среднему ускорению, то выражение (41) можно представить в таком виде:

$$J \frac{\Delta\omega_1}{\Delta t} = M, \quad (42)$$

где $\Delta\omega_1 = \omega_1 - \omega_{10}$;

ω_{10} – начальная угловая скорость вращения ножа относительно шарнира;

$M = \sum_{i=1}^n M_i$ – главный момент всех внешних сил относительно шарнира.

Поскольку

$$\omega_{10} = 0, \quad (43)$$

имеем

$$\Delta\omega_1 = \omega_1. \quad (44)$$

Тогда выражение (42) можно записать следующим образом:

$$J\omega_1 = M \Delta t. \quad (45)$$

С небольшой погрешностью можно считать, что момент M является произведением силы P , которая действует на конец ножа во время удара ножа по пучку ботвы, на плечо этой силы относительно шарнира, т.е. на длину ножа:

$$M = P b. \quad (46)$$

Ведь выражение (45) можно записать так:

$$J\omega_1 = P b \Delta t = P \Delta t b = S b, \quad (47)$$

где $S = P \Delta t$ – ударный импульс силы P .

Тогда, как видно из схемы рис. 5, импульс S_{III} реакции шарнира дугообразного ножа будет равняться:

$$S_{III} = S - S_C, \quad (48)$$

где S_C – импульс силы, приведенный к центру веса дугообразного ножа.

Поскольку, учитывая (47),

$$S = \frac{J\omega_1}{b}, \quad (49)$$

а импульс S_C силы, приведенный к центру веса ножа, равняется количеству движения:

$$S_C = m v_C = m \omega_1 c, \quad (50)$$

где m – масса ножа;

v_C – линейная скорость центра веса дугообразного ножа, получим

$$S_{III} = \frac{J\omega_1}{b} - m \omega_1 c. \quad (51)$$

Ротор будет динамически уравновешен, если импульс реакции шарнира ножа равняется нулю ($S_{III} = 0$), т.е.

$$\left(\frac{J}{b} - mc \right) \omega_1 = 0, \quad (52)$$

или

$$\frac{J}{b} - mc = 0. \quad (53)$$

Поскольку $J = m \rho^2$, то можно записать

$$\frac{m \rho^2}{b} - mc = 0, \quad (54)$$

отсюда

$$\rho^2 = b c, \quad (55)$$

где ρ – радиус инерции дугообразного ножа.

Итак, ротор с дугообразными ножами роторного ботвосрезающего аппарата будет динамически уравновешен, если размеры и массу ножа выбрать таким образом, чтобы квадрат радиуса ρ инерции ножа равнялся произведению длины ножа на расстояние от центра его веса к шарниру подвески.

Вторым условием выбора механических и геометрических параметров ножа роторного ботвосрезающего аппарата является необходимость иметь в начальный момент максимальную скорость срезания. Это условие выполняется, если в момент встречи лезвия с пучком ботвы относительная скорость колебаний ножа совпадает с круговой скоростью ротора. Перерезание пучка ботвы происходит через каждый оборот ротора, поэтому для выполнения вышеприведенного условия нож за время одного оборота ротора $t_o = \frac{2\pi}{\omega}$ должен сделать $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}$ и т.д. колебаний, т.е. время t_o и период T колебаний ножа должны быть связаны таким соотношением

$$\lambda T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (56)$$

где λ – плюсовое число $\left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2} \dots\right)$.

Чтобы определить период колебаний T , необходимо найти закон колебательного движения дугообразного ножа под действием центробежной силы P , не учитывая при этом силы трения в шарнире ножа и в других сопротивлениях, которые усложняют задачу. Дифференциальное уравнение колебательного движения дугообразного ножа будет иметь следующий вид:

$$J_A \ddot{\varphi} = M_A(P) = -m R \omega^2 AB. \quad (57)$$

Знак минус показывает, что момент противоположен отклонению ножа от первоначального нейтрального положения и $R = OC$ (рис. 6). В свою очередь, $AB = AO \cdot \sin \gamma$. Из треугольника AOC по теореме синусов имеем:

$$\frac{AC}{\sin \gamma} = \frac{CO}{\sin(\pi - \varphi)}, \quad (58)$$

отсюда

$$\sin \gamma = \frac{AC}{CO} \sin(\pi - \varphi) = \frac{AC}{CO} \sin \varphi. \quad (59)$$

Для малых углов отклонения $\sin \varphi = \varphi$. В свою очередь, $AO = r$, расстояние AC обозначим через c . Тогда

$$\sin \gamma = \left(\frac{c}{R}\right) \sin \varphi, \quad (60)$$

Итак, дифференциальное уравнение (57) приобретет вид:

$$J_A \ddot{\varphi} = -m R \omega^2 r \sin \gamma, \quad (61)$$

или, учитывая (60):

$$J_A \ddot{\varphi} = -m c r \omega^2 \varphi. \quad (62)$$

Записав дифференциальное уравнение (62) в виде:

$$\ddot{\varphi} + k^2 \varphi = 0, \quad (63)$$

находим значение k^2 :

$$k^2 = \frac{m c r \omega^2}{J_A}. \quad (64)$$

При этом, учитывая выражение (64), период колебаний дугообразного ножа будет равняться:

$$T = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{\omega} \sqrt{\frac{J_A}{m c r}}. \quad (65)$$

