RATIONALE FOR THE INTERACTION OF THE FRUIT OF MELONS WITH A BLADE HARVESTING ROTOR

M. N. Shaprov, A. V. Sedov, O. P. Sedova, A. V. Gurba

Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russia

Received 04.03.2021

Submitted 11.05.2021

Summary

The article presents theoretical studies that allowed us to obtain a condition for the movement of fruits on the surface of the field under the action of a pushing force. The value of this force should not exceed the permissible dynamic effect on the fruit and depends on the weight of the fruit and the technological properties of the soil, as well as on the design and kinematic parameters of the harvesting rotor. It is established that minimal damage to the fruit is provided in the case of rolling the fruit on the surface of the field when it moves to the center of the platform.

Abstract

Introduction. In modern economic conditions, a significant contribution to the production of agricultural products, including melons, is made by peasant farms, in which harvesting is almost everywhere carried out manually. The low level of mechanization of the harvesting process is explained by the lack of modern high-performance harvesting machines, so there was a need to create a rotary harvesting machine that ensures the production of melon crops of high quality and at the lowest cost. The proposed technological scheme of the rotary picker differs significantly from the known designs of pick-up devices in that the selection and loading of fruits is carried out without the preliminary formation of rolls, which significantly reduces costs and damage to fruits. The purpose of this study is to study the nature of the interaction of the fruit with the blade of the harvesting rotor in terms of reducing the damage to the fruit. **Object.** The object of research was the technological process of selecting fruits with a harvesting rotor. **Materials and methods.** When justifying the nature of the interaction of the fruit with the blade of the harvesting rotor, the following assumptions were made: the unit moves evenly and rectilinearly; the harvesting rotors rotate with a constant angular velocity; the height of the lifting of the fruit to the platform does not change during the harvesting process; the diameter and weight of the fruit are assumed to be equal to the maximum value, and the shape of the fruit is assumed to be spherical. **Results and conclusions.** The technological process of selecting fruits by the developed harvesting rotary picker is a sequence of consecutive operations that are performed in one turn of the harvesting rotor and depend on the specific operating conditions of the harvesting rotary and the actual location of the fruits in the field. To study the interaction of fruits with the blade of the harvesting rotor, a design scheme was drawn up, which made it possible to perform a theoretical justification of the technological process of selecting fruits. As a result of the study, a condition was obtained for the movement of fruits on the surface of the field under the action of a pushing force, which should not exceed the permissible dynamic effect on the fruit. The value of this force depends primarily on the weight of the fruit and the technological properties of the soil, as well as on the design and kinematic parameters of the harvesting rotor. It is established that the minimum damage to the fruit from the blades of the harvesting rotor is provided by rolling the fruit, located in the fruit-receiving cell of the harvesting rotor, when it moves across the field to the center of the platform.

Key words: *melon crops, harvesting rotor blade, force interaction, harvesting rotor parameters.*

Citation. Shaprov M.N., Sedov A.V., Sedova O.P., Gurba A.V. Rationale for the interaction of the fruit of melons with a blade harvesting rotor. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2021. 2(62). 442-454 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2021-02-44.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

УДК 631.358

ОБОСНОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛОДОВ БАХЧЕВЫХ КУЛЬТУР С ЛОПАСТЬЮ УБОРОЧНОГО РОТОРА

М. Н. Шапров, доктор технических наук, профессор

А. В. Седов, кандидат технических наук, доцент

О. П. Седова, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

А. В. Гурба, преподаватель-исследователь

Волгоградский государственный аграрный университет, г. Волгоград

Дата поступления в редакцию 04.03.2021

Дата принятия к печати 11.05.2021

Актуальность. В современных экономических условиях значительный вклад в производство продукции сельского хозяйства, в том числе и бахчевых культур, вносят крестьянско-фермерские хозяйства, в которых уборка урожая почти повсеместно осуществляется вручную. Низкий уровень механизации уборочного процесса объясняется отсутствием современных высокопроизводительных уборочных машин, поэтому возникла необходимость создания роторной уборочной машины, обеспечивающей получение продукции бахчевых культур высокого качества и с наименьшими затратами. Предлагаемая технологическая схема роторного подборщика существенно отличается от известных конструкций подбирающих устройств тем, что подбор и погрузка плодов осуществляется без предварительного образования валков, что значительно снижает затраты и повреждение плодов. Целью настоящего исследования является изучение характера взаимодействия плода с лопастью уборочного ротора с точки зрения снижения повреждаемости плодов. **Объект.** Объектом исследований являлся технологический процесс подбора плодов уборочным ротором. **Материалы и методы.** При обосновании характера взаимодействия плода с лопастью уборочного ротора подборщика были приняты следующие допущения: агрегат движется равномерно и прямолинейно; уборочные роторы вращаются с постоянной угловой скоростью; высота подъема плодов на платформу в процессе уборки не меняется; диаметр и массу плодов принимаем равными максимальному значению, а форму плодов принимаем шарообразной. **Результаты.** Технологический процесс подбора плодов разработанным роторным подборщиком представляет собой последовательность следующих друг за другом операций, которые выполняются за один оборот уборочного ротора и зависят от конкретных условий работы роторного подборщика и фактического расположения плодов на поле. Для исследования взаимодействия плодов с лопастью уборочного ротора была составлена расчетная схема, которая позволила выполнить теоретическое обоснование технологического процесса подбора плодов. **Заключение.** В результате выполненного исследования было получено условие перемещения плодов по поверхности поля под действием толкающей силы, которая не должна превышать допустимое динамическое воздействие на плод. Величина данной силы зависит в первую очередь от массы плодов и технологических свойств почвы, а также от конструктивных и кинематических параметров уборочного ротора. Установлено, что минимальное повреждение плодов от лопастей уборочного ротора обеспечивается перекачиванием плода, находящегося в плодоприемной ячее уборочного ротора, при его движении по полю к центру платформы.

