

УДК 631.356.46.02

UDC 631.356.46.02

05.00.00 Технические науки

Technical Sciences

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО  
БОТВОДРОБИТЕЛЯ БД-4М С  
ШАРНИРНЫМИ НОЖАМИ**

**RESEARCH OF MODERNIZED BD-4M HAULM  
SHREDDER WITH ARTICULATED KNIVES**

Угланов Михаил Борисович  
д.т.н.  
AuthorID: 456793

Uglanov Mikhail Borisovich  
Doctor of Technical Science  
AuthorID: 456793

Бачурин Алексей Николаевич  
к.т.н.  
РИНЦ SPIN-код=5370-9760

Bachurin Alexey Nikolaevich  
Candidate of Technical Science  
RSCI SPIN-code=5370-9760

Бышов Дмитрий Николаевич  
к.т.н.  
AuthorID: 669483

Byshov Dmitry Nikolaevich  
Candidate of Technical Science  
AuthorID: 669483

Абрамов Юрий Николаевич  
Соискатель  
РИНЦ SPIN-код=7275-7701  
*Рязанский государственный агротехнологический  
университет имени П.А. Костычева, Рязань,  
Россия*

Abramov Yury Nikolaevich  
External PhD Student  
RSCI SPIN-code=7275-7701  
*Ryazan State Agrotechnological University Named  
after P.A. Kostychev, Ryazan, Russia*

В общем комплексе механизированных работ при возделывании картофеля уборка картофеля является одной из главных операций. От качества уборки, полноты сбора урожая во многом зависит эффективность возделывания картофеля в хозяйстве. При уборке картофеля картофелеуборочными машинами и комбайнами производительность их в значительной степени зависит от состояния картофельной ботвы. При сильно развитой и полеглой ботве производительность уборочных машин резко падает из-за забивания рабочих органов, а в отдельных случаях их работа вообще не возможна. Поэтому для облегчения работы картофелеуборочных машин картофельную ботву перед уборкой необходимо удалять. Но процесс уборки ботвы весьма трудоемкий, включающий ряд операций, таких как срез, сгребание и транспортировку, каждая из которых выполняется отдельной машиной. Появление в конце 50...60 годов отечественных машин роторного типа, таких как КИР-1,5, УБД-3, БД-4 дало возможность механизировать процесс уборки картофельной ботвы. Но в процессе эксплуатации замечено, что роторные машины обладают рядом недостатков, вызванных несовершенством конструкции ротора, его кинематических режимов, недостаточной уравновешенностью и рядом других. Поэтому исследования, направленные на совершенствование конструкции машин роторного типа, представляются весьма важными. Для достижения поставленной цели проведены теоретические и экспериментальные исследования,

In the general complex of mechanized works when growing potatoes, potato harvesting is one of the main operations. The efficiency of potatoes growing at the farm largely depends on harvest quality and crop retrieval. When harvesting potatoes with potato harvesters their productivity largely depends on the state of potato haulm. In a case of evolved and laid haulm the harvesting machines productivity falls sharply due to working organs clogging and in some cases their work is not possible at all. Therefore, to facilitate the work of potato harvesters it is necessary to remove potato haulm before harvesting. But the process of haulm removing is very laborious, including several operations, such as mowing, raking and transportation, each of which is performed by a separate machine. The appearance of domestically made rotary-type machines like KIR-1.5, UBD-3 and BD-4 at the end of 1950-1960 made it possible to mechanize the harvesting process of potato haulm. But it was noticed in the operation that rotor machines have a number of drawbacks caused by imperfections in the rotor design, its kinematic regimes, lack of balance and some others. Therefore, studies aimed at improving the design of rotary-type machines seem to be very important. To achieve this goal some theoretical and experimental studies and lab and field tests of the modernized four-row shredder have been carried out. When studying methods of mathematical analysis and elements of classical mechanics were used. Some modern methods were applied in the lab and field tests. The modernized haulm shredder BD-4 was tested at JSC "Avangard" in Ryazan district

лабораторно-полевые испытания модернизированного 4-х рядного ботводробителя. При выполнении теоретических исследований использованы методы математического анализа, элементы классической механики, при выполнении экспериментальной части исследования в лабораторно-полевых условиях применены современные методы. Модернизированный ботводробитель БД-4 прошел хозяйственные испытания в ООО «Авангард» Рязанского района

