

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.4.996-1009>

УДК 631.348:631.356.02



Математическое моделирование работы сепарирующего устройства автоматизированной машины для очистки клубней картофеля

© 2026. А. В. Сибирёв ✉, В. С. Тетерин, Н. В. Сазонов, А.Г. Пономарев, А. О. Волков

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Российская Федерация

Цель работы – разработка математической модели сепарирующего устройства автоматизированной машины для очистки клубней картофеля от почвы с целью предотвращения вывоза с поля плодородного слоя почвы и возможного дальнейшего распространения заболеваний растений картофеля через зараженную почву. Рассмотрен процесс взаимодействия прутка сепарирующего транспортера и почвенного комка. Построены графики изменения кинетической энергии для почвенных комков, имеющих различную массу, в зависимости от частоты вращения привода планчатого транспортера. В процессе моделирования в среде Mathcad определены масса комков при варьировании от 0,2 до 0,8 кг; высота выгрузки клубневого гнезда составляла 0,3 м; масса пруткового транспортера – 23 кг; радиус приводного вала – 0,1 м; угол наклона пруткового транспортера относительно горизонта – 0,3491 рад. Определена графическая зависимость изменения потери кинетической энергии от частоты вращения привода пруткового транспортера для комков различной массы. Установлено, что с увеличением частоты вращения привода пруткового транспортера наблюдается рост потери кинетической энергии в результате ударного воздействия, при этом с увеличением массы почвенного комка наблюдается линейный рост данного показателя. Потеря кинетической энергии в результате ударного взаимодействия прутка сепарирующего транспортера и почвенного комка будет равна работе, затрачиваемой на разрушение почвенного комка в результате падения на поверхность пруткового транспортера. Определено, что поступающая на планчатый транспортер масса включает в себя ботву, клубни картофеля и почву. В свою очередь, качество сепарации поступающей массы будет определяться расстоянием между прутками и частицами почвы определенного размера. Результаты проведенного моделирования установили, что повышение эффективности процесса очистки наблюдается при варьировании частоты колебаний полотна в интервале 45–60 Гц и постоянном значении амплитуды, равном 0,03 м.

Ключевые слова: сепарация, автоматизация, цифровая система, технологическая платформа, исходные требования, фитопочистка, имитационная модель

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № FGUN-2022-0003).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сибирёв А. В., Тетерин В. С., Сазонов Н. В., Пономарев А. Г., Волков А. О. Математическое моделирование работы сепарирующего устройства автоматизированной машины для очистки клубней картофеля. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(4):996–1009. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.4.996-1009>

Поступила: 26.08.2025

Принята к публикации: 31.07.2026

Доработана после рецензирования: 16.01.2026

Опубликована онлайн: 31.08.2026

Mathematical modeling of the operation of an automated machine for cleaning potato tubers

© 2026. Aleksey V. Sibirev ✉, Vladimir S. Teterin, Nikolay V. Sazonov, Andrey G. Ponomarev, Artem O. Volkov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

The aim of the study is to develop a mathematical model of a separation device for an automated machine designed to clean potato tubers from soil, with the goal of preventing the removal of the fertile soil layer from the field and the possible further spread of potato plant diseases through contaminated soil. The process of interaction between the rod of the separating conveyor and the soil lump is considered. Graphs of the change in kinetic energy for soil lumps of different masses, depending on the rotation frequency of the slatted conveyor drive, are constructed. During the modeling process in the Mathcad environment, the mass of lumps was determined with a variation from 0.2 to 0.8 kg; the unloading height of the tuber nest was 0.3 m; the mass

of the slatted conveyor was 23 kg; the radius of the drive shaft was 0.1 m; the angle of inclination of the conveyor relative to the horizon was 0.3491 rad. A graphical dependence of the change in kinetic energy loss on the rotation frequency of the slatted conveyor drive for lumps of different masses was determined. It was found that with an increase in the rotation frequency of the slatted conveyor drive, an increase in kinetic energy loss as a result of impact action is observed, while with an increase in the mass of the soil lump, a linear increase in this indicator is observed. The loss of kinetic energy as a result of the impact interaction of the rod of the separating conveyor and the soil lump will be equal to the work spent on the destruction of the soil lump as a result of falling onto the surface of the slat conveyor. It was determined that the mass entering the slat conveyor includes tops, potato tubers and soil. In turn, the quality of separation of the incoming mass will be determined by the distance between the rods and soil particles of a certain size. The results of the conducted modeling established that an increase in the efficiency of the cleaning process is observed when varying the frequency of oscillations of the web in the range of 45–60 Hz and a constant amplitude value of 0.03 m.

Keywords: separation, automation, digital system, technological platform, initial requirements, phytocleaning, simulation model

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. FGUN-2022-0003).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors stated that there was no conflict of interest.

For citation: Sibirev A. V., Teterin V. S., Sazonov N. V., Ponomarev A. G., Volkov A. O. Mathematical modeling of the operation of an automated machine for cleaning potato tubers. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(4):996–1009. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.4.996-1009>

Received: 26.08.2025

Revised: 16.01.2026

Accepted for publication: 31.07.2026

Published online: 31.08.2026

При проектировании новых или модернизации старых сельскохозяйственных машин зачастую возникает необходимость проверки разработанной концепции на упрощенном варианте предлагаемых систем, который в перспективе оказывается еще одним самостоятельным вариантом исполнения или эксплуатации машины, позволяя решить или упростить задачи, связанные с ее эксплуатацией или проблемами в хозяйстве.

Так, актуальной проблемой многих сельскохозяйственных предприятий на текущий момент является не только устаревание материальной базы, но и кадровый голод, причем нехватка кадров ощутима не только в плане высококвалифицированного персонала, но и рабочих, операторов, отвечающих за ручной труд.

Таким образом, актуальной становится задача автоматизации процессов, происходящих на производстве с целью минимизации или облегчения ручного труда, а также снижения человеческого фактора и травмоопасности [1, 2, 3].

Важнейшей отраслью растениеводства в России является производство картофеля, эффективность которой зависит не только от качественно проведенных ключевых агротехнологических операций, но и от эффективной послеуборочной обработки. Механизация процесса автоматизированного удаления зараженных растений картофеля, который отличается большим разнообразием сортов, и как следствие размерно-массовыми характеристиками. В свою очередь при проведении операции по удалению зараженных растений картофеля с поля важно осуществить качественную сепарацию растений и почвы с целью предотвращения вывоза плодородного слоя почвы с поля и возможного дальнейшего распространения заболеваний через зараженную почву [4, 5, 6].