Ключевые слова: *плоды бахчевых культур, лопасть уборочного ротора, силовое взаимодействие, параметры уборочного ротора.*

Цитирование. Шапров М. Н., Седов А. В., Седова О. П., Гурба А. В. Обоснование взаимодействия плодов бахчевых культур с лопастью уборочного ротора. *Известия НВ АУК*. 2021. 2(62). 442-454. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-02-44.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. В современных экономических условиях значительный вклад в производство продукции сельского хозяйства, в том числе и бахчевых культур, вносят крестьянско-фермерские хозяйства. При этом площадь, занятая посевами бахчевых культур, в большинстве фермерских хозяйств составляет не более 20 га. На таких небольших площадях уборка урожая почти повсеместно осуществляется вручную [7, 12]. В структуре себестоимости бахчевых культур затраты ручного труда на уборку урожая занимают 40...60 % всех затрат на возделывание этих культур. Низкий уровень механизации уборочного процесса объясняется отсутствием современных высокопроизводительных уборочных машин, применение которых позволило бы значительно снизить себестоимость получаемой продукции. Разработанные и выпускавшиеся в советские годы бахчеуборочные машины практически исчезли, но и они не соответствовали агротехническим требованиям по качественным показателям [5].

В связи с этим возникла необходимость создания роторной уборочной машины, обеспечивающей получение продукции бахчевых культур высокого качества и с наименьшими затратами. Целью наших исследований является изучение характера взаимодействия плода с лопастью уборочного ротора с точки зрения снижения повреждаемости плодов.

Материалы и методы. Проведенный нами анализ применяемых в настоящее время технологий и способов уборки бахчевых культур показал, что наиболее эффективной с точки зрения качества и производительности технологического процесса является сплошная механизированная уборка, осуществляемая за один проход по полю с контролем качества плодов на стационарном пункте [10]. Для внедрения этой перспективной технологии нами была разработана конструкция прицепного роторного подборщика, который в агрегате с трактором качественно выполняет функции подбора и погрузки созревших плодов в транспортное средство и обеспечивает соблюдение всех предъявляемых к данному типу машин технологических требований. Рабочий орган в данной машине выполнен в виде двух ячеистых роторов, вращающихся навстречу друг другу, которые захватывают и смещают плоды в среднюю часть машины, а затем поднимают на платформу и перемещают на загрузочный транспортер [8]. Предлагаемая технологическая схема роторного подборщика существенно отличается от известных конструкций подбирающих устройств тем, что подбор и погрузка плодов осуществляется без предварительного валкообразования, что значительно снижает затраты и повреждение плодов.

Объектом исследований являлся технологический процесс подбора плодов уборочным ротором. При исследовании характера взаимодействия плода с лопастью уборочного ротора подборщика были приняты следующие допущения: агрегат движется равномерно и прямолинейно; уборочные роторы вращаются с постоянной угловой скоростью; высота подъема плодов на платформу в процессе уборки не меняется; диаметр и массу плодов принимаем равными максимальному значению, а форму плодов принимаем шарообразной.

Результаты и обсуждение. Технологический процесс подбора плодов разработанным роторным подборщиком представляет собой последовательность следующих друг за другом операций, при которых осуществляется взаимодействие лопасти уборочного ротора с плодом: захват плода лопастью, вкатывание в плодоприемную ячею и перемещение по полю, вкатывание на копирующую лыжу, подъем на платформу и освобождение из ячеи [9]. Данные операции выполняются за один оборот уборочного ротора и зависят от конкретных условий работы роторного подборщика и фактического расположения плодов на поле.

Для исследования процесса взаимодействия плодов с лопастью уборочного ротора составим расчетную схему, представленную на рисунке 1.

Рисунок 1 - Схема взаимодействия плодов с лопастью уборочного ротора

Figure 1 - Diagram of the interaction of fruits with the blade of the harvesting rotor

Плоды бахчевых культур на поверхности поля расположены в небольших углублениях, образованных в почве под их весом в процессе созревания, поэтому в первоначальный момент нижняя точка плода C находится ниже горизонтальной поверхности поля на величину h_n , глубина которой зависит не только от диаметра и массы плодов, но и от физико-механических свойств почвы.

Платформа подборщика установлена под углом α к горизонту. В этом случае уборочные роторы будут вращаться в плоскости параллельной платформе и направление взаимодействия лопасти ротора с плодом должно быть ниже его центра O , а точка контакта плода с лопастью уборочного ротора B будет расположена в его нижней половине, и сила

N , действующая на плод со стороны лопасти в нормальном направлении, будет также наклонена под углом α . Координаты точки контакта плода с лопастью уборочного ротора B относительно центра плода O можно определить из прямоугольного треугольника OBE .

