

В. А. Бурдейко¹, В. Б. Ловкис², Э. В. Дыба³

¹УО «Барановичский государственный университет»
г. Барановичи, Республика Беларусь
E-mail: V_A_Victor@mail.ru

²УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: dekanat.amf@bsatu.by

³РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: dibua-18@mail.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОЧЕСЫВАНИЯ ОСОБЕЙ КОЛОРАДСКОГО ЖУКА КОНИЧЕСКОЙ ЩЕТКОЙ МАШИНЫ

Аннотация. В статье рассмотрены теоретические предпосылки исследования процесса очесывания колорадского жука с ботвы картофеля конической щеткой. Приводятся формулы силового расчета, расчета параметров и прогиба ворса.

Ключевые слова: колорадский жук, щетка, ворс, сила, прогиб ворсины.

V. A. Burdeyko¹, V. B. Lovkis², E. V. Dyba³

¹ UO "Baranavichy State University"
Baranovichi, Republic of Belarus
e-mail: V_A_Victor@mail.ru

² UO "Belarusian State Agrarian Technical University"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: dekanat_amf@bsatu

³RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: dibua-18@mail.ru

THEORETICAL BACKGROUND FOR THE STUDY OF THE PROCESS OF CLEANING OF COLORADO POTATO BEETLE INDIVIDUALS WITH A CONICAL BRUSH OF A MACHINE

Abstract. The article develops theoretical prerequisites for studying the process of brushing the Colorado potato beetle from potato tops with a conical brush. Formulas for calculating the force, calculating the parameters and deflection of the pile are given.

Keywords: colorado potato beetle, brush, pile, force, deflection of the pile.

Введение

Зеленая экономика уже давно стала центральной темой в глобальной повестке дня производства сельскохозяйственных продуктов. Беларусь не отстает от мирового тренда. 9 ноября 2018 г. Президент подписал Закон Республики Беларусь № 144-З «О производстве и обращении органической продукции». В главе 1 «Общие положения» (статья 4) говорится, что «объектами отношений в области производства и обращения органической продукции являются семена, процессы производства и обращение органической продукции» [1].

Сегодня можем говорить о том, что выращивание экологически чистого картофеля подтверждается Законом Республики Беларусь «О производстве и обращении органической продукции».

Метод механического сбора колорадского жука, одного из главных вредителей урожая картофеля, является актуальным и перспективным для небольших объемов производства.

Основными рабочими органами устройства для сбора колорадского жука являются коническая щетка, лоток и два эластичных копира.

В процессе проведенных исследований авторами опубликованы сведения о машине для сбора особей колорадского жука, ее рабочих органах, расчеты параметров машины, математическое моделирование процесса удаления колорадского жука с ботвы [2–7].

Исследованием технологической операции сбора и утилизации колорадского жука занимались ученые П. П. Казакевич, В. К. Пестис, Э. В. Заяц, П. В. Заяц, С. Н. Ладутько и др.

Основная часть

При проектировании машины для сбора колорадского жука необходимо рационально выполнить компоновку ее составных частей. Правильная установка рабочих органов влияет одновременно на производительность и качество работы машины. Наиболее эффективными рабочими органами являются конические и прямолинейные щетки, гофрированные боковины и отбойник. Коническая щетка имеет более сложную конструкцию по сравнению с другими рабочими органами [8].

Анализ известных конструкций машин для сбора колорадского жука и их рабочих органов позволяет сделать вывод о том, что данные машины малопродуктивны, имеют высокую металлоемкость и энергопотребление, а также низкое качество работы – 30–45 % особей колорадского жука остается на картофельном поле. Приблизительно половина вредителей остается на ботве, а остальная часть сыпается на поверхность гребня вокруг стеблей картофеля. Чтобы устранить вышеуказанные недостатки, разработана конструкция машины для сбора колорадского жука с рабочими органами нового типа.

Наиболее перспективными являются комбинированные счесывающе-вибрационные или счесывающе-ударные рабочие органы на основе применения эластичных материалов для снижения травмирования ботвы. Для повышения полноты сбора целесообразно применять горизонтальные, вертикальные и комбинированные щетки с регулировкой углов наклона в различных направлениях в зависимости от сорта картофеля и периода его роста [8].