Поэтому проведение эффективной операции ухода за растениями картофеля имеет важнейшее технологическое значение как для производства качественного семенного материала, так и для его хранения.

Необходимость выполнения работ по оздоровлению семенного материала картофеля обусловлена сохранением банка здоровых растений современной отечественной селекции [6].

Развитие сельскохозяйственного производства картофеля на современном технологическом уровне невозможно обеспечить без широкого внедрения роботизированных технологий, обеспечивающих снижение затрат человеческого труда, повышение качества производства семян вне зависимости от квалификации оператора машинно-технологических комплексов на операциях посева/посадки, ухода, уборки, закладки семенного фонда на хранение, а также удаления зараженных растений [7, 8, 9].

Машиностроительные предприятия как российского, так и зарубежного сегментов сельскохозяйственного машиностроения в настоящее время обеспечивают разработку данной категории машин при имеющихся в их конструкции несовершенствах, обусловленных высокими энергетическими затратами на привод функционирующих элементов, недостаточной производительностью, а также широким использованием ручного труда [10, 11].

Предприятиями-изготовителями машин для ухода за растениями картофеля с элементами автоматизации в настоящее время являются

VSS Agro, Goucon Selection, Gerkon techniek, номенклатура продукции которых представлена на рисунке 1.

А / А



Б / В



В / С



Рис. 1. Общий вид машин для удаления зараженных растений картофеля: А – VSS Agro Selection; Б – Goucon Selection; В – Gerkon techniek /

Fig. 1. General view of machines for removing infected plants of potato: А – VSS Agro Selection; Б – Goucon Selection; C – Gerkon techniek

Внедрение робототехнических систем и комплексов в современное сельскохозяйственное производство обеспечивается номенклатурой машин [12, 13], предназначенных для роботизированного сбора урожая пло-

довощной продукции и ухода за растениями картофеля [14, 15].

Варьирование внешних условий при возделывании сельскохозяйственных культур при стохастическом изменении погодных условий,

а также агрофона выращивания способствует снижению равномерности созревания товарной продукции и поражений их заболеваниями, что приводит к повышению трудоемкости идентификации биологических объектов современными цифровыми системами распознавания [15, 16].

Коллективом авторов П. П. Казакевичем, А. Н. Юриным и Г. А. Прокоповичем разработан и обоснован цифровая система технического зрения для механизации сортирования плодов яблони на основе созданного программного обеспечения по оценке топологических параметров биологических объектов и их повреждений от механического воздействия, вредителей и болезней [17].

Совершенствование цифровой системы идентификации сельскохозяйственных культур и последующего их извлечения/удаления/обмолачивания определяется ключевыми аспектами [18, 19]: распознавание продукции; выбор требуемого объекта; взаимодействие с продуктом [20].

Цель исследования – разработка математической модели сепарирующего устройства автоматизированной машины для очистки клубней картофеля от почвы с целью предотвращения вывоза с поля плодородного слоя почвы и возможного дальнейшего распространения заболеваний растений картофеля через зараженную почву.

Научная новизна – установлены закономерности взаимодействия сепарирующего устройства автоматизированной машины с клубненосным ворохом при определении физических и контактных параметров имитационной модели.

Материал и методы. Проведение исследований моделирования разрабатываемого технического средства для удаления зараженных растений картофеля выполняли на базе ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва).

Моделирование технологического процесса работы сепарирующего устройства автоматизированной машины для удаления зараженных растений выполняли с использованием пакета прикладных программ Solidworks, «Компас» и Ansys Rocky DEM с последующей статистической обработкой результатов исследований в среде Mathcad при выборе в качестве первоначального объекта исследований клубней картофеля.

Результаты и их обсуждение. Разработка сепарирующего устройства автоматизированной машины для удаления из почвы зараженных растений картофеля необходима для выполнения операции очистки извлеченного клубневого гнезда от налипшей на клубни почвы (рис. 2).

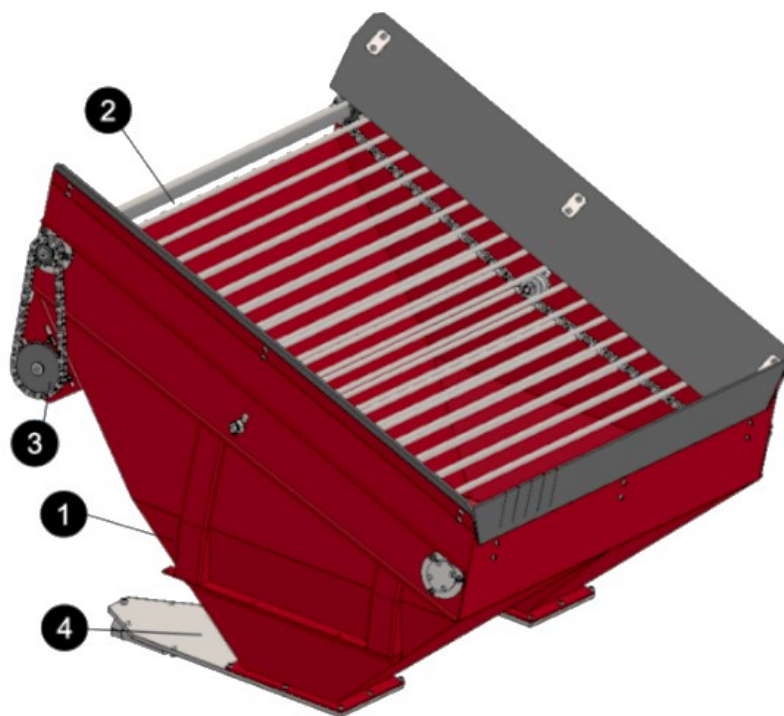


Рис. 2. Общий вид сепарирующего устройства автоматизированной машины: 1 – накопительный бункер; 2 – прутковый транспортёр; 3 – привод транспортёра; 4 – шиберные заслонки /

Fig. 2. General view of the separating device of the automated: 1 – storage bin; 2 – slatted conveyor; 3 – conveyor drive; 4 – gate valves

Выполнение данного условия определяется возможностью исключения вывоза плодородного и в то же время зараженного слоя почвы с площади поля, в то время как очищенная от поверхности клубня почва после прохода

через межпрутковое расстояние сепарирующего устройства подвергается обеззараживанию и укладке в лунку последующего извлеченного клубневого гнезда (рис. 3).