В горизонтальном направлении точка B будет расположена на расстоянии c , которое находится по выражению:

$$c = r_{\Pi} \cos \alpha, \quad (1)$$

где r_{Π} – радиус плода, м; α – угол наклона платформы к горизонту, град;

В вертикальном направлении точка B смещена от центра плода O на расстояние l , определяемое по выражению:

$$l = r_{\Pi} \sin \alpha \quad (2)$$

При встрече лопасти ротора с плодом между ними возникает сила трения F_{TL} , которая приводит к отклонению нормальной силы N на угол трения φ_L и образованию равнодействующей толкающей силы P_T . Разложив толкающую силу P_T по осям X и Y , получим горизонтальную P_T^X и вертикальную P_T^Y – составляющие данной силы:

$$P_T^X = P_T \cos(\alpha - \varphi_L), \quad (3)$$

где φ_L – угол трения плодов о лопасть, град.

$$P_T^Y = P_T \sin(\alpha - \varphi_L) \quad (4)$$

Величина силы трения плода о лопасть F_{TL} определяется в зависимости от массы плодов и фрикционных свойств материала лопасти и плода по выражению:

$$F_{TL} = mg \tan \varphi_L = mg f_L, \quad (5)$$

где m – масса плода, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; φ_L и f_L – угол трения и коэффициент трения плодов о лопасть.

Аналогично разложим силу трения плода о лопасть ротора F_{TL} по осям X и Y на горизонтальную F_{TL}^X и вертикальную F_{TL}^Y составляющие с учетом выражения (5):

$$F_{TL}^X = mg \tan \varphi_L \sin \alpha \quad (6)$$

$$F_{TL}^Y = mg \tan \varphi_L \cos \alpha. \quad (7)$$

После встречи лопасти ротора с плодом он закатывается в плодоприемную ячейку и при дальнейшем вращении уборочного ротора совершает сложное движение, обусловленное воздействием на него приложенных сил и возникающих моментов, приводящих к поступательному движению плода со скоростью V_{Π} к центру платформы и его качению вокруг своей оси внутри плодоприемной ячейки с угловой скоростью ω_{Π} .

При движении плода по горизонтальной поверхности почвы на него действуют вертикальная сила тяжести $G = mg$ и сила инерции P_{Π} , обусловленные его массой. Сила инерции P_{Π} определяется из условия выкатывания плода из лунки по выражению:

$$P_{\Pi} = m \frac{v_{\Pi}^2 - v_{\Pi\Pi}^2}{s}, \quad (8)$$

где v_{Π} – конечная скорость плода, м/с; $v_{\Pi\Pi}$ – начальная скорость плода, м/с; s – расстояние выкатывания плода из лунки, м.

Так как в первоначальный момент плод находился в покое, то его начальная скорость $V_{\Pi\Pi} = 0$, а конечная скорость плода V_{Π} будет равна линейной скорости уборочного ротора V_P и определится из выражения:

$$v_{\Pi} = \omega_P R_P, \quad (9)$$

где ω_P – угловая скорость вращения уборочного ротора, с⁻¹; R_P – радиус уборочного ротора, м.

Расстояние выкатывания плода из лунки s равно перемещению центра плода O за точку контакта K и определяется из прямоугольного треугольника OKL , гипотенуза OK которого равна радиусу плода r_n , а катет $OL = r_n - h_L$ по выражению:

$$s = KL = \sqrt{2r_n h_L - h_L^2}, \quad (10)$$

где h_L – глубина лунки под плодом, м.

Подставив выражение (9) и (10) в выражение (8), получим окончательное выражение для определения силы инерции P_H :

$$P_H = m \frac{\omega_p^2 R_p^2}{\sqrt{2r_n h_L - h_L^2}}. \quad (11)$$

Со стороны почвы на плод действуют элементарные реакции R_N и R_T , возникающие в точке A пятна контакта плода с почвой. В каждой точке одна из элементарных реакций R_N направлена в сторону центра плода O , а другая R_T – по касательной к поверхности плода. Равнодействующая этих элементарных реакций определяет результирующую силу сопротивления почвы $R_{СП}$, точка A приложения которой по вертикали расположена на дуге СК на глубине h_K , равной половине глубины лунки h_L , и определяется по выражению:

$$b = r_n - \frac{h_L}{2}. \quad (12)$$

В горизонтальном направлении точка A смещена на величину a относительно линии действия силы тяжести G , проходящей через центр вращения плода O . Величина горизонтального смещения a определяется из прямоугольного треугольника OAD , гипотенуза OA которого равна радиусу плода r_n , а катет OD равен b – вертикальной координате точки A , определяемой по выражению (12):

$$a = \sqrt{r_n h_L - \frac{h_L^2}{4}}, \quad (13)$$

Разложив результирующую силу сопротивления почвы $R_{СП}$ по осям X и Y , получим вертикальную R_y реакцию почвы, приводящую к уплотнению почвы и образованию колеи, и горизонтальную R_x реакцию почвы, оказывающую сопротивление качению.

Примем, что плод создает равномерное давление в точке A , тогда величина вертикальной реакции почвы R_y с учетом несущей способности почвы определится по выражению:

$$R_y = q_n b_L h_L, \quad (14)$$

где q_n – несущая способность почвы, Н/м²; b_L – ширина лунки под плодом, м.

Несущая способность почвы определяет зависимость между вертикальной деформацией почвы и давлением, вызывающим эту деформацию, и описывается эмпирическим выражением:

$$q_n = K_{CM} h_L^n, \quad (15)$$

где K_{CM} — коэффициент объемного смятия почвы, Н/м³; n — параметр, характеризующий свойства почвы.