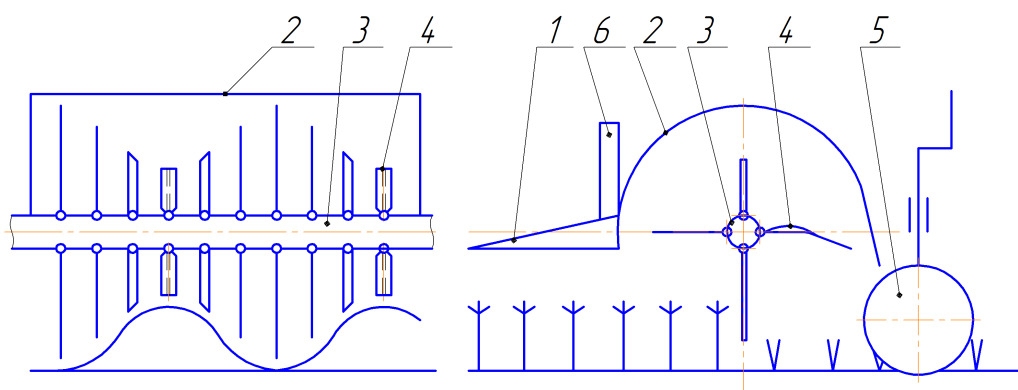
Ключевые слова: КАРТОФЕЛЬНЫЙ БОТВОДРОБИТЕЛЬ, РОТОР ПЕРЕМЕННОГО ДИАМЕТРА, ШАРНИРНЫЕ НОЖИ, ЛАБОРАТОРНО-ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Keywords: POTATO HAULM SHREDDER, VARIABLE DIAMETER ROTOR, FLAIL KNIVES, LAB AND FIELD TESTS

Doi: 10.21515/1990-4665-128-012

Для улучшения работы картофелеуборочной техники на полях с развитой ботвой необходимо предварительно удалять картофельную ботву.

Мы предлагаем модернизированный ботводробитель БД-4М, с переменным диаметром ( Рис. 1 ).



1 – привод; 2 – кожух; 3 – ротор с шарнирными ножами; 4 – шарнирный нож; 5 – опорное колесо; 6 – навесное устройство.

Рисунок 1 - Схема четырехрядного ботводробителя.

Такая конструкция обеспечивает копирование картофельных грядок, дробление ботвы в междурядьях и дает возможность максимального

удаления ботвы и растительных остатков и сброса измельченной ботвы в междурядье.

С целью согласованной работы вращающегося ротора и колеблющихся ножей рассмотрим динамику шарнирных элементов в поле центробежных сил И на основе этого определим параметры ножей и ротора. Схема ротора представлена на Рис 2.

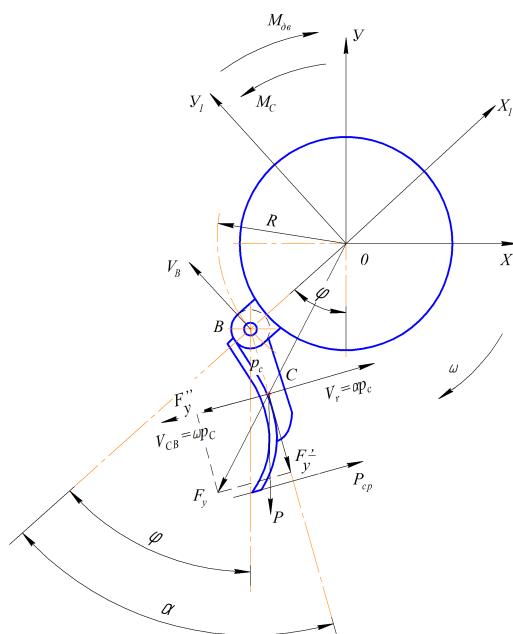


Рисунок 2 - Схема ротора с режущими шарнирными ножами.

Для этого составим дифференциальное уравнение движения системы по методу Лагранжа, состоящей из ротора и режущего элемента. Выберем неподвижную систему координат XOY, проходящую через центр вращения ротора и подвижную систему координат X1OY1, вращающуюся вместе с ротором и проходящую через центр вращения ротора и ось подвеса режущего элемента.