Рабочими органами в машине для сбора колорадского жука служат конические щетки, гофрированные боковины и рифленые пруты-ударники. Каждая конусообразная щетка выполнена в форме перевернутого усеченного конуса и закреплена на вертикальной оси с возможностью свободного вращения. Диаметр большего основания конуса – в пределах от 0,35 до 0,60 м, меньшего – 0,05–0,15 м. Непосредственное воздействие на листу картофеля оказывают эластичные прутки, изготовленные из капроновой нити диаметром 1–2 мм [9].

Воздействие ворса на листья ботвы зависит от линейной и угловой скоростей щеток. В момент касания ворса щетки о листья ботвы происходит удаление особей колорадского жука путем очесывания. Это точки С и D (рис. 1).

Абсолютная скорость ворсинок $\vartheta_{аб}$ в точке В позиционирования щетки (позиция I) может быть представлена в виде следующего выражения:

$$\vartheta_{аб} = \sqrt{\omega^2 \left(L_b + \frac{d_6}{2} \right)^2 + \left(\frac{L_c}{t_c} \right)^2}, \text{ м/с,}$$

где ω^2 – угловая скорость, с^{-1} ; L_b – длина ворсинки, м; d_6 – диаметр барабана щетки, м; L_c – линейное перемещение ворсинки, м, за время t_c ; t_c – время рабочего периода ворсинки, с.

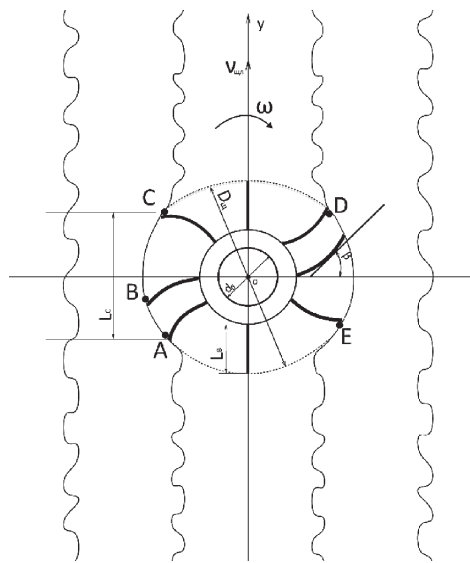


Рисунок 1 – Схема взаимодействия щетки с ботвой и особями колорадского жука

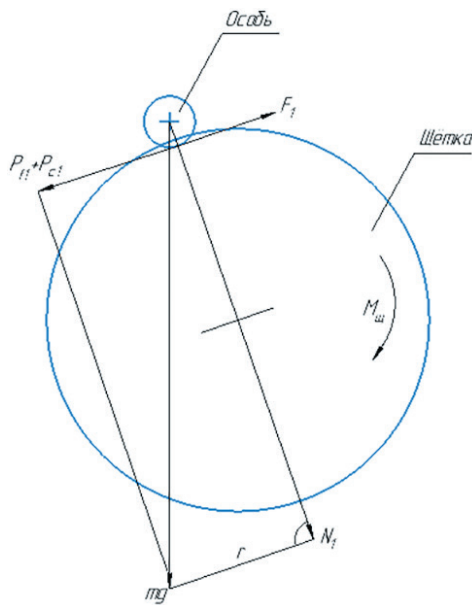


Рисунок 2 – Динамика особи

При очесывании ботвы наиболее тяжело удаляются неразвитые, прилипшие к листьям ботвы особи колорадского жука. При этом действие ворсинок на ботву сопровождается их ударами, травмированием и отбрасыванием ворсинками вредителей. Полное окружное усилие P на ворсе щетки складывается из силы P_1 на удар и силы P_2 на волочение и отбрасывание особей колорадского жука, т. е.

$$P = P_1 + P_2, H.$$

Силу удара P_1 можно определить из условия равенства импульса силы P_1 изменению количества движения особей колорадского жука, т. е.

$$P_1 \Delta t = m_{\text{ж}} (\vartheta_2 - \vartheta_1),$$

где Δt – продолжительность времени удара, с; $m_{\text{ж}}$ – масса особей, по которым наносятся удары, кг; ϑ_2 – скорость массы особей в конце удара, м/с; ϑ_1 – скорость движения массы в начале удара, м/с.

Для рассмотрения процесса очесывания единичной особи ворсиной щетки возьмем поперечное сечение щетки и особи (рисунок 2). На особь действует сила тяжести mg , сила трения F щетки об особь, вращающий момент $M_{\text{ш}}$.