При показателе параметра $n = 1$ зависимость между несущей способностью почвы q_n и глубиной лунки h_L будет представлена в виде линейной связи и выражение (14) примет вид:

$$R_y = K_{CM} b_L h_L^2. \quad (16)$$

В. П. Горячкин считал, что между реакцией почвы на каток и ее деформацией существует прямая зависимость, поэтому выражение по определению глубины уплотнения почвы катком можно использовать для нахождения глубины лунки под плодом $h_{\text{л}}$:

$$h_{\text{л}} = 0,65 \sqrt[3]{\frac{m^2 g^2}{2 K_{\text{см}}^2 b_{\text{л}}^2 r_{\text{п}}}}. \quad (17)$$

Так как плод имеет шарообразную форму, то ширина лунки под плодом $b_{\text{л}}$ на уровне горизонтальной поверхности поля соответствует хорде MK и равна двум расстояниям S , которое определяется выражением (10):

$$b_{\text{л}} = MK = 2S = 2\sqrt{2r_{\text{п}}h_{\text{л}} - h_{\text{л}}^2}. \quad (18)$$

Подставив выражение (18) определения ширины лунки под плодом в выражение (16), получим вертикальную реакцию почвы R_y :

$$R_y = 2K_{\text{см}} h_{\text{л}}^2 \sqrt{2r_{\text{п}}h_{\text{л}} - h_{\text{л}}^2} \quad (19)$$

Величина горизонтальной реакции R_x силы сопротивления качению плода по поверхности поля определяется в зависимости от массы плодов и состояния верхнего слоя почвы по выражению:

$$R_x = mgf_k, \quad (20)$$

где f_k - коэффициент сопротивления качению.

Наиболее часто для расчета коэффициента сопротивления качению используют зависимость, которую эмпирически обосновал В. Грандвуане, а теоретически вывел В. П. Горячкин:

$$f_k = 0,86 \sqrt[3]{\frac{mg}{4K_{\text{см}} b_{\text{л}} r_{\text{п}}^2}}. \quad (21)$$

С учетом выражений (18) и (21) выражение (20) для определения горизонтальной реакции R_x силы сопротивления качению плода примет вид:

$$P_x = 0,86 \sqrt[3]{\frac{m^4 g^4}{8K_{\text{см}}^2 r_{\text{п}}^2 \sqrt{2r_{\text{п}}h_{\text{л}} - h_{\text{л}}^2}}}. \quad (22)$$

Составим уравнения равновесия сил и моментов относительно центра плода О:

$$\begin{aligned} \Sigma X &= 0; & P_T^x + F_{\text{тл}}^x - P_{\text{и}} - R_x &= 0 \\ \Sigma Y &= 0; & P_T^y + R_y - G - F_{\text{тл}}^y &= 0 \\ \Sigma M &= 0; & R_x \cdot b + P_T^y \cdot c - F_{\text{тл}}^y \cdot c - F_{\text{тл}}^x \cdot l - P_T^x \cdot l - R_y \cdot a - M_{\text{и}} &= 0 \end{aligned} \quad (23)$$

Выразив из первого уравнения данной системы P_T^x и подставив его в выражение (3), получим следующее равенство:

$$P_{\text{и}} + R_x - F_{\text{тл}}^x = P_T \cos(\alpha - \varphi_{\text{л}}), \quad (24)$$

из которого получим выражение, определяющее толкающую силу P_T :

$$P_T = \frac{P_{\text{и}} + R_x - F_{\text{тл}}^x}{\cos(\alpha - \varphi_{\text{л}})}. \quad (25)$$

Учитывая, что сила инерции $P_{\text{и}}$ определяется по выражению (11), горизонтальная реакция почвы R_x по выражению (22), а горизонтальная составляющая силы трения плода о лопасть $F_{\text{тл}}^x$ по выражению (6), получим:

$$P_T = \frac{m \frac{\omega_p^2 R_p^2}{\sqrt{2r_{п} h_{л} - h_{л}^2}} + 0,86 \sqrt[3]{\frac{m^4 g^4}{8K_{см} r_{п}^2 \sqrt{2r_{п} h_{л} - h_{л}^2}}} - mg \tan \varphi_{л} \sin \alpha}{\cos(\alpha - \varphi_{л})}. \quad (26)$$

После преобразования данного выражения получим условие перемещения плодов по поверхности поля под действием толкающей силы P_T :

$$P_T = \frac{mg \left(\frac{\omega_p^2 R_p^2}{g \sqrt{2r_{п} h_{л} - h_{л}^2}} + 0,86 \sqrt[3]{\frac{mg}{8K_{см} r_{п}^2 \sqrt{2r_{п} h_{л} - h_{л}^2}}} - \tan \varphi_{л} \sin \alpha \right)}{\cos(\alpha - \varphi_{л})}. \quad (27)$$

При этом величина толкающей силы P_T ограничена прочностными свойствами плодов и не должна приводить к его повреждению [1, 2, 6]:

$$P_T \leq P_{дп}, \quad (28)$$

где $P_{дп}$ – допустимое динамическое воздействие на плод, определяемое экспериментально, Н.

Следовательно:

$$P_T = \frac{mg \left(\frac{\omega_p^2 R_p^2}{g \sqrt{2r_{п} h_{л} - h_{л}^2}} + 0,86 \sqrt[3]{\frac{mg}{8K_{см} r_{п}^2 \sqrt{2r_{п} h_{л} - h_{л}^2}}} - \tan \varphi_{л} \sin \alpha \right)}{\cos(\alpha - \varphi_{л})} \leq P_{дп}. \quad (29)$$

Горизонтальная реакция почвы R_x совместно с горизонтальной составляющей толкающей силы P_T^x на плече b образует движущий момент M_d , который стремится вращать плод, а момент M_c от действия силы тяжести G и вертикальной реакции R_y на плече a оказывает сопротивление качению плода. Вместе с ним на сопротивление качению оказывает влияние и момент M_f от действия силы трения $F_{тл}$, возникающей в точке контакта лопасти ротора и плода B и момент инерции плода M_H [3].