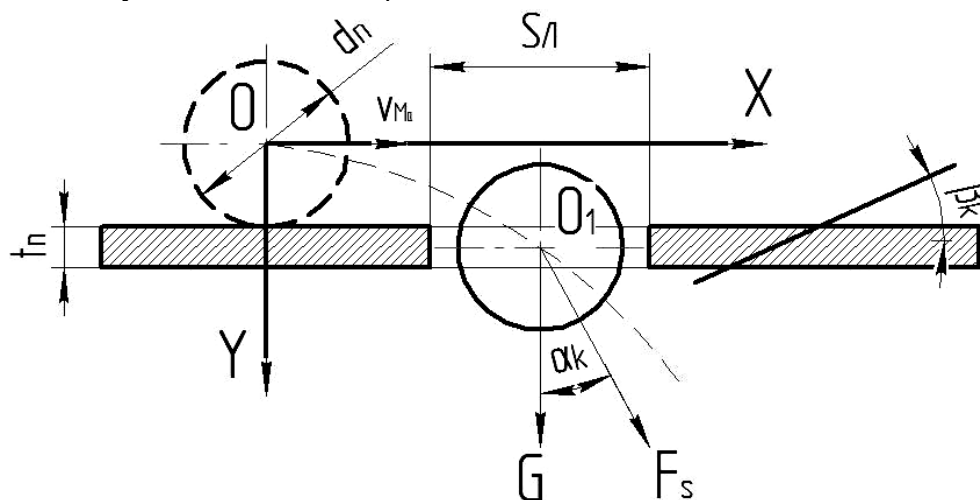


Рис. 3. Схема прохода частицы по сепарирующей поверхности: d_n – диаметр частицы почвы, м; $S_л$ – щелевое расстояние между прутками, мм; t_n – толщина прутка, м /

Fig. 3. Scheme of particle passage along the separating surface: d_n – diameter of soil article, m; $S_л$ – gap distance between rods, mm; t_n – rod thickness, m

Важно учитывать, что поступающая на прутковый транспортёр масса включает в себя ботву, клубни картофеля и почву. В свою очередь качество сепарации поступающей массы будет определяться расстоянием между прутками и частицами (фракциями) почвы определенного размера. Вероятность просеивания частиц почвы через щелевое расстояние между прутками можно определить [21]:

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(H_i) \cdot P(A/H_i), \quad (1)$$

где $P(A)$ – вероятность просеивания частиц почвы через щелевое расстояние между прутками; $P(H_i)$ – вероятность содержания частиц определённой фракции в почве.

Вероятность содержания частиц соответствующей фракции рассчитывается по формуле [21]:

$$P(H_i) = \frac{m_i}{M}, \quad (2)$$

где m_i – содержание фракции определённого размера; M – масса почвы и растений картофеля, поступающая на прутковый транспортёр.

Исходя из того, что извлекаемая масса почвы вместе с растением картофеля будет состоять из частиц различного размера, то для определения рационального щелевого расстояния между прутками необходимо задаться агротехнологическими показателями почвы при возделывании картофеля.

Так, при соблюдении всех технологических операций по подготовке почвы, её

фракционный состав на 95 % будет состоять из частиц размером менее 25 мм. В исследованиях, представленных в работе М. Ю. Костенко, отмечается, что с учётом помех повышенной склонностью к непросеву обладают частицы размером более $0,62S_л$ [22].

Исходя из имеющихся условий для просеивания основной массы почвы, щелевое расстояние между прутками должно быть от 40 мм.

В процессе взаимодействия клубневого гнезда с рабочей поверхностью сепарирующего устройства и в результате его перемещения по ней будет наблюдаться разрушающее воздействие на почвенные комки. На первом этапе при выгрузке клубневого гнезда на рабочую поверхность сепарирующего устройства масса почвы и растения находится в свободном падении до момента соударения с поверхностью пруткового транспортёра.

Рассмотрим процесс взаимодействия прутка сепарирующего транспортера и почвенного комка.

Будем считать удар абсолютно неупругим, тогда вероятность разрушения и степень крошения комков зависят от потери кинетической энергии при их соударении с прутками:

$$\Delta E_k = E_{k0} - E_k, \quad (3)$$

где E_{k0} – начальная кинетическая энергия почвенного комка и прутка сепарирующего транс-

портёра, Дж; E_k – кинетическая энергия почвенного комка и пруткового транспортёра в конце удара при выгрузке, Дж.

Начальная кинетическая энергия комка и прутка сепарирующего транспортёра определяется:

$$E_{k0} = \frac{1}{2} m_k \cdot v_k^2 + \frac{1}{2} m_n \cdot v_n^2, \quad (4)$$

где m_k и m_n – масса почвенного комка и пруткового транспортёра соответственно, кг; v_k и v_n – скорость почвенного комка и пруткового транспортёра соответственно, м/с.

Так как клубневое гнездо при раскрытии ковшей манипулятора падает вертикально вниз и в начальный момент времени его скорость близка к нулю, то его скорость в результате вертикального падения можно рассчитать по формуле:

$$v_k = \sqrt{2gh_b}, \quad (5)$$

где h_b – высота выгрузки клубневого гнезда, м.

В связи с тем, что прутковый транспортёр движется под углом к горизонту, то скорость прутка вычисляется выражением:

$$v_n = \omega_{пр} \cdot R_{пр.в} \cdot \sin \alpha_{тр}, \quad (6)$$

$$\Delta E_{кв} = \frac{1}{2} m_k \left(\sqrt{2gh_b} - \frac{m_k \cdot \sqrt{2gh_b} + m_n \cdot \omega_{пр} \cdot R_{пр.в} \cdot \sin \alpha_{тр}}{m_k + m_n} \right)^2 + \frac{1}{2} m_n \left(\omega_{пр} \cdot R_{пр.в} \cdot \sin \alpha_{тр} - \frac{m_k \cdot \sqrt{2gh_b} + m_n \cdot \omega_{пр} \cdot R_{пр.в} \cdot \sin \alpha_{тр}}{m_k + m_n} \right)^2. \quad (10)$$

На основе уравнения (10) в программе Mathcad были построены графики изменения кинетической энергии для почвенных комков, имеющих различную массу, в зависимости от частоты вращения привода пруткового транспортёра.