Для очистки особей щеткой необходимо, чтобы выполнялся ряд условий, наиболее полно рассмотренных А. В. Дервишем, С. А. Найдановым: линейные скорости особи и щетки в точке контакта должны быть различные, ворсины щетки должны быть упруго деформированными и очесывать особи, расположенные на нижней поверхности листьев ботвы, и должны выполняться следующие неравенства (для нашего случая):

$$F_1 = N_1 f_1 \geq P_{c1} + P_{f1}, \quad (1)$$

где f_1 – коэффициент трения скольжения щетки о особь колорадского жука; P_{c1} – соответственно сила сопротивления особи колорадского жука; P_{f1} – сила трения щетки об особь; N_1 – нормальная сила между щеткой и особью.

После проведения соответствующих преобразований условия осуществления процесса очесывания примут следующий вид:

$$N_1 \geq \frac{\pi r_{\text{пр}} \tau_{\text{сд}} \left(\frac{\theta_n}{C F_{\text{пр}} \sin \alpha_1} - r_{\text{пр}} \operatorname{tg} \alpha_1 \right)}{f_1}, \quad (2)$$

где $r_{\text{пр}}$ – радиус ворсины, м; $\tau_{\text{сд}}$ – удельное сопротивление особи сдвигу ее по поверхности листа ботвы, Па; θ_n – сопротивление особи ворсине, Н; C – объемный коэффициент смятия ворсины, Па⁻¹; $F_{\text{пр}}$ – площадь сечения ворсины, м²; α_1 – угол при вершине деформированной ворсины, град.

В исследуемом устройстве для очесывания особей колорадского жука ворсины щетки закреплены параллельно горизонтальной плоскости.

В представленной конструкции выполняются все ограничения и допущения, чтобы взаимодействие ворсины щетки и особи, лежащей на нижней поверхности листа ботвы, можно было рассматривать как динамический удар: в ворсине возникают напряжения, не превосходящие предела пропорциональности, и закон Гука при ударе сохраняет свою силу; лист ботвы является жестким телом и не деформируется; удар является неупругим.

В результате со стороны ворсины на лист будет действовать сила динамического удара P_d :

$$P_d = P_{ст} K_d; \quad (3)$$

где $P_{ст}$ – статическая сила; K_d – динамический коэффициент удара.

Динамический коэффициент удара определяем по общеизвестной формуле

$$K_d = 1 + \sqrt{\frac{v^2}{g\delta_{ст}}}; \quad (4)$$

где $\delta_{ст}$ – статическая деформация прутка от силы $P_{ст}$; v – линейная скорость конца прутка.

Для определения P_d : необходимо найти значение статической силы $P_{ст}$, действующей на ворс со стороны листа, и деформации ворса щетки от действия этой силы.

Рассмотрим схему, описывающую характер нагружения ворсины (рисунок 3). Чтобы найти значение силы $P_{ст}$, необходимо силу нормального давления N спроецировать на прямую, соединяющую центр тяжести листа с точкой соприкосновения особи и ворсины.

$$P_{ст} = N \cos \varphi, \quad (5)$$

где φ – угол между направлениями действия сил N и $P_{ст}$.

Статическую силу разложим на две составляющие

$$\begin{cases} P_B = P_{ст} \cos \varphi; \\ P_T = P_{ст} \sin \varphi. \end{cases}$$

Или, подставив в (8) значение силы $P_{ст}$ из (7), определим следующее:

$$\begin{cases} P_B = N \cos^2 \varphi; \\ P_T = \frac{1}{2} N \sin^2 \varphi. \end{cases} \quad (7)$$



Рисунок 3 – Действие силы, проходящей через фиксированную точку A

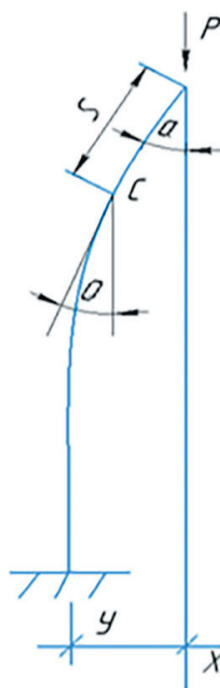


Рисунок 4 – Расчетная схема ворса при действии вертикальной нагрузки

Подобный случай приложения поперечной силы рассмотрен С. П. Тимошенко, который пришел к выводу, что влияние горизонтальной силы для сплошных стержней практически не имеет значения. Таким образом, приходим к расчетной схеме ворсины (рисунок 4).