Для получения качественной продукции бахчевых культур необходимо, чтобы плоды при уборке получали минимальное повреждение от лопастей уборочного ротора [4, 11], что обеспечивается перекатыванием плода, находящегося в плодоприемной ячее уборочного ротора, при его движении по полю к центру платформы, следовательно, условие выполнения этого процесса имеет вид:

$$M_d > M_c + M_f + M_H. \quad (30)$$

Движущий момент M_d действует по часовой стрелке (рисунок 1), поэтому из выражения уравнения моментов системы (23) получим:

$$M_d = R_x \cdot b + P_T^y \cdot c, \quad (31)$$

где b и c – плечи действия сил соответственно P_x и P_T^y , м.

Вертикальную составляющую толкающей силы P_T^y выразим из второго уравнения равновесия сил (23):

$$P_T^y = G + F_{тл}^y - R_y. \quad (32)$$

Заменив в этом выражении вертикальную составляющую силы трения плода о лопасть $F_{тл}^y$ выражением (7), а вертикальную реакцию почвы R_y выражением (19) и выполнив преобразования, получим:

$$P_T^y = mg \left(1 + \tan \varphi_{\text{л}} \cos \alpha - \frac{2K_{\text{см}} h_{\text{л}}^2 \sqrt{2r_{\text{п}} h_{\text{л}} - h_{\text{л}}^2}}{mg} \right). \quad (33)$$

Подставив выражение (22) и (33) в выражение (31) определения движущего момента M_D и учитывая, что плечи действия этих сил b и c определяются по выражениям (12) и (1), получим:

$$M_D = mg \left[0,86 \left(r_{\text{п}} - \frac{h_{\text{л}}}{2} \right) \sqrt[3]{\frac{mg}{8K_{\text{см}} r_{\text{п}}^2 \sqrt{2r_{\text{п}} h_{\text{л}} - h_{\text{л}}^2}}} + \right. \\ \left. + r_{\text{п}} \cos \alpha \left(1 + \tan \varphi_{\text{л}} \cos \alpha - \frac{2K_{\text{см}} h_{\text{л}}^2 \sqrt{2r_{\text{п}} h_{\text{л}} - h_{\text{л}}^2}}{mg} \right) \right]. \quad (34)$$

Момент сопротивления качению M_C определяется по выражению:

$$M_C = P_T^x \cdot l + R_y \cdot a, \quad (35)$$

где l и a – плечи действия сил соответственно P_T^x и P_y , м.

Горизонтальная составляющая толкающей силы P_T^x определяется по выражению (3), которое с учетом выражения (27) примет вид:

$$P_T^x = mg \left(\frac{\omega_{\text{п}}^2 R_{\text{п}}^2}{g \sqrt{2r_{\text{п}} h_{\text{л}} - h_{\text{л}}^2}} + 0,86 \sqrt[3]{\frac{mg}{8K_{\text{см}} r_{\text{п}}^2 \sqrt{2r_{\text{п}} h_{\text{л}} - h_{\text{л}}^2}}} - \tan \varphi_{\text{л}} \sin \alpha \right) \quad (36)$$

Подставив выражение (19) и (36) в выражение (35) определения момента сопротивления M_C и учитывая, что плечи действия этих сил l и a определяются по выражениям (2) и (13), получим:

$$M_C = mgr_{\text{п}} \sin \alpha \left(\frac{\omega_{\text{п}}^2 R_{\text{п}}^2}{g \sqrt{2r_{\text{п}} h_{\text{л}} - h_{\text{л}}^2}} + 0,86 \sqrt[3]{\frac{mg}{8K_{\text{см}} r_{\text{п}}^2 \sqrt{2r_{\text{п}} h_{\text{л}} - h_{\text{л}}^2}}} - \tan \varphi_{\text{л}} \sin \alpha \right) + \\ + 2K_{\text{см}} h_{\text{л}}^2 \sqrt{2r_{\text{п}} h_{\text{л}} - h_{\text{л}}^2} \sqrt{r_{\text{п}} h_{\text{л}} - \frac{h_{\text{л}}^2}{4}}. \quad (37)$$

Момент M_F от действия силы трения $F_{\text{ТЛ}}$, возникающей в точке контакта лопасти ротора и поверхности плода B , определяется на плече, равном радиусу плода $r_{\text{п}}$ с учетом выражения (5):

$$M_F = mgr_{\text{п}} \tan \varphi_{\text{л}} \quad (38)$$

Момент силы инерции плода $M_{\text{и}}$ определяется как произведение момента инерции плода $J_{\text{п}}$ на его угловое ускорение ε :

$$M_{\text{и}} = J_{\text{п}} \varepsilon, \quad (39)$$

где $J_{\text{п}}$ – момент инерции плода, кг·м²; ε – угловое ускорение плода, с⁻².

Учитывая допущение, что плод имеет шарообразную форму радиусом $r_{\text{п}}$, момент инерции плода будет равен:

$$J_{\text{п}} = \frac{2}{5} m r_{\text{п}}^2. \quad (40)$$

Примем допущение, что плод под действием лопасти уборочного ротора совершает равномерное вращательное движение по поверхности поля, тогда его угловое ускорение ε будет равно:

$$\varepsilon = \frac{\omega_{\text{п}}}{t}, \quad (41)$$

где t – время выкатывания плода из лунки, с.

