

**В. М. Булгаков**

*Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины  
г. Киев, Украина  
e-mail: vbulgakov@meta.ua*

**РАСЧЕТНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ  
БОТВОУБОРОЧНОЙ МАШИНЫ,  
ФРОНТАЛЬНО УСТАНОВЛЕННОЙ НА ПРОПАШНОЙ ТРАКТОР**

На основе использования исходных уравнений динамики в форме Лагранжа 2-го рода построена расчетная математическая модель движения ботвоуборочной машины, которая фронтально установлена на колесный трактор. По численному решению уравнений на ПК определены оптимальные конструктивные и кинематические параметры фронтально навешенной на трактор ботвоуборочной машины.

*Ключевые слова:* ботва, срезающий аппарат, трактор, колебания.

**V. M. Bulgakov**

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine  
Kiev, Ukraine  
e-mail: vbulgakov@meta.ua*

**CALCULATED MATHEMATICAL MODEL OF VIBRATIONS OF THE TOP REMOVAL MACHINE  
FRONTALLY MOUNTED ON A WHEELED TRACTOR**

Based on the use of the initial equations of dynamics in the Lagrange form of the second kind, a computational mathematical model of the movement of the top removal machine frontally mounted on a wheeled tractor. On the numerical solution of the equations on the PC, the optimal design and kinematic parameters of the front-mounted machine mounted on the tractor were determined.

*Keywords:* tops, cutting machine, tractor, oscillations.

**Введение**

Высокопроизводительная и качественная уборка ботвы сахарной свеклы остается достаточно сложной и актуальной задачей области свекловодства. В последнее время в мире наиболее широкое распространение получил многостадийный способ уборки ботвы, в основе которого вначале осуществляются сплошной основной срез всего массива ботвы (по ширине захвата уборочной машины), ее сбор и транспортировка в рядом идущее транспортное средство, а в дальнейшем, с использованием индивидуального копирования каждой головки корнеплода в рядке, обеспечивается доочистка или дообрезание (или одновременно доочистка и дообрезание разными рабочими органами) головок корнеплодов от остатков ботвы. Использование пневматических колес в качестве копирующих вызывает колебания ботвоуборочной машины в вертикальной плоскости, которые в наибольшей степени будут влиять на качество выполнения технологического процесса – равномерное срезание ботвы с головок корнеплодов по всей ширине захвата, наиболее полный ее сбор и транспортирование без потерь. Общая методика моделирования сельскохозяйственных машин подробно отражена в работах таких известных ученых, как П. М. Василенко [1], И. С. Нагорский и др.

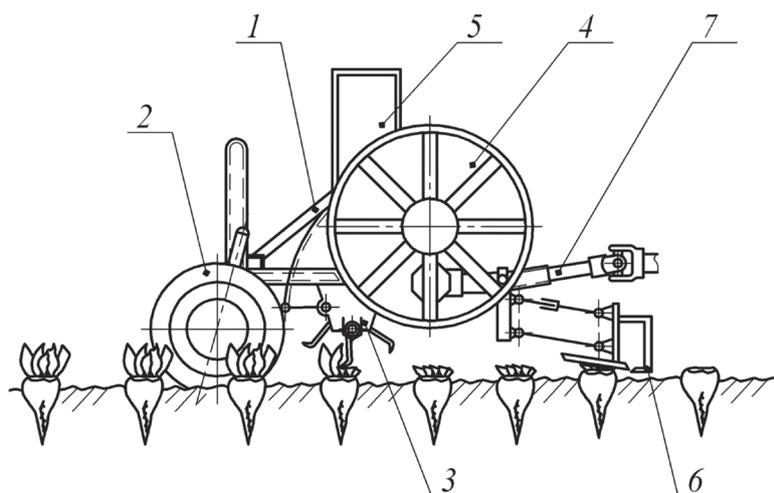
Целью исследования являлось определение влияния кинематических и конструктивных параметров ботвоуборочной машины, фронтально навешенной на колесный трактор, на величину амплитуды колебаний в продольно-вертикальной плоскости ботвосрезающего аппарата.