В процессе моделирования использовали следующие исходные значения: масса комков варьировала от 0,2 до 0,8 кг; высота выгрузки клубневого гнезда составляла 0,3 м; масса пруткового транспортёра – 23 кг; радиус приводного вала – 0,1 м; угол наклона пруткового транспортёра относительно горизонта – 0,3491 рад (рис. 4).

Анализ графика показывает, что повышение частоты вращения привода пруткового транспортёра приводит к росту потерь кинетической энергии в результате ударного воздействия, при этом с увеличением массы почвенного комка наблюдается линейный рост данного показателя.

где $\omega_{пр}$ – частота вращения привода, сек⁻¹; $R_{пр.в}$ – радиус приводного вала, м; $\alpha_{тр}$ – угол наклона пруткового транспортёра относительно горизонта, град.

Кинетическая энергия почвенного комка и прутка сепарирующего транспортёра в конце удара определяется выражением:

$$E_{кв} = \frac{1}{2} m_k \cdot u_k^2 + \frac{1}{2} m_n \cdot u_n^2, \quad (7)$$

где u_k и u_n – скорость почвенного комка и пруткового транспортёра, соответственно, в конце удара, м/с.

Подставив в выражение (5) значения уравнений (6) и (7), получим:

$$\Delta E_{кв} = \frac{1}{2} m_k (v_k - u_k)^2 + \frac{1}{2} m_n (v_n - u_n)^2. \quad (8)$$

Так как при неупругом ударе коэффициент восстановления $k = 0$, то $u_k = u_n = u$. Следовательно прутки и почвенный комки будут двигаться совместно со скоростью, которая вычисляется по формуле:

$$u = \frac{m_k \cdot v_k + m_n \cdot v_n}{m_k + m_n}. \quad (9)$$

Подставив в выражение (8) значения уравнений (5), (6) и (7), то выражение для изменения кинетической энергии примет вид:

Потеря кинетической энергии в результате ударного взаимодействия прутка сепарирующего транспортера и почвенного комка будет равна работе, затрачиваемой на разрушение почвенного комка в результате падения на поверхность планчатого транспортёра, т. е. $A_{к.в.} = \Delta E_{к.в.}$.

Для определения взаимодействия почвенного комка с поверхностью пруткового транспортёра рассмотрим случай, когда положение пруткового транспортёра будет соответствовать максимальному подъёму встряхивателя (рис. 5).

При движении по прутковому транспортёру на почвенный комки будут действовать сила тяжести (G), сила нормальной реакции пруткового транспортёра (N), сила тяги транспортёра (F_m) и сила сопротивления перемещению (F_c). При движении почвенных комков по полотну пруткового транспортёра будет осуществляться работа, затрачиваемая на их перемещение и характеризующаяся изменением кинетической энергии.

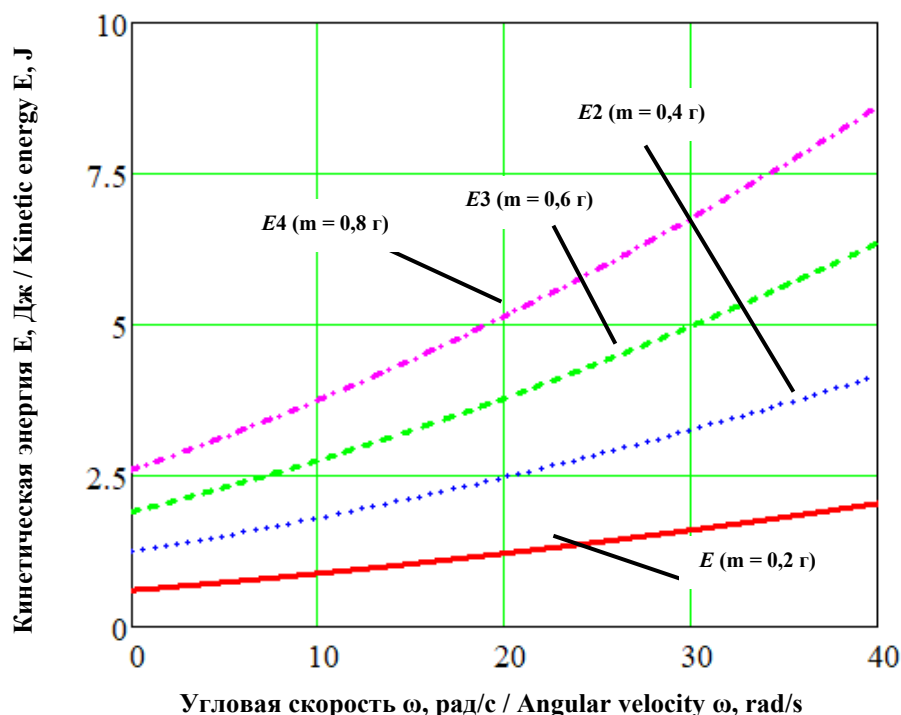


Рис. 4. График изменения потери кинетической энергии E (Дж) от частоты вращения ω (рад/с) привода пруткового транспортера для комков различной массы /

Fig. 4. Graph of change in kinetic energy E (J) loss from the rotation frequency ω (rad/s) of the slat conveyor drive for lumps of different masses