В свою очередь время t определяется как отношение пути S , которое пройдет плод при выкатывании из лунки к его скорости V_{Π} . С учетом того, что расстояние S определяется по выражению (10), а скорость плода V_{Π} - выражением (9), получим:

$$t = \frac{\sqrt{2r_{\Pi}h_{\Pi}-h_{\Pi}^2}}{\omega_{\Pi} R_{\Pi}} \quad (42)$$

В связи с тем, что линейные скорости плода и лопасти уборочного ротора равны $V_{\Pi} = V_P$, то угловая скорость качения плода ω_{Π} определится по выражению:

$$\omega_{\Pi} = \frac{\omega_P R_P}{r_{\Pi}}. \quad (43)$$

Заменив в выражении (41) угловую скорость плода ω_{Π} выражением (43), а время t выражением (42) и выполнив преобразования, получим:

$$\varepsilon = \frac{\omega_P^2 R_P^2}{r_{\Pi} \sqrt{2r_{\Pi}h_{\Pi}-h_{\Pi}^2}}. \quad (44)$$

Подставив выражение (40) и (44) в выражение (39) определения момента силы инерции M_{Π} , а также выполнив преобразования, получим:

$$M_{\Pi} = \frac{2 m r_{\Pi} \omega_P^2 R_P^2}{5 \sqrt{2r_{\Pi}h_{\Pi}-h_{\Pi}^2}}. \quad (45)$$

Заменив в выражении (30) движущий момент M_D выражением (34), момент сопротивления M_C – выражением (37), момент силы трения M_F – выражением (38) и момент силы инерции M_{Π} – выражением (45), получим условие перекатывания плода, находящегося в плодоприемной ячее уборочного ротора, при его движении по полю к центру платформы в следующем виде:

$$\begin{aligned} & mg \left[0,86 \left(r_{\Pi} - \frac{h_{\Pi}}{2} \right)^3 \sqrt{\frac{mg}{8K_{\text{см}} r_{\Pi}^2 \sqrt{2r_{\Pi}h_{\Pi}-h_{\Pi}^2}}} + \left(1 + \tan \varphi_{\Pi} \cos \alpha - \frac{2K_{\text{см}} h_{\Pi}^2 \sqrt{2r_{\Pi}h_{\Pi}-h_{\Pi}^2}}{mg} \right) \right] > \\ & > mgr_{\Pi} \sin \alpha \left(\frac{\omega_P^2 R_P^2}{g \sqrt{2r_{\Pi}h_{\Pi}-h_{\Pi}^2}} + 0,86^3 \sqrt{\frac{mg}{8K_{\text{см}} r_{\Pi}^2 \sqrt{2r_{\Pi}h_{\Pi}-h_{\Pi}^2}}} - \tan \varphi_{\Pi} \sin \alpha \right) + \\ & + 2K_{\text{см}} h_{\Pi}^2 \sqrt{2r_{\Pi}h_{\Pi}-h_{\Pi}^2} \sqrt{r_{\Pi}h_{\Pi} - \frac{h_{\Pi}^2}{4}} + mgr_{\Pi} \tan \varphi_{\Pi} + \frac{2 m r_{\Pi} \omega_P^2 R_P^2}{5 \sqrt{2r_{\Pi}h_{\Pi}-h_{\Pi}^2}}. \end{aligned} \quad (46)$$

Выводы. В результате теоретического обоснования взаимодействия плодов бахчевых культур с лопастью уборочного ротора было получено условие перемещения плодов по поверхности поля под действием толкающей силы, которая не должна превышать допустимого динамического воздействия на плод. Величина данной силы зависит в первую очередь от массы плодов и технологических свойств почвы, а также от конструктивных и кинематических параметров уборочного ротора. Установлено, что минимальное повреждение плодов от лопастей уборочного ротора обеспечивается перекатыванием плода, находящегося в плодоприемной ячее уборочного ротора, при его движении по полю к центру платформы.

Библиографический список

1. Алгоритм сохранения качества плодовоовощной продукции при уборочно-транспортных работах / И. А. Успенский, И. А. Юхин, С. В. Колупаев, К. А. Жуков // Техника и оборудование для села. 2013. № 12. С. 12-15.
2. Аналитическое определение технологических параметров разработанного комбайна для уборки бахчевых / А. Н. Цепляев, В. А. Цепляев, М. В. Ульянов, С. В. Климов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 1 (53). С. 321-327.