Примем за обобщенные координаты системы углы отклонения  $\varphi$  и  $\alpha$ , где  $\varphi$  - угол отклонения ротора от вертикали,  $\alpha$  – угол отклонения

режущего элемента от равновесного положения. Тогда лагранжевы дифференциальные уравнения, которым должны удовлетворять обобщенные координаты как функции времени, могут быть записаны в общем виде:

$$\frac{d\partial T}{dt\partial\dot{\varphi}} - \frac{\partial T}{\partial\dot{\varphi}} = Q_1 \quad (1)$$

$$\frac{d\partial T}{dt\partial\dot{\alpha}} - \frac{\partial T}{\partial\dot{\alpha}} = Q_2 \quad (2)$$

где  $T$  – кинетическая энергия системы;

$Q_1$  и  $Q_2$  – обобщенные силы;

$\varphi$  и  $\alpha$  – обобщенные координаты.

Определив кинетическую энергию  $T$  нашей системы, причем представив эту энергию как функцию углов поворота  $\varphi$  и  $\alpha$  и их производных и произведя вычисление составляющих уравнений (1) и (2) получим дифференциальное уравнение второго порядка:

$$J_B \ddot{\alpha} + mR\rho_c \omega_b^2 \sin \alpha = P_{cp} l, \quad (3)$$

где  $J_B$  – момент инерции ножа относительно подвеса;

$m$ - масса ножа;

$\rho_c$ - расстояние от точки подвеса ножа до его центра масс;

$R$ - радиус барабана;

$\omega_b$ - угловая скорость барабана;

$P_{cp}$ - сила среза, действующая на нож;

$l$ - длина ножа.

Во время работы режущий элемент ротора под действием центробежной силы располагается радиально. В момент встречи с

картофельной ботвой он со стороны ботвы получает внешний импульсивный момент среза, под действием которого режущий элемент начинает отклоняться от радиального положения, достигаем максимального угла отклонения, после этого двигается в обратную сторону.

Следующий удар по ботве может быть нанесен при различных положениях режущего элемента и направлениях относительной скорости.

Одновременно с колебательным движением режущих элементов происходит вращение ротора.

С целью получения устойчивой работы ротора необходимо установить связь между вращением ротора, колебательным движением режущих элементов и импульсивным моментом среза. На основе анализа этой связи выявить оптимальный кинематический режим работы ротора и рациональные его параметры.

Для этого рассмотрим различные варианты движения ножа.

Рассмотрим три варианта движения ножа

1)  $\alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_{ср}$  - движение ножа во время срезания ботвы, где  $\alpha_{ср}$  - угол, на который отклоняется нож от радиального направления за время срезания ботвы  $t_{ср}$ .

2)  $\alpha_{ср} \leq \alpha \leq \alpha_{ост}$  - движение ножа по инерции после срезания ботвы до момента времени  $t_{ост}$ , когда его угловая скорость станет равной нулю ( $\dot{\alpha} = 0$ )

3)  $\alpha_{возвр.} \leq \alpha \leq \alpha_{ост}$  - движение ножа к радиальному положению под действием центробежных сил, где  $\alpha_{возвр.}$  - угол радиального направления до положения, в которое вернется нож за один оборот барабана.

Рассмотрим первый этап движения. Первый интеграл уравнения (3) найдем, представив (2)

$$\ddot{\alpha} = \frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{d\dot{\alpha}}{dt} \cdot \frac{d\alpha}{d\alpha} = \frac{\dot{\alpha}d\alpha}{d\alpha} = \frac{1}{2} \frac{d\dot{\alpha}^2}{d\alpha}$$

Подставив в (3), получим

$$\frac{d\dot{\alpha}^2}{d\alpha} = \frac{2P_{cp}}{J_B} l - \frac{2mR\rho_c\omega_0^2}{J_B} \sin \alpha$$

Интегрируем по  $\alpha$ , и проведя преобразования найдем первый угол отклонения

$$\alpha_{cp} = \alpha_0 + \frac{au_1(1 + Av_0)^2 + u_2(Aa + v_0)^2}{a(1 - Av_0)^2 + (Aa + v_0)^2}, \quad (4)$$

$\alpha_0$  - угол отклонения ножа от радиального положения

где  $a, u_1, u_2, v_0, A$ , определяются теоретически.