Точное дифференциальное уравнение упругой линии ворсины в этом случае будет иметь следующий вид:

$$Er \frac{d\theta}{ds} = -PY; \quad (8)$$

где S – криволинейная координата текущей точки C ; θ – угол между касательной к линии ворсины и осью OX ; $\frac{d\theta}{ds}$ – точное значение кривизны осевой линии ворсины в точке.

Решая это уравнение, С. А. Найданов определил прогибы конца стержня в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Горизонтальное перемещение

$$Y = \frac{2Zl_{\text{пр}}}{K(Z^2)}, \quad (9)$$

где $Z = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$; α – угол между касательной к линии прутка и осью OX ; $K(Z^2)$ – полный эллиптический интеграл в нормальной форме Лежандра (первого порядка).

Вертикальное перемещение

$$X = 2l_{\text{пр}} \left[1 - \frac{E(Z^2)}{K(Z^2)} \right], \quad (10)$$

где $E(Z^2)$ – полный эллиптический интеграл в нормальной форме Лежандра (второго порядка).

Таким образом, подставляя в выражение (3) значения статической нагрузки $P_{\text{ст}} = P_{\text{в}}$, определив по формулам (9) и (10) значения прогиба ворсины щетки от нагрузки $P_{\text{ст}}$, можно найти силу динамического удара и необходимую длину ворсины $L_{\text{в}}$ щетки по формуле

$$P_{\text{д}} = K_{\text{д}} N \cos^2 \varphi. \quad (11)$$

Для нормальной работы устройства для очесывания особей необходимо, чтобы они не перебрасывались через желоб.

Заключение

Теоретически обоснована динамическая сила, действующая на листья картофельной ботвы в процессе очесывания с них особей колорадского жука. По вышеприведенным формулам можно произвести силовой расчет воздействия ворса на листья ботвы и особи колорадского жука, а также расчет параметров ворса и расчет его прогиба.

Таким образом, математическая модель работы щетки для удаления колорадского жука может быть полезным инструментом для оптимизации процессов очесывания вредителей картофеля, уменьшения травмирования листьев картофельной ботвы и повышения технической готовности устройства для борьбы с колорадским жуком.

Список использованных источников

1. О производстве и обращении органической продукции : Закон Респ. Беларусь от 9 ноября 2018 г. № 144-З : принят Палатой представителей 2 октября 2018 г. ; одобрен Советом Респ. 24 окт. 2018 г. / Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Мн., 2026. – URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=H11800144> (дата обращения: 10.11.2025).
2. Бурдейко, В. А. Расчет щеток машины для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко, В. Б. Ловкис // Вестник БарГУ. Серия «Технические науки». – 2021. – Вып. 9. – С. 53–58.

3. Бурдейко, В. А. Результаты предварительных испытаний новых рабочих органов машины для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко, И. В. Дубень // Техника и технологии: инновации и качество : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., 20 дек. 2018 г., Барановичи ; редкол. В. В. Климук [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2018. – С. 136–137.
4. Бурдейко, В. А. Машина для удаления колорадского жука / В. А. Бурдейко, И. М. Дыдышко // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. науч. ст. 6-й Междунар. науч.-практ. конф., 2 ноября 2022 г., Гомель. – Гомель : Гомсельмаш, 2022. – С. 233–237.
5. Бурдейко, В. А. Техническая характеристика ворсинок щетки для счесывания колорадского жука / В. А. Бурдейко, В. Б. Ловкис // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 24–25 ноября 2022 г. Минск. – Мн. : БГАТУ, 2023. – С. 219–222.
6. Бурдейко, В. А. Расчет параметров лотка и копиров машины для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко, В. Б. Ловкис, Э. В. Дыба // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / НАН Беларуси ; РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Мн. : Бел. навука, 2024. – Вып. 57. – С. 225–228.
7. Бурдейко, В. А. Моделирование удаления колорадского жука применением устройства с очесывающей конической щеткой / В. А. Бурдейко, В. Б. Ловкис // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию образования БГАТУ, Минск, 16–17 окт. 2024 г. – Мн. : БГАТУ, 2024. – Ч. 1. – С. 130–132.
8. Бурдейко, В. А. Перспективные рабочие органы машин для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко // Техника и технологии: инновации и качество : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., 18 дек. 2015 г., г. Барановичи. – Барановичи : БарГУ, 2015. – С. 7–8.
9. Бурдейко, В. А. Машина и рабочие органы для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко, И. В. Дубень // Вестник БарГУ. Серия «Технические науки». – 2018. – Вып. 6. – С. 87–91.