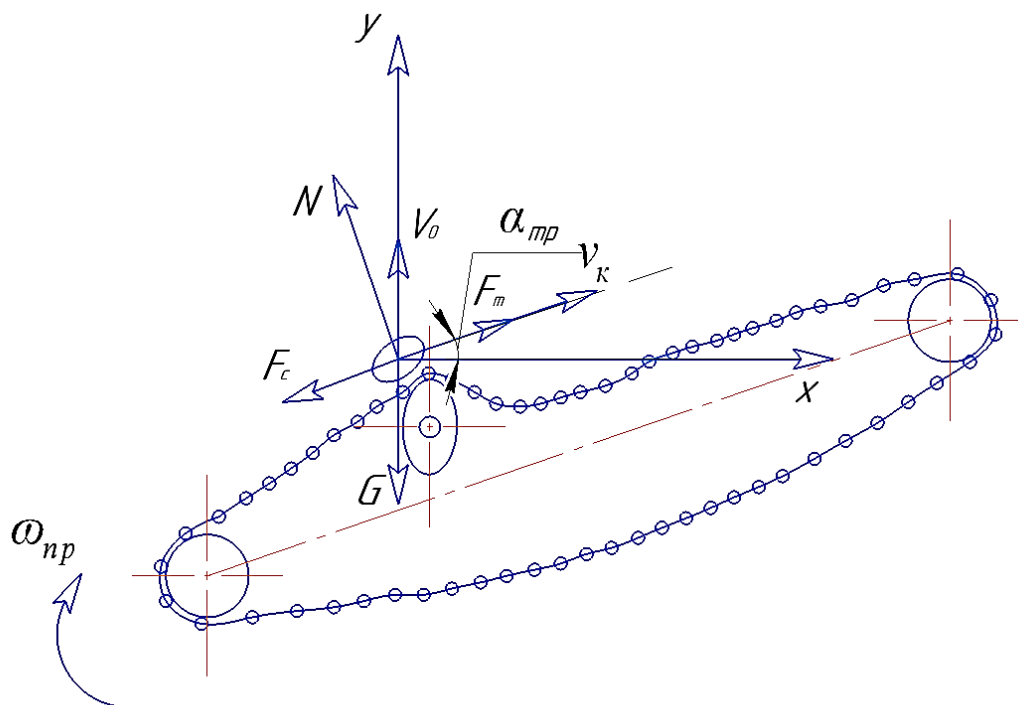


Рис. 5. Расчётная схема для определения взаимодействия почвенного комка и полотна пруткового транспортера /

Fig. 5. Calculation scheme for determining the interaction of a soil lump and a slat conveyor web

Запишем теорему об изменении кинетической энергии для одного из почвенных комков, представив его в виде материальной точки:

$$A_{\text{к.п.}} = \frac{1}{2} m_{\text{к}} \cdot u_{\text{к2}}^2 - \frac{1}{2} m_{\text{к}} \cdot v_{\text{к2}}^2, \quad (11)$$

где $v_{\text{к2}}$ – начальная скорость перемещения почвенного комка после соударения с прутковым транспортёром ($v_{\text{к2}} = u$), м/с; $u_{\text{к2}}$ – скорость почвенного комка в конце пруткового транспортёра, м/с; $A_{\text{к.п.}}$ – работа, приложенная к почвенному комку на его перемещение, Дж.

Определим работу, приложенную к почвенному комку, как сумму работ активных сил на расстоянии l :

$$A_{\text{к.п.}} = A(G) + A(N) + A(F_{\text{т}}) + A(F_{\text{с}}), \quad (12)$$

где $A(G)$ – силы тяжести, Дж; $A(N)$ – нормальной реакции пруткового транспортёра, Дж; $A(F_{\text{т}})$ – силы тяги пруткового транспортёра, Дж; $A(F_{\text{с}})$ – силы сопротивления движению, Дж.

Работа силы тяжести определяется вертикальным перемещением почвенного комка:

$$A(G) = -G \cdot \Delta h = -m_{\text{к}} \cdot g \cdot l_{\text{к}} \cdot \sin \alpha_{\text{тр}}, \quad (13)$$

где $l_{\text{к}}$ – расстояние от места выгрузки клубневого гнезда до конца пруткового транспортёра, м.

Так как нормальная реакция пруткового транспортёра направлена перпендикулярно к перемещению, то её работа будет равна нулю:

$$A(N) = 0. \quad (14)$$

Работу силы тяги $F_{\text{т}}$ на перемещение почвенного комка определим по формуле:

$$A(F_{\text{т}}) = m_{\text{т}} \cdot a_{\text{т}} \cdot l_{\text{к}}, \quad (15)$$

где $m_{\text{т}}$ – масса пруткового транспортёра, кг; $a_{\text{т}}$ – ускорение пруткового транспортёра, м/с².

Работа силы сопротивления движению будет определяться:

$$A(F_{\text{с}}) = -m_{\text{к}} \cdot a_{\text{т}} \cdot l_{\text{к}}. \quad (16)$$

После подстановки значений выражений (13), (14) и (16) в уравнение (12) определим сумму работ всех сил, приложенных к почвенному комку на перемещение:

$$A_{\text{к.п.}} = l_{\text{к}} (m_{\text{т}} \cdot a_{\text{т}} - m_{\text{к}} \cdot (g \cdot \sin \alpha_{\text{тр}} - a_{\text{т}})). \quad (17)$$

Определим изменение кинетической энергии почвенного комка в результате его встряхивания при движении по прутковому транспортёру. Для этого запишем уравнение скорости почвенного комка после встряхивания:

$$v_{\text{к.в.}} = \sqrt{2g \cdot h_{\text{п}}}, \quad (18)$$

где $v_{\text{к.в.}}$ – скорость почвенного комка в момент падения после встряхивания, м/с; $h_{\text{п}}$ – высота подъёма почвенного комка в результате встряхивания, м.

Высота подъёма почвенного комка в результате встряхивания определяется законом сохранения энергии:

$$h_{\text{п}} = \frac{v_0^2}{2 \cdot g}. \quad (19)$$

Кинетическая энергия в начальный момент времени почвенного комка и пруткового транспортёра будет определяться выражением:

$$E_{\text{к.в.1}} = \frac{1}{2} m_{\text{к}} \cdot v_{\text{к.в.}}^2 + \frac{1}{2} m_{\text{п}} \cdot V_{\text{п}}^2. \quad (20)$$

С учётом выражений (18) и (19) запишем уравнение (17) в следующем виде:

$$E_{\text{к.в.1}} = \frac{1}{2} m_{\text{к}} \cdot 2g \cdot h_{\text{п}} + \frac{1}{2} m_{\text{п}} (\omega \cdot r \cdot \sin(\omega t - \omega t_3)). \quad (21)$$

При колебании полотна пруткового транспортёра в момент удара почвенного комка о пруток они приобретают скорость соударения, таким образом кинетическая энергия в конечном положении будет иметь вид:

$$E_{\text{к.в.2}} = \frac{1}{2} m_{\text{к}} \cdot V_{\text{с}}^2 + \frac{1}{2} m_{\text{п}} \cdot V_{\text{с}}^2. \quad (22)$$