Рассмотрим участок движения ножа от  $\alpha = \alpha_{cp}$  до  $\alpha = \alpha_{ост}$ , где

$\alpha_{ост}$  - угол при повороте на который нож останавливается.

На этом участке  $(\alpha_{cp} \leq \alpha \leq \alpha_{ост})$ ,  $P_{cp}=0$ , начальная угловая скорость равна

$$\dot{\alpha}_0 = \omega_{cp}. \text{ При } \alpha = \alpha_{ост} \text{ угловая скорость } \dot{\alpha} = \omega = 0.$$

При этих условиях уравнение (2) движения ножей имеет вид

$$\frac{d\alpha}{dt} = \sqrt{\omega_{cp}^2 + 2k^2(\cos \alpha - \cos \alpha_{cp})} \quad (5)$$

Проинтегрировав уравнение, найдем время движения ножа на этом участке, и проведя преобразования, найдем угол остановки.

$$x_{ост} = \frac{x_2 B^2 + x_1}{1 + B^2}$$

Так как  $x_{ост} = \alpha_{ост} - \alpha_{ср}$ , то

$$\alpha_{ост} = \alpha_{ср} + \frac{x_2 B^2 + x_1}{1 + B^2} \quad (6)$$

где  $\alpha_{ср}, x_2, x_1, B$  определяются теоретически

Полный угол отклонения ножа в момент срезания ботвы от радиального положения до полной остановки определяется как  $\psi = \alpha_{ср} + \alpha_{ост}$ , т.е.

$$\psi = 2\alpha_{ср} + \frac{x_2 B^2 + x_1}{1 + B^2} \quad (7)$$

На основе разработанной теории определены углы отклонения ножей при срезании картофельной ботвы различной массы от радиального положения для каждого вида ножей и установлено их предельное отклонение не более допустимого  $30^\circ$ .

Расчет угла отклонения ножа в момент удаления ботвы от радиального направления до полной остановки проводился с применением математической системы MathCAD.

Расчет проведен при следующих данных:

- радиус барабана  $R = 0,2$  м;
- угловая скорость вращения барабана  $\omega = 125$  с<sup>-1</sup>;
- сила среза  $P_{ср}$  меняется от 25,8 до 79,26 Н.
- начальный угол отклонения ножа  $\alpha_0 = 0$ ;
- относительная начальная угловая скорость ножа  $\omega_0 = 0,05$  с<sup>-1</sup>;
- время среза  $t_{ср} = 0,02$  с;
- время остановки ножа  $t_{ост} = 0,015$  с.

Геометрические характеристики ножей приведены в таблице 1.

Все данные для расчета взяты из конструктивных характеристик ботвоудаляющей машины БД – 4М определены экспериментально [ссылка на статью].

Таблица 1. Геометрические характеристики ножей

Номер ножа	Масса ножа	Длина ножа	Расстояние от точки подвеса до центра масс ножа	Момент инерции ножа относительно точки подвеса
	m, кг	l, м	$\rho_c$ , м	$I_B$ , кгм <sup>2</sup>
1	1,02	0,375	0,064	0,01
2	0,663	0,310	0,072	0,007
3	0,826	0,220	0,073	0,009
4	1,468	0,175	0,12	0,02

Расчет углов отклонения при различных значениях силы среза приведены в таблицах 2, 3, и 4.