**Результаты исследований**

Нами разработана новая универсальная ботвоуборочная машина, выполняющая технологический процесс по принципу косилки-измельчителя, которая фронтально навешивается на колесный трактор. В этой машине применяется ротационный ботворежущий аппарат, в котором

срезающие ножи, шарнирно установленные на приводном барабане, имеют дугообразную форму и, вращаясь в продольно-вертикальной плоскости, обеспечивают бесподпорный, бескопирный срез основного массива ботвы по всей ширине захвата [2]. На рисунке 1 показана конструктивно-технологическая схема машины, которая срезает как пучки и листья ботвы, так и растения, находящиеся на свекловичной плантации, и транспортирует срезанную массу в кузов транспортного средства, которое движется рядом. Технологический процесс уборки ботвы сахарной свеклы происходит следующим образом. При движении колесного трактора (с узкими шинами) по рядкам корнеплодов сахарной свеклы копирующие колеса 2, расположенные в передней части подвижной рамы 1, устанавливают ротор 3 с ножами на нужную высоту среза. Ножи имеют дугообразную форму, причем шарнирно установлены на цилиндрической образующей по длине ротора 3 таким образом, что обеспечивают перекрытие всей ширины захвата. Ножи вращаются с большой частотой, благодаря чему обеспечивается срез всего массива ботвы. Абсолютная скорость концов лезвий дугообразных ножей для среза ботвы достигает 20...25 м/с, а для скашивания других, в частности толстостебельных культур, – 40...50 м/с. Срезанная дугообразными ножами ботва движется в верхнюю часть кожуха, где попадает на шнековый транспортер, который перемещает срезанную массу в торцевую часть машины, после чего швырялка 4 через патрубков 5 выгружает ее в кузов транспортного средства, движущегося рядом. Окончательно технологический процесс уборки ботвы происходит при обрезании непосредственно головок корнеплодов установленным сзади дообрезчиком пассивного типа 6. Привод 7 ботвоуборочной машины осуществляется от переднего вала отбора мощности трактора.

Основным преимуществом ботвоуборочной машины ротационного типа является то, что, имея всего лишь один рабочий орган – ротор с ножами, она обеспечивает качественный срез основной массы ботвы и транспортировку ее в транспортное средство, движущееся рядом, или может разбрасывать измельченную ботву на убранную часть свекловичного поля. Ботвоуборочная машина универсальна, имеет высокую надежность и может быть использована как ротационная косилка (то есть может качественно срезать разный травостой высотой до 1 м) [3]. К недостаткам ботвоуборочной машины ротационного типа следует отнести чрезмерное измельчение ботвы в случае ее сбора в кузов транспортного средства, некоторое загрязнение собранной массы ботвы почвенными примесями, особенно при работе на сухой почве и при установке ботвосрезающего аппарата на пониженную высоту среза, значительные сложности технического обслуживания (в частности, при снятии дугообразных ножей для заточки, замены и тому подобное).



1 – рама; 2 – пневматическое копирующее колесо; 3 – роторный ботвосрезающий аппарат; 4 – швырялка срезанной ботвы; 5 – выгрузной патрубков; 6 – дообрезчик головок корнеплодов; 7 – привод рабочих органов

Рисунок 1. – Конструктивно-технологическая схема ботвоуборочной машины, фронтально навешенной на трактор, с ротационным режущим аппаратом

Для определения влияния конструктивных и кинематических параметров ботвоуборочной машины, фронтально навешенной на колесный трактор, на величину амплитуды колебаний в продольно-вертикальной плоскости ботвосрезающего аппарата построим ее математическую модель.