3. Исследование процесса взаимодействия ведущих колес трактора с грунтовой поверхностью / В. В. Гуськов [и др.] // Наука и техника. 2017. Т. 16. № 1. С. 83-88.
4. Определение оптимального соотношения скоростей рабочих элементов машин при уборке арбузов и капусты / А. Н. Цепляев, М. В. Ульянов, А. В. Цепляев, С. А. Климов, В. А. Цепляев // Аграрный научный журнал. 2019. № 5. С. 89-94.
5. Теоретические исследования по изучению перекачивания сферических и тороидальных тел на примере плодов бахчевых культур / А. Н. Цепляев, М. В. Ульянов, С. В. Климов, А. В. Цепляев // Вестник Курганской ГСХА. 2019. № 1 (29). С. 62-65.
6. Успенский И. А., Юхин И. А., Жуков К. А. Пути снижения травмируемости плодово-овощной продукции при внутрихозяйственных перевозках // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). 2014. № 96 (02). <http://ej.kubagro.ru/2014/02/pdf/26.pdf>.
7. Шапров М. Н., Седов А. В., Гурба А. В. Анализ технологий и способов уборки бахчевых культур // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 2 (58). С. 363-374.
8. Шапров М. Н., Седов А. В., Гурба А. В. Роторная машина для уборки бахчевых культур // Сельский механизатор. 2019. № 7. С. 8-9.
9. Шапров М. Н., Седов А. В. Обоснование конструкции роторного подборщика для уборки плодов бахчевых культур // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2013. № 4 (32). С. 214-217.
10. The choice of technology of agricultural crops cultivation on the basis of the manual labor costs indicator optimization (for the example of vegetable and melon crops cultivation) / A. S. Ovchinnikov, A. N. Tseplyaev, M. N. Shaprov, M. V. Ul'yanov, S. S. Poltorynkin, A. V. Sedov, V. A. Tseplyaev, V. M. Slavutsky, V. E. Berdyshev, V. S. Bocharnikov, I. B. Borisenko, S. M. Grigorov, S. D. Fomin, V. I. Ol'garenko // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. № 14 (22). P. 33897-3905.
11. Theoretical studies of the damage process of easily damaged products in transport vehicle body during the on-farm transportation / N. V. Byshov, S. N. Borychev, D. E. Kashirin, G. D. Koko-rev, M. Y. Kostenko, G. K. Rembalovich, A. A. Simdyankin, I. A. Uspensky, A. I. Ryadnov, R. A. Kosul'nikov, A. V. Shemyakin, I. A. Yukhin, I. K. Danilov // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. № 13 (10). P. 3502-3508.
12. Xing X., Liu F., Gao J. Design and implementation of watermelon traceable identification algorithm based on biometric texture information // Nongye Gongcheng Xuebao. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2017. № 33. P. 298-305.

Conclusions. As a result of the theoretical justification of the interaction of melon fruits with the blade of the harvesting rotor, a condition was obtained for the movement of fruits on the field surface under the action of a pushing force, which should not exceed the permissible dynamic effect on the fruit. The value of this force depends primarily on the weight of the fruit and the technological properties of the soil, as well as on the design and kinematic parameters of the harvesting rotor. It is established that the minimum damage to the fruit from the blades of the harvesting rotor is provided by rolling the fruit, located in the fruit-receiving cell of the harvesting rotor, when it moves across the field to the center of the platform.

Reference

1. Algorithm for preserving the quality of fruit and vegetable products during harvesting and transport works / I. A. Uspenskiy, I. A. Yukhin, S. V. Kolupaev, K. A. Zhukov // Technique and equipment for the village. 2013. No. 12. P. 12-15.
2. Analytical determination of technological parameters of a developed combine for harvesting melons / A. N. Tseplyaev, V. A. Tseplyaev, M. V. Ulyanov, S. V. Klimov // Proceedings of the lower Volga agrodiversity complex: science and higher professional education. 2019. No. 1 (53). P. 321-327.

3. Investigation of the process of interaction of tractor driving wheels with the ground surface / V. V. Guskov [et al.] // *Nauka i tekhnika*. 2017. Vol. 16. No. 1. Pp. 83-88.
4. Determination of the optimal ratio of the speeds of working elements of machines when harvesting watermelons and cabbage / A. N. Tseplyaev, M. V. Ulyanov, A. V. Tseplyaev, S. A. Klimov, V. A. Tseplyaev // *Agrarian Scientific Journal*. 2019. No. 5. Pp. 89-94.
5. Theoretical studies on the study of rolling of spherical and toroidal bodies on the example of melon fruits / A. N. Tseplyaev, M. V. Ulyanov, S. V. Klimov, A. V. Tseplyaev // *Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy*. 2019. No. 1 (29). Pp. 62-65.
6. Uspensky I. A., Yukhin I. A., Zhukov K. A. Ways to reduce the injury rate of fruit and vegetable products in on-farm transport // *Polythematic network electronic scientific journal of Kuban state agrarian University (Scientific journal of Kubgau)*. 2014. № 96 (02). <http://ej.kubagro.ru/2014/02/pdf/26.pdf>.
7. Shaprov M. N., Sedov A. V., Gurba A. V. Analysis of technologies and methods of harvesting melons // *Proceedings of the lower Volga agrodiversity complex: science and higher professional education*. 2020. No. 2 (58). Pp. 363-374.
8. Shaprov M. N., Sedov A. V., Gurba A. V. Rotary machine for harvesting melons // *Rural mechanizer*. 2019. № 7. Pp. 8-9.
9. Shaprov M. N., Sedov A. V. Substantiation of the design of a rotary picker for harvesting melon fruits // *Proceedings of the lower Volga agrodiversity complex: science and higher professional education*. 2013. No. 4 (32). P. 214-217.
10. The choice of technology of agricultural crops cultivation on the basis of the manual labor costs indicator optimization (for the example of vegetable and melon crops cultivation) / A. S. Ovchinnikov, A. N. Tseplyaev, M. N. Shaprov, M. V. Ul'yanov, S. S. Poltorynkin, A. V. Sedov, V. A. Tseplyaev, V. M. Slavutsky, V. E. Berdyshev, V. S. Bocharnikov, I. B. Borisenko, S. M. Grigorov, S. D. Fomin, V. I. Ol'garenko // *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. № 14 (22). P. 33897-3905.
11. Theoretical studies of the damage process of easily damaged products in transport vehicle body during the on-farm transportation / N. V. Byshov, S. N. Borychev, D. E. Kashirin, G. D. Kokorev, M. Y. Kostenko, G. K. Rembalovich, A. A. Simdyankin, I. A. Uspensky, A. I. Ryadnov, R. A. Kosul'nikov, A. V. Shemyakin, I. A. Yukhin, I. K. Danilov // *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. № 13 (10). P. 3502-3508.
12. Xing X., Liu F., Gao J. Design and implementation of watermelon traceable identification algorithm based on biometric texture information // *Nongye Gongcheng Xuebao. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2017. № 33. P. 298-305.