Таблица 2. Расчет угла отклонения ножа при минимальном значении силы среза

Номер ножа	Масса ножа	Один росток ( $P_{cp} = 25,8$ Н)			Три ростка ( $P_{cp} = 77,4$ Н)			Пять ростков ( $P_{cp} = 129$ Н)		
		Угол среза	Угол остановки	Угол отклонения	Угол среза	Угол остановки	Угол отклонения	Угол среза	Угол остановки	Угол отклонения
		m, кг	$\alpha_{cp}$ , град	$\alpha_{ост}$ , град	$\phi$ , град	$\alpha_{cp}$ , град	$\alpha_{ост}$ , град	$\phi$ , град	$\alpha_{cp}$ , град	$\alpha_{ост}$ , град
1	1,02	0,94	0,74	1,68	2,82	2,22	5,04	4,7	3,67	8,37
2	0,663	2,08	0,19	2,27	6,24	0,43	6,67	10,4	0,48	10,88
3	0,826	1,67	0,47	2,14	5,0	1,34	6,34	8,35	2,1	10,45
4	1,468	1,35	0,64	1,99	4,01	1,89	5,9	6,76	3,06	9,82



Таблица 3. Расчет угла отклонения ножа при среднем значении силы среза

Номер ножа	Масса ножа	Один росток ( $P_{cp} = 52,5 \text{ Н}$ )			Три ростка ( $P_{cp} = 157,5 \text{ Н}$ )			Пять ростков ( $P_{cp} = 262,5 \text{ Н}$ )		
		Угол среза	Угол остановки	Угол отклонения	Угол среза	Угол остановки	Угол отклонения	Угол среза	Угол остановки	Угол отклонения
	m, кг	$\alpha_{cp}$ , град	$\alpha_{ост}$ , град	$\phi$ , град	$\alpha_{cp}$ , град	$\alpha_{ост}$ , град	$\phi$ , град	$\alpha_{cp}$ , град	$\alpha_{ост}$ , град	$\phi$ , град
1	1,02	1,9	1,5	3,4	5,74	4,47	10,21	9,56	7,36	16,92
2	0,663	4,23	0,33	4,56	12,7	0,44	13,14	21,17	0,33	21,5
3	0,826	3,4	0,93	4,33	10,2	2,46	12,66	17,0	3,5	20,5
4	1,468	2,75	1,29	4,04	8,26	3,69	11,95	13,76	5,81	19,57

Таблица 4. Расчет угла отклонения ножа при максимальном значении силы среза

Номер ножа	Масса ножа	Один росток ( $P_{cp} = 79,26 \text{ Н}$ )			Три ростка ( $P_{cp} = 237,78 \text{ Н}$ )			Пять ростков ( $P_{cp} = 396,3 \text{ Н}$ )		
		Угол среза	Угол остановки	Угол отклонения	Угол среза	Угол остановки	Угол отклонения	Угол среза	Угол остановки	Угол отклонения
	m, кг	$\alpha_{cp}$ , град	$\alpha_{ост}$ , град	$\phi$ , град	$\alpha_{cp}$ , град	$\alpha_{ост}$ , град	$\phi$ , град	$\alpha_{cp}$ , град	$\alpha_{ост}$ , град	$\phi$ , град
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1,02	2,89	2,27	5,16	8,66	6,69	15,35	14,44	10,98	25,92
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	0,663	6,39	0,44	6,83	19,18	0,07	19,25	31,96	2,86	24,82
3	0,826	5,15	1,37	6,52	15,4	3,3	18,7	25,66	3,96	29,62
4	1,468	4,16	1,93	6,09	12,47	5,34	17,81	20,78	8,09	28,87

Определим период колебаний ножей.

Как известно, при воздействии силы среза на нож последний отклоняется на угол  $\alpha$  и продолжает колебаться назад и вперед с последующим затуханием. Профессором М.Б.Углановым определен период колебаний ножа от действия силы среза. Период колебаний определяется из формулы (8):

$$T = 4 \sqrt{\frac{J_{\epsilon}}{mR\rho_c\omega^2}} \int_0^{\frac{\alpha}{2}} \frac{d\psi}{\sqrt{1 - \sin^2 \frac{\alpha_{\max}}{2} \cdot \sin^2 \psi}} = \frac{4}{\omega} K\left(\frac{\alpha_{\max}}{2}\right), \quad (8)$$

где  $J_{\epsilon}$  – момент инерции относительно оси подвеса В,  $кг \cdot м^2$ ;

$m$  – масса ножа;

$R$  – расстояние оси центра вращения ротора до оси подвеса ножа,  $м$ ;

$\rho_c$  – расстояние оси от подвеса ножа до центра тяжести,  $м$ ;

$\omega$  – угловая скорость вращения ножа,  $с^{-1}$ ;

$\alpha$  – угол отклонения;

$K\left(\frac{\alpha_{\max}}{2}\right)$  – определенный интеграл.