Аналитически рассмотрим движение ботвоуборочной машины только в продольно-вертикальной плоскости, то есть построим математическую модель колебания ботвоуборочной машины при движении по неровной поверхности почвы только в одной плоскости. На основании [1] составим, прежде всего, эквивалентную схему движения фронтально навешенной на трактор ботвоуборочной машины в продольно-вертикальной плоскости (рисунок 2).

В первом приближении считаем, что точка подвеса ботвоуборочной машины к трактору (точка  $O$ ) движется прямолинейно и равномерно, то есть влиянием колебаний самого трактора пренебрегаем. Центр масс фронтально навешенной ботвоуборочной машины находится в точке  $C$ , примерно расположенной на оси роторного ботвосрезающего аппарата, который имеет радиус  $R$ . Массу всей ботвоуборочной машины обозначим через  $M$ ; массу копирующих колес – через  $m = m_1 + m_2$  (где  $m_1$  – масса первого копирующего колеса,  $m_2$  – масса второго копирующего колеса). Силу тяжести ботвоуборочной машины, которая приложена в ее центре масс (точка  $C$ ), – через  $\bar{G}$ . Масса  $m$  обоих копирующих колес сосредоточена в точке  $B$ .

Отнесем данную динамическую систему к неподвижным декартовым координатам  $XOYZ$ . При этом плоскость  $XOZ$  совпадает с продольной плоскостью ботвоуборочной машины и является вертикальной плоскостью к поверхности поля. Поскольку начало систем координат размещено в точке  $O$  (точка подвеса ботвоуборочной машины к трактору), то поворот машины вокруг оси  $OY$ , который определяется углом  $\varphi$ , в конечном итоге и определяет характер вертикальных колебаний ботвоуборочной машины в продольно-вертикальной плоскости. Поворот ботвоуборочной машины в продольно-вертикальной плоскости вокруг оси  $OX$  будет определяться углом  $\psi$ . Пневматические копирующие колеса представлены в виде упругодемпфирующих моделей, которые имеют суммарный коэффициент жесткости  $2c$  и суммарный коэффициент демпфирования  $2a$ .

Считаем, что копирующие колеса в целом при движении в междурядьях посевов сахарной свеклы сминают верхний (более рыхлый) слой поверхности почвы, однако движутся по неровностям, которые имеют продольный профиль, близкий к синусоидальному типу.

В первом приближении можем считать, что пневматическое копирующее колесо, двигаясь в междурядьях посевов сахарной свеклы и сминая верхний рыхлый слой почвы, контактирует с неровностью поверхности поля в точке  $A$ . При этом неровности поверхности почвы (в сглаженном виде) можно представить в виде гармонической функции, то есть аналитическим выражением вида [3]:

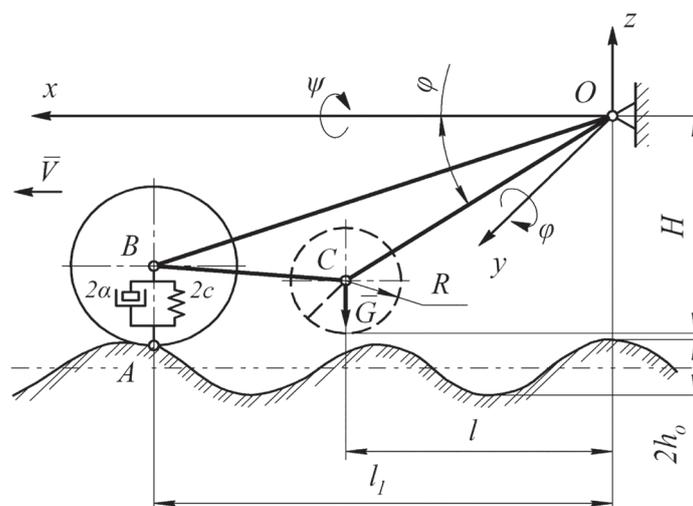


Рисунок 2. – Эквивалентная схема фронтально навешенной на трактор ботвоуборочной машины

$$h = h_o \left( 1 - \cos \frac{2\pi \cdot X}{l_2} \right), \quad (1)$$

где  $h$  – ордината высоты неровности поверхности почвы, м;  $h_o$  – половина высоты неровности поверхности почвы, м;  $l_2$  – шаг неровности поверхности почвы, м;  $X = Vt$  – текущая координата, м;  $V$  – поступательная скорость движения ботвоуборочной машины, м/с.