Authors Information

Shaprov Mikhail Nikolaevich, Professor of the Department "life Safety" of the Volgograd state agrarian University (400002, Volgograd, Universitetskiy Ave., 26), doctor of technical Sciences, Professor, ORCID: 0000-0002-9929-5042. E-mail: m.shaprov@yandex.ru.

Sedov Alexey Vasilyevich, associate Professor of the Department "Technical systems in the agro-industrial complex", Volgograd state agrarian University (400002, Volgograd, Universitetskiy Ave., 26), candidate of technical Sciences, associate Professor, ORCID: 0000-0002-3896-5129. E-mail: sedov7020@yandex.ru.

Sedova Olga Petrovna, associate Professor of the Department "Processing Technologies and Food Safety", Volgograd state agrarian University (400002, Volgograd, Universitetskiy Ave., 26), candidate of agricultural Sciences, ORCID: 0000-0001-9936-8558. E-mail: o.p.sedova@yandex.ru

Gurba Alexey Valerievich, research teacher, Volgograd state agrarian University (400002, Volgograd, Universitetskiy Ave. 26), ORCID: 0000-0002-0557-9950. E-mail: algurru@mail.ru.

Информация об авторах

Шапров Михаил Николаевич, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет» (400002, Волгоград, пр-т Университетский, 26), доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-9929-5042. E-mail: m.shaprov@yandex.ru.

Седов Алексей Васильевич, доцент кафедры «Технические системы в АПК» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет» (400002, Волгоград, пр-т Университетский, 26), кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-3896-5129. E-mail: sedov7020@yandex.ru.

Седова Ольга Петровна, доцент кафедры «Перерабатывающие технологии и продовольственная безопасность» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет» (400002, Волгоград, пр-т Университетский, 26), кандидат сельскохозяйственных наук, ORCID: 0000-0001-9936-8558. E-mail: o.p.sedova@yandex.ru.

Гурба Алексей Валерьевич, преподаватель-исследователь ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет» (400002, Волгоград, пр-т Университетский, 26), ORCID: 0000-0002-0557-9950. E-mail: algurru@mail.ru.

DOI: 10.32786/2071-9485-2021-02-45

RESEARCH COMPLEX FOR STUDYING THE INFLUENCE OF HIGH-VOLTAGE OF ELECTRIC IMPULSE EFFECTS ON LARVAE OF LOCUST INSECTS

I.V. Yudaev¹, V.A. Eviev², B.I. Belyaeva², R.G. Kokurin³

¹ Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
«St. Petersburg State Agrarian University»

² Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
«Kalmyk State University named after B. Gorodovikov»

³ Azov-Black Sea Engineering Institute – the branch of Federal State Budget Educational Institution
of Higher Education «Don State Agrarian University» in Zernograd

Received 05.03.2021

Submitted 11.05.2021

Abstract

Introduction. For centuries, locust insects have been causing harm to the crop sector of agriculture, which is estimated as significant in more than 60 countries of the world. Today, when the problem of providing food to the world's population is more acute than ever, it is necessary not only to improve the culture of agriculture, to develop environmentally friendly technologies for the production of high-quality products, but it is also necessary to look for new approaches in the fight against harmful insects and diseases that would be environmentally safe and did not contain harmful components in the products. Therefore, in our opinion, the most interesting from the point of view of high technological efficiency, environmental and food safety is the option of locust destruction using high voltage of electrical impulses. The use of electric impulse technologies can be implemented as an effective agricultural technique for combating larvae (egg capsules) of locust insects. **Object.** The object of the research is designed impulse voltage generator, which is the main element of experimental research complex for studying the effect of high-voltage of electrical impulses on locust larva located in the soil layer. **Materials and methods.** To study the effect of high voltage electrical impulses on the egg-pods, it is necessary to conduct series of experimental studies in laboratory to determine the parameters of such an effect and identify processing modes. The main unit of the research facility is impulse voltage generator. Its work determines the effectiveness of the impact, the possibility of stable work, the formation of safety requirements and the features of its operation. **Results and conclusion.** The designed and manufactured impulse voltage generator has been tested and verified in operation, showing high stability under laboratory conditions as part of experimental research complex. The research setup allows, depending on the value of the processing voltage and the capacitance of the output stage capacitor: 1) to set the impulse repetition rate, the upper limit of the values of which depends on the previously entered data, and the lower one is 1 Hz; 2) to set counter for the number of impulses, which executing preset algorithm controls their generation; 3) to generate high-voltage impulses with amplitude of 16 kV with exponential cut and of various duration. The research complex, assembled on the basis of impulse voltage generator, allows not only the processing of soil samples under laboratory conditions, but also makes it possible to process the experimental results in the function of continuous scanning using computer, making adjustments to the processing and evaluating the obtained results.

Key words: *larvae (egg capsules) of locust insects; high voltage of electrical impulses; pulse voltage generator; design and testing; research experimental set-up.*

Citation. Yudaev I.V., Eviev V.A., Belyaeva B.I., Kokurin R.G. Research complex for studying the influence of high-voltage of electric impulse effects on larvae of locust insects. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2021. 2(62). 454-467 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2021-02-45.