Из формулы (8) видно, что период колебания ножа в поле центробежных

сил зависит от амплитуды колебания, т.е. величины максимального угла от равновесного положения. И если мы построим зависимость периода

колебания от амплитуды, то увидим, что период практически до угла  $\alpha=30^\circ$  является постоянным. Поэтому данный угол может быть принят

как предельный дальше которого нож не должен отклоняться.

Колебание режущего элемента в диапазоне  $30^\circ < \alpha < 30^\circ$  будет практически гармоничным. Графически это будет иметь вид:

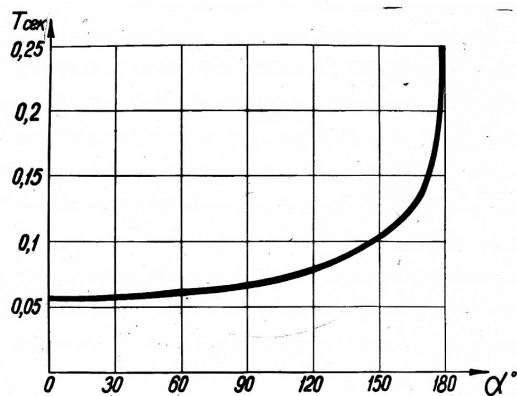


Рисунок 3- Зависимость периода колебаний от угла отклонения режущего элемента.

Определение длины ножей.

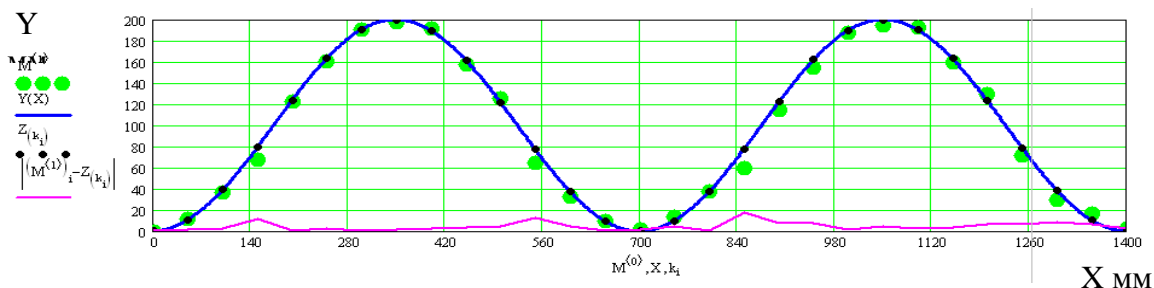
Значение одного из главных параметров ножа – длины мы определили из замеров профиля грядок специальным прибором на поле ООО Авангард, Рязанского района.



Рисунок 4- Прибор для измерения профиля грядок.

По полученным данным построили графическое изображение профиля грядок

Анализ показывает, что профиль грядки до прохода установки хорошо согласуется с теоретической синусоидой и среднеквадратическое отклонение от теоретической синусоиды равно  $\Delta = 2,2 \%$ .



$M^{(1)}$  – данные прибора;  $Y(X)$  – теоретическая синусоида;  $Z_{(ki)}$  – теоретические точки на синусоиде  $Y(X)$ ;  $|(M^{(1)})_i - Z_{(ki)}|$  - отклонение точек полученных прибором от теоретических точек.

Сравнительный график лабораторных данных с теоретической синусоидой.

Для определения длины шарнирных ножей мы воспользовались графо-аналитическим методом. Для определения длин ножей за основу возьмем нож  $L_4 = 175$ мм. от серийной машины КИР-1,5. Для этого мы опустим ротор до тех пор, пока средний короткий нож  $L_4$  не коснется верхней точки грядки