Положение центра масс ботвоуборочной машины (точка  $C$ ) в продольно-вертикальной плоскости полностью определяется независимой координатой  $\varphi$ . Поскольку центр масс пневматических копирующих колес (точка  $B$ ) осуществляет независимые колебательные движения и ординаты высот неровности поверхности грунта  $h$  значительно меньше, чем длина  $l_1$ , будем считать, что эти колебания могут определяться независимой координатой  $Z$ . Таким образом, рассмотренная колебательная система может быть приведена к двум обобщенным координатам:  $\varphi$  и  $Z$ .

Для составления дифференциальных уравнений движения динамической системы использованы исходные уравнения в форме Лагранжа 2-го рода и проведены соответствующие преобразования (из-за ограниченности объема статьи в данной работе они не приводятся). В конечном результате получена следующая система нелинейных дифференциальных уравнений, представляющая собой расчетную математическую модель движения фронтально навешенной на трактор ботвоуборочной машины:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\varphi} + \frac{2\alpha l_1^2}{I_{oy}} \dot{\varphi} - \frac{2\alpha l_1}{I_{oy}} \dot{Z} - \frac{2cl_1}{I_{oy}} Z + \frac{2cl_1 h}{I_{oy}} &= 0; \\ \ddot{Z} + \frac{2\alpha}{m} \dot{Z} - \frac{2\alpha l_1}{m} \dot{\varphi} + \frac{2c}{m} Z &= \frac{2ch}{m}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $m$  – масса копирующих колес,  $\varphi$  – угол поворота вокруг оси  $OY$ , кг,  $\alpha$  – коэффициент демпфирования копирующих колес,  $H\cdot c/m$ ,  $c$  – коэффициент жесткости шин колес копирующей системы,  $H/m$ ;  $l_1$  – расстояние от оси подвеса ботвоуборочной машины до оси ее копирующих колес, м,  $h$  – ордината высоты неровности поверхности почвы, м,  $I_{oy}$  – момент инерции машины относительно оси  $OY$ , кг $\cdot$ м $^2$ .

Система дифференциальных уравнений с начальными условиями была решена по составленной для этого программе на ПЭВМ адаптированным методом Рунге-Кутты в системе MathCAD.

При численном моделировании на ПК значения скорости движения трактора, который агрегирует ботвоуборочную машину, изменялись от  $V = 10$  км/ч до  $V = 12$  км/ч. Также были использованы различные значения моментов инерции ботвоуборочной машины  $I_{oy}$  (с учетом массы ботвы, находящейся внутри машины), которые зависят от  $M$  – массы ботвоуборочной машины и  $l_1$  – расстояния от оси копирующих колес до оси установки ботвоуборочной машины на трактор. При расчетах выбиралось несколько значений моментов инерции: от  $I_{oy} = 30,0$  кг $\cdot$ м $^2$  до  $I_{oy} = 60,0$  кг $\cdot$ м $^2$ . По результатам численных расчетов были построены графические зависимости.

На основании полученных результатов численного моделирования на ПЭВМ наиболее рациональными параметрами ботвоуборочной машины, фронтально навешенной на трактор, являются:

- масса копирующего колеса  $m = 24$  кг;
- момент инерции машины относительно оси вращения  $I_{oy} = 65,00$  кг $\cdot$ м $^2$ ;
- расстояние от оси подвеса машины к оси копирующих колес  $l_1 = 1,5$  м;
- коэффициент жесткости копирующих колес  $c = 2000...2500$  Н/м;
- коэффициент демпфирования копирующих колес  $\alpha = 73...85$  Н $\cdot$ с/м;
- скорость поступательного движения ботвоуборочной машины должна быть не больше чем 2,5 м/с.