В результате потеря кинетической энергии определяется:

$$\Delta E_{\text{к.в.}} = \frac{1}{2} m_{\text{к}} \cdot (2g \cdot h_{\text{п}} - V_{\text{с}}^2) + \frac{1}{2} m_{\text{п}} ((\omega \cdot r \cdot \sin(\omega t - \omega t_3)) - V_{\text{с}}^2). \quad (23)$$

С учётом выражения (19) уравнение для определения потери кинетической энергии при соударении примет вид:

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{к.в.}} = & \frac{1}{2} m_{\text{к}} \left(2gh_{\text{п}} - gr \left(\sqrt{2 \left(\frac{(\omega t)^2 + 8}{4\sqrt{(\omega t)^2 + 4}} - \cos \left(\omega t - \arctg \frac{\omega t}{2} \right) \right)} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \sqrt{\frac{(\omega t)^2 + 4}{2}} \sin \left(\omega t - \arctg \frac{\omega t}{2} \right) \right)^2 \right) + \frac{1}{2} m_{\text{п}} \left((\omega r \sin(\omega t - \omega t_3)) - \right. \\ & \left. - gr \left(\sqrt{2 \left(\frac{(\omega t)^2 + 8}{4\sqrt{(\omega t)^2 + 4}} - \cos \left(\omega t - \arctg \frac{\omega t}{2} \right) \right)} - \sqrt{\frac{(\omega t)^2 + 4}{2}} \cdot \sin \left(\omega t - \arctg \frac{\omega t}{2} \right) \right)^2 \right). \quad (24) \end{aligned}$$

На основе выражения (24) в программе Mathcad были построены графики изменения кинетической энергии по времени для почвенных

комков в зависимости от амплитуды колебания пруткового транспортёра (рис. 6).

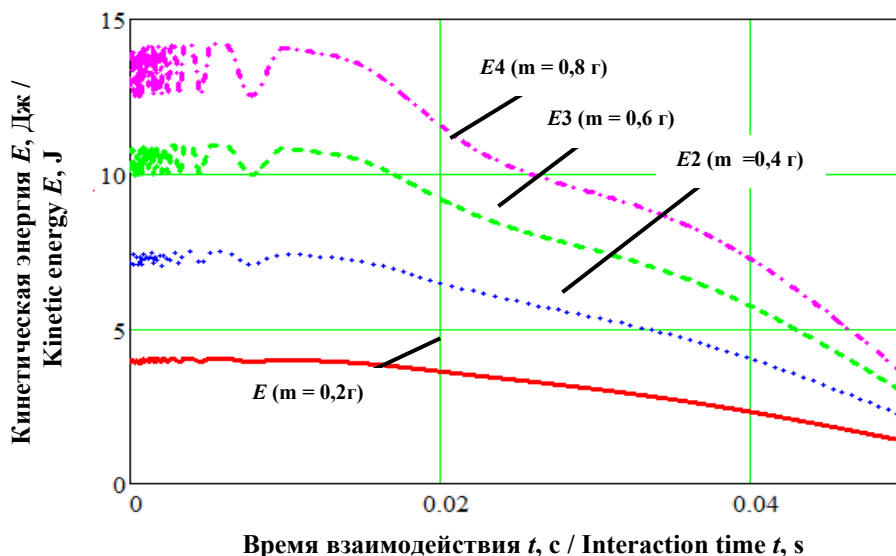


Рис. 6. Изменение кинетической энергии E (Дж) по времени t (с) для почвенных комков в зависимости от амплитуды колебания пруткового транспортёра /

Fig. 6. Change in kinetic energy E (J) over time t (s) for soil lumps depending on the oscillation amplitude of the slat conveyor

Полученные графики изменения кинетической энергии в результате работы пруткового транспортёра показывают, что с увеличением амплитуды колебаний наблюдается рост потери кинетической энергии, которая расходуется на разрушение почвенных комков, при этом снижение показателей в зависимости от времени, связано с тем, что изменяется фаза колебаний полотна пруткового транспортёра, а также происходит процесс разрушения почвенного комка. Для разрушения почвенных комков на более мелкие фракции необходимо осуществить определённую работу. Для определения которой можно воспользоваться выражением Г. Г. Егорова на основе гипотезы В. Л. Кирпичева. Выражение описывает связь между затраченной работой и величиной деформированного объема тела с учётом затраты работы на образование новой поверхности [21, 22]:

$$A_p = \frac{\sigma_{сж}^2 \cdot V}{2E} \cdot \lambda_g \lambda^3, \quad (25)$$

где $\sigma_{сж}^2$ – предел прочности тела при сжатии, МПа; E – модуль упругости, МПа; V – объём деформируемого тела; λ_g – коэффициент, характеризующий степень крошения почвенного комка; λ – коэффициент, показывающий соотношения разрушаемого комка к вновь образованным почвенным комкам:

$$\lambda = \frac{B}{b}, \quad (26)$$

где B – размер в поперечнике разрушаемого почвенного комка, м; b – размер в поперечнике образованных почвенных комков, м.

В результате можно говорить о том, что для разрушения почвенных комков должно соблюдаться следующее условие:

$$A_p \geq \sum A_T, \quad (27)$$

где $\sum A_T$ – сумма работ, осуществляемых в процессе выгрузки и перемещения клубневого гнезда по прутковому транспортёру, Дж.

Определение полноты оценки очистки и степени разрушения механических примесей выполняли при моделировании процесса в среде программы Ansys Rocky DEM после построения модели пруткового транспортёра в программе SolidWorks с характеристиками: длина транспортёра 1 м; количество прутков 43 шт.; расстояние между прутками 0,04 м; диаметр прутков 0,01 м; ширина пруткового транспортёра 1 м.

Разработанные модели почвенно-растительных примесей и клубней картофеля отображены на рисунке 7 с представлением физических и контактных параметров имитационной модели вороха корнеклубнеплодов в таблице.