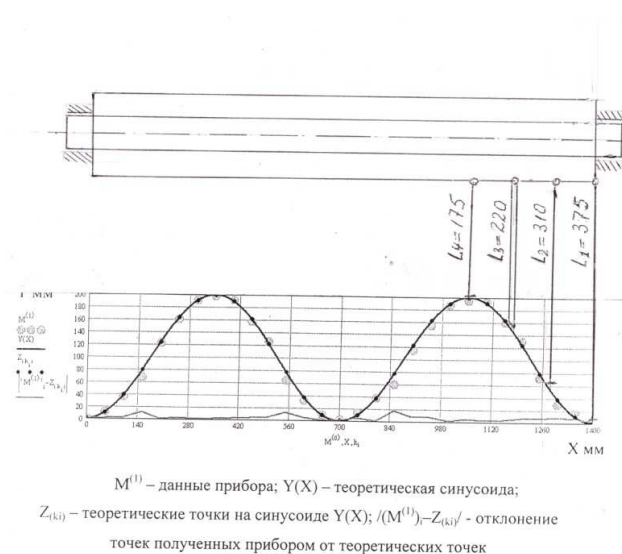


Схема для определения длины переменных ножей

Следующий нож  $L_3$  будет длиннее  $L_4$  на величину  $H_1$  и он также коснется грядки, последующие ножи  $L_2$  и  $L_1$  будут длиннее соответственно на величину  $H_2$  и  $H_3$ . Величины  $H_1$ ,  $H_2$  и  $H_3$  найдем из схемы Рис.2.8. Они будут:  $H_1=45\text{мм}$ ,  $H_2=135\text{мм}$  и  $H_3=200\text{мм}$ .

Таким образом, определим длину ножей по формуле:

$$L = L_4 + H_i,$$

Таким образом,  $L_1 = 375\text{мм}$ ,  $L_2 = 310\text{мм}$ ,  $L_3 = 220\text{мм}$ ,  $L_4 = 175\text{мм}$

## Выводы

1. На основе анализа конструкций роторных машин нами предложен новый вариант ротора с шарнирными ножами и переменным диаметром резания. Такая конструкция обеспечивает копирование картофельных грядок и дает возможность максимального удаления ботвы и растительных остатков.

2. Разработана математическая модель, устанавливающая связь между параметрами шарнирных ножей и срезаемой массой ботвы, что позволило определить отклонение шарнирных ножей от радиального положения.

На основе разработанной теории определены углы отклонения от радиального положения для каждого вида ножей и установлено их предельное отклонение не более допустимого  $30^\circ$ .

3. На основе исследования профиля грядок и учитывая «охват» ножей поверхности грядки мы графо-аналитическим методом определили:

переменную длину 4 ножей, которая равна:

$L_1 = 375\text{мм}$  – это ножи срезают ботву в междурядьях;

$L_2 = 310\text{мм}$

$L_3 = 220\text{мм}$  и

$L_4 = 175\text{мм}$  - это ножи срезают ботву на вершине грядки;

## Литература

1. Угланов М.Б. Разработка комплекса машин для уборки картофеля на основе совершенствования рабочих органов и рационального их сочетания. Докторская диссертация, 1991.

2. Абрамов Ю.Н, Динамика шарнирно режущего элемента ботвоуборочной машины в поле центробежных сил. Сб. научных трудов. Энергосберегающие технологии использования машинно-тракторного парка// РГСХА, 2004.-с. 67-72.

3. Угланов М.Б., Абрамов Ю.Н Обоснование основных параметров ротора ботводробителя. Сборник научных трудов по материалам научно-практической конференции. Рязанский ГАТУ им. Костычева. 1996. с.

## References

1. Uglanov M.B. Razrabotka kompleksa mashin dlya uborki kartofelya na osnove sovershenstvovaniya rabochih organov i racional'nogo ih sochetaniya. Doktorskaya dissertaciya, 1991.

2. Abramov YU.N, Dinamika sharnirno rezhushchego ehlementa botvouborochnoj mashiny v pole centrobezhnyh sil. Sb. nauchnyh trudov. ENnergosberegayushchie tekhnologii ispol'zovaniya mashinno-traktornogo parka/YU.N. Abramov, M.B. Uglanov Mashino-traktornogo parka// RGSKHA, 2004.-s. 67-72.

3. Uglanov M.B., Abramov YU.N Obosnovanie osnovnyh parametrov rotora botvodrobiteleya. Sbornik nauchnyh trudov po materialam nauchno-prakticheskoy konferencii. Ryazanskij GATU im. Kostycheva. 1996. s.