### Выводы

Полученные результаты теоретического исследования, а также результаты численного моделирования на ПЭВМ позволили определить рациональные параметры ботвоуборочной машины. Методика исследований может быть использована при проведении конструкторских разработок других сельскохозяйственных машин, фронтально навешиваемых на трактор.

## Литература

1. Василенко, П. М. Введение в земледельческую механику / П. М. Василенко. – Киев: Сельхозобразование, 1996. – 252 с.
2. Булгаков, В. М. Свеклоуборочные машины / В. М. Булгаков. – Киев: Аграрная наука, 2011. – 351 с.
3. Булгаков, В. М. Совершенствование технологического процесса и машин для уборки корнеплодов свеклы: автореф. дис. ... докт. техн. наук / В. М. Булгаков. – Москва: ВИСХОМ, 1993. – 61 с.

УДК 631.331.022

Поступила в редакцию 05.10.2018  
Received 05.10.2018

**А. Н. Юрин<sup>1</sup>, В. В. Викторovich<sup>1</sup>, А. Д. Четкин<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»  
г. Минск, Республика Беларусь*

*e-mail: anton-jurin@rambler.ru; lab\_plodoyagoda@mail.ru*

*<sup>2</sup>УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»  
г. Минск, Республика Беларусь*

### **ПРОБЛЕМА УБОРКИ ПЛОДОВ СЕМЕЧКОВЫХ И ОРЕХОПЛОДНЫХ КУЛЬТУР С ЗЕМЛИ И ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ**

В статье представлен краткий обзор обеспечения населения Республики Беларусь продуктами питания, производимыми в отрасли плодоводства. Предложено решение проблемы уборки опавших на землю плодов как одно из направлений увеличения объемов производства фруктов с целью максимального использования выращенного урожая.

*Ключевые слова:* плодоводство, уборка плодов с земли, ветровая падалица, средства механизации, подборщик плодов, прицепной комбайн, технологический процесс.

**A. N. Jurin<sup>1</sup>, V. V. Viktorovich<sup>1</sup>, A. D. Chechetkin<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>RUE «SPC NAS of Belarus for Agriculture Mechanization»  
Minsk, Republic of Belarus*

*e-mail: anton-jurin@rambler.ru; lab\_plodoyagoda@mail.ru*

*<sup>2</sup>Educational Establishment «Belarusian State Agrarian Technical University»  
Minsk, Republic of Belarus*

### **THE PROBLEM OF CLEANING FRUITS OF FAMILY AND ORE-FROZEN CROPS FROM THE EARTH AND THE WAYS OF ITS SOLUTION**

The article provides a brief overview of the provision of food products to the population of the Republic of Belarus by the fruit-growing industry. The solution of the problem of harvesting fallen trees to the ground is suggested as one of the directions for increasing the volume of fruit production in order to maximize the use of the cultivated crop.

*Keywords:* fruit growing, harvesting fruits from the ground, windfalls, means of mechanization, pick-up of fruits, trailed combine, technological process.

## Введение

В обеспечении населения республики продуктами питания особое место отводится плодоводству. В соответствии с нормами рационального питания каждый человек должен потреблять в год 98,6 кг плодов и ягод, без учета цитрусовых [1].

В Республике Беларусь производство плодов в сельскохозяйственных организациях составляет 130–150 тыс. тонн ежегодно [2].

Таким образом, в настоящее время душевое потребление плодов и ягод отечественного производства составляет около 20 кг, общее потребление – около 60 кг (среднее за 5 лет). При этом общее потребление плодово-ягодной продукции в год на одного человека в США – 127 кг, Франции – 135 кг, Германии – 126 кг, Италии – 187 кг [3].