Подставив полученное значение T в выражение (56), будем иметь:

$$\lambda \frac{2\pi}{\omega} \sqrt{\frac{J_A}{mcr}} = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (66)$$

или

$$\lambda \sqrt{\frac{J_A}{mcr}} = 1. \quad (67)$$

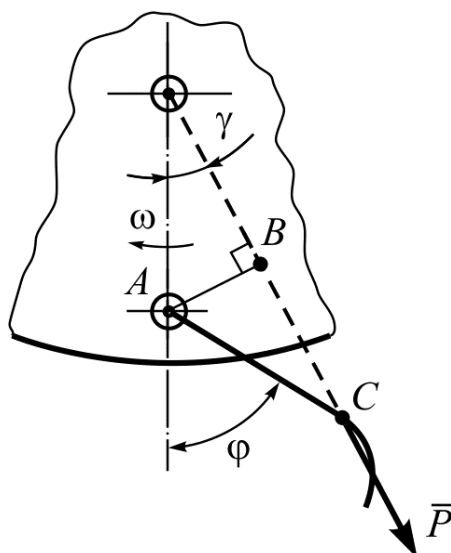


Рисунок 6 – Схема для определения периода колебаний дугообразного ножа ботвосрезающего аппарата

Таким образом, выполнение этого условия и обеспечит максимальную начальную скорость срезания пучка ботвы роторным ботвосрезающим аппаратом.

На основании всего вышеизложенного можно сделать такие выводы:

1. Используя основные положения теории бесподпорного бескопирного среза растительной массы, составлены основные теоретические предпосылки расчета ротационного ботвосрезающего аппарата ботвосрезающей машины.

2. Аналитически найдены зона срезания ботвы, величина проникновения лезвия дугообразного ножа в пучок ботвы, в частности условия полного среза пучка ботвы при одноразовом столкновении с ножом и другие условия, которые обеспечивают сплошной срез массива ботвы.

3. Аналитически найдены условия динамического уравнивания роторного ботвосрезающего аппарата. Определены условия выбора механических и геометрических параметров дугообразного ножа роторного ботвосрезающего аппарата, которые обеспечивают максимальную скорость срезания в начальный момент.

4. Используя полученные аналитические зависимости, есть возможность рассчитывать и проектировать новые конструкции ротационных срезающих аппаратов ботвосрезающих машин.

Дальнейшим усовершенствованием принципа массовой уборки ботвы является третий, комбинированный принцип, который фактически объединяет первые два принципа. При таком принципе осуществляется поэтапное срезание ботвы с головок корнеплодов, когда на первом этапе осуществляется массовое срезание ботвы аппаратами, которые обеспечивают слишком высокий срез, дальше аппараты с механизмами копирования обрезают головки корнеплодов (или дообрезчики пассивного типа отрезают головки) и, в конце концов, щетками окончательно доочищают головки корнеплода от остатков ботвы.

Список литературы

1. Хвостов В.А., Рейнгарт Э.С. Машины для уборки корнеплодов и лука (теория, конструкция, расчет). – М.: ВИСХОМ, 1995. – 391 с.
2. Теория, конструкция и расчет сельскохозяйственных машин: Учебник для вузов сельскохозяйственного машиностроения / Е.С. Босой, О.В. Верняев, И.И. Смирнов, Е.Г. Султан-Шах; Под ред. Е.С. Босого. – 2-е изд., перераб., и доп. – М.: Машиностроение, 1997. – 568 с.
3. Брей В.В. Исследование и разработка механизированного процесса извлечения из почвы корней сахарной свеклы: Дис. ... канд. техн. наук. – К.: УСХА, 1972. – 196 с.
4. Сисолін П.В., Рибак Т.І., Сало В.М. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування. – Кн.2: Машини для рільництва / За ред. М.І. Черновола. – к.: Урожай, 2002. – 362 с.
5. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку. / Д.Г. Войтюк, В.М. Барановський, В.М. Булгаков та ін. – К.: Вища освіта, 2005. – 464 с.

Досліджено і проаналізовано технологічний процес роботи роторного гичкорізаючого апарату з горизонтальною вісю обертання перпендикулярною до вісі стрічки коренеплодів. Складені нові диференціальні рівняння взаємодії дугоподібного ножа ротора з пучком гички цукрового буряка.

Investigational and analysed technological process of work rotor vehicle for cutting away of leaves vehicle with the horizontal ax of rotation of perpendicular to the ax line of root crops. Worked out new differential equations of co-operation of the arched knife of rotor with the bunch of leaves of sugar beet