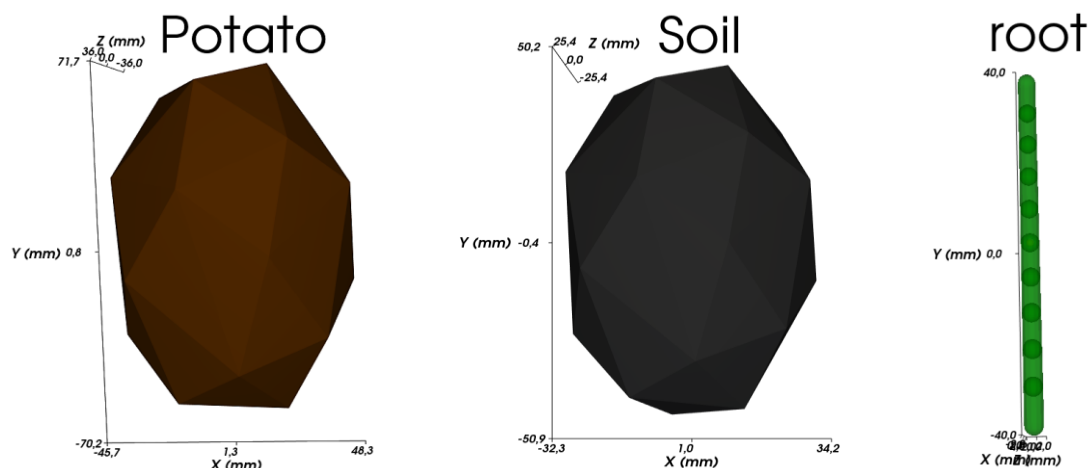


Рис. 7. Используемые модели объектов, подвергающихся сепарации /
Fig. 7. Used models of objects subjected to separation

Таблица – Физические и контактные параметры имитационной модели вороха корнеклубнеплодов /
Table – Physical parameters and contact parameters of the simulation model of a pile of root crops

Параметр / Parameter	Грунт / Ground	Растительные примеси / Plant impurities	Сталь / Steel
Плотность, кг/м ³ / Density, kg/m ³	1850	243	7800
Коэффициент Пуассона / Poisson's ratio	0,38	0,4	0,31
Модуль сдвига, Па / Shear modulus, Pa	1,0×10 ⁶	1,0×10 ⁶	7,0×10 ¹⁰
Коэффициент / Coefficient:			
- реституции (взаимодействие с клубнями) / restitution (interaction with tubers)	0,2	0,5	0,28
- статического трения (взаимодействие с грунтом) / static friction (interaction with soil)	0,4	0,3	0,5
- трения качения (взаимодействие с клубнями) / rolling friction (interaction with tubers)	0,25	0,05	0,04
- реституции (взаимодействие с растительными примесями) / restitution (interaction with plant impurities)	0,5	0,3	0,3
- статического трения (взаимодействие с растительными примесями) / static friction (interaction with plant impurities)	0,3	0,65	0,3
- трения качения (взаимодействие с растительными примесями) / rolling friction (interaction with plant impurities)	0,05	0,06	0,01
- восстановления (взаимодействие со сталью) / restitution (interaction with steel)	0,28	0,3	-
- статического трения (взаимодействие со сталью) / static friction (interaction with steel)	0,5	0,3	-
- трения качения (взаимодействие со сталью) / rolling friction (interaction with steel)	0,04	0,01	-

Моделирование технологического процесса работы (рис. 8) выполняли при установлении параметров пруткового транспортера в интервалах: высота выгрузки клубневого гнезда составляла 0,3 м; скорость движения планчатого транспортёра – 0,9 м/с; частота колебаний варьировала от 30 до 60 Гц; амплитуда колебаний – от 0,01 до 0,05 м.

Результаты проведенного моделирования позволяют сделать вывод о том, что повышение эффективности процесса очистки в среднем на 5–7 % наблюдали при варьировании частоты колебаний полотна пруткового транспортера в интервале 45–60 Гц и постоянном значении амплитуды, равном 0,03 м.

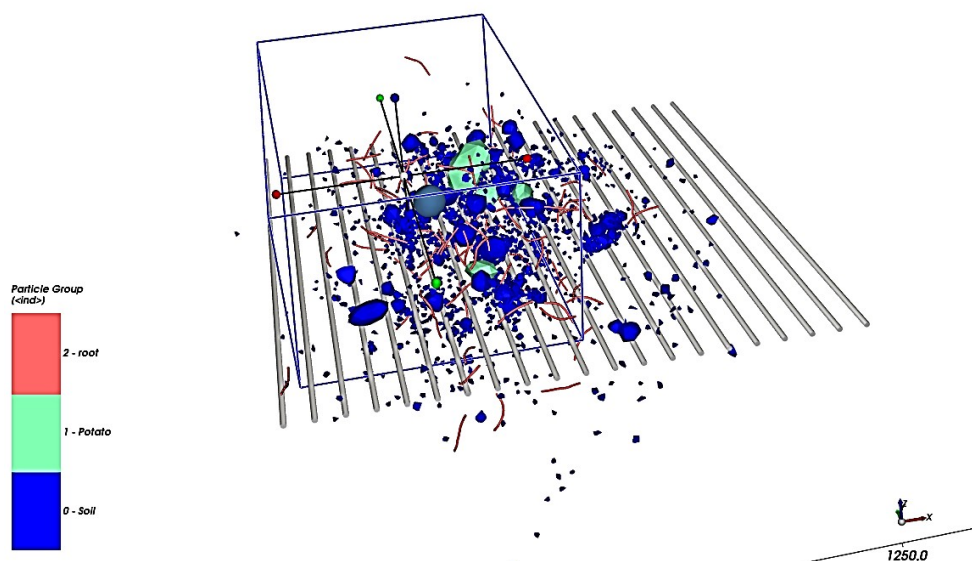


Рис. 8. Процесс моделирования работы пруткового транспортера /
Fig. 8. The process of modeling the operation of a slat conveyor

Кроме того, установлено, что повышение качества очистки клубненосного вороха на 5–7 % обеспечивается при увеличении времени нахождения очищаемой продукции на первом каскаде пруткового транспортера в диапазоне от 0,02 до 0,04 %.

Заключение. Рассмотрен процесс взаимодействия прутка сепарирующего транспортера и почвенного комка. Построены графики изменения кинетической энергии для почвенных комков, имеющих различную массу, в зависимости от частоты вращения привода планчатого транспортера.

В процессе моделирования в среде Mathcad определены масса комков при варьировании от 0,2 до 0,8 кг; высота выгрузки клубневого гнезда составляла 0,3 м; масса пруткового транспортера – 23 кг; радиус приводного вала – 0,1 м; угол наклона пруткового транспортера относительно горизонта – 0,3491 рад.

Определена графическая зависимость изменения потери кинетической энергии от частоты вращения привода пруткового транспортера для комков различной массы. Установлено, что повышение частоты вращения привода пруткового транспортера приводит к росту потерь кинетической энергии в

результате ударного воздействия, при этом с увеличением массы почвенного комка наблюдается линейный рост данного показателя.

Потеря кинетической энергии в результате ударного взаимодействия прутка сепарирующего устройства и почвенного комка будет равна работе, затрачиваемой на разрушение почвенного комка в результате падения на поверхность пруткового транспортера.

Результаты проведенного моделирования позволяют сделать вывод о том, что повышение эффективности процесса очистки клубненосного вороха на 5–7 % наблюдали при варьировании частоты колебаний полотна пруткового транспортера в интервале 45–60 Гц и постоянном значении амплитуды, равном 0,03 м. Кроме того установлено, что повышение качества очистки клубненосного вороха обеспечивается при увеличении времени нахождения очищаемой продукции на первом каскаде сепарирующего транспортера.

Перспектива выполнения данных исследований будет в дальнейшем направлена на адаптацию рабочих элементов автоматизированной машины для удаления зараженных растений картофеля, в том числе и сепарирующего устройства под различные виды овощных культур.

Список литературы

1. Лобачевский Я. П., Бейлис В. М., Ценч Ю. С. Аспекты цифровизации системы технологий и машин. Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019;(3):40–45.
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41192528> EDN: RLCDHO
2. Измайлов А. Ю., Колчин Н. Н., Лобачевский Я. П., Кынев Н. Г. Современные технологии и специальная техника для картофелеводства. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2015;(3):43–47.
Режим доступа: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/76/32> EDN: TTLVUJ

3. Лачуга Ю. Ф., Измайлов А. Ю., Лобачевский Я. П., Шогенов Ю. Х. Интенсивные машинные технологии, роботизированная техника и цифровые системы для производства основных групп сельскохозяйственной продукции. Техника и оборудование для села. 2018;(7):2–7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35303139> EDN: UUUFBG
4. Пономарев А. Г., Колчин Н. Н., Зернов В. Н., Петухов С. Н. Селекции и семеноводству картофеля необходима механизация. Картофель и овощи. 2017;(3):22–24.
Режим доступа: http://potatoveg.ru/wp-content/uploads/2018/04/3_2017.pdf EDN: YGUMYN
5. Ларюшин Н. П., Кухарев О. Н., Кирюхина Т. А. Исходные положения при проектировании машин для уборки лука. Наука в центральной России. 2015;(6(18)):48–58. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25118239> EDN: VDRFPD
6. Лобачевский Я. П., Ценч Ю. С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022;16(4):4–12. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12> EDN: IDJFYV
7. Труфляк Е. В., Курченко Н. Ю., Дайбова Л. А., Креймер А. С., Подушин Ю. В., Белая Е. М. Мониторинг и прогнозирование научно-технологического развития АПК в области точного сельского хозяйства, автоматизации и роботизации. Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сб. ст. по мат-лам 72-ой научн.-практ. конф. преподавателей. Краснодар: КубГАУ им. И. Т. Трубилина, 2017. С. 335–336.
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29740008> EDN: ZAUUYP
8. Dongre A. U., Battase R., Dudhale S., Patil V. R., Chavan D. Development of Potato Harvesting Model. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2017;4(10):1567–1570.
URL: <https://www.irjet.net/archives/V4/i10/IRJET-V4I10288.pdf>
9. Lü J. Q., Shang Q. Q., Yang Y., Li Zh. Design optimization and experiment on potato haulm cutter. Transactions of the CSAM. 2016;47(5):106–114. DOI: <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.015>
10. Azizi P., Dehkordi N. S., Farhadi R. Design, Construction and Evaluation of Potato Digger with Rotary Blade. Cercetari Agronomice in Moldova. 2014;47(3):5–13. DOI: <https://doi.org/10.2478/cerce-2014-0022>
11. Abd El-Rahman M. M. A. Development and Performance Evaluation of a Simple Grading Machine Suitable for Onion Sets. Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering. 2014;2(2):213–226.
DOI: <https://doi.org/10.21608/jssae.2011.55418>
12. Dandekar I., Joshi A., Patil V. Review Paper Based on Design and Development of an Onion Harvesting Machine. Journal of Information and Computational Science. 2020;9(12):333–337.
URL: <https://www.researchgate.net/publication/339201506>
13. Jothi Shanmugam C., Senthilkumar G. Indigenous Development of Low Cost Harvesting Machine. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017;12(5):4489–4490.
URL: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2017/jeas_0817_6236.pdf
14. Bachche S. Deliberation on Design Strategies of Automatic Harvesting Systems: A Survey. Robotics. 2015;4(2):194–222. DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics4020194>
15. Сазонов Н. В., Мосяков М. А., Тетерин В. С., Панферов Н. С., Годяева М. М., Трунов М. С. Показатели качества работы автоматизированной машины для ухода за растениями картофеля в селекции и семеноводстве. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024;18(1):60–67.
DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-1-60-67> EDN: MAJKNM
16. Смирнов И. Г., Хорт Д. О., Кутырев А. И. Интеллектуальные технологии и роботизированные машины для возделывания садовых культур. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021;15(4):35–41.
DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41> EDN: NDDMCH
17. Казакевич П. П., Юрин А. Н., Прокопович Г. А. Система технического зрения распознавания дефектов яблок: обоснование, разработка, испытание. Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. 2021;59(4):488–500. DOI: <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-4-488-500>
18. Лобачевский Я. П., Лачуга Ю. Ф., Измайлов А. Ю., Шогенов Ю. Х. Научно-технические достижения агроинженерных научных организаций в условиях цифровой трансформации сельского хозяйства. Техника и оборудование для села. 2023;(4(310)):2–5. DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-4-2-5> EDN: KIGZD
19. Ganganagowdar N. V., Gundad A. V. An intelligent computer vision system for veg-etables and fruits quality inspection using soft computing techniques. Agricultural Engineering International. 2019;21(3):171–178.
20. Воробьев Н. И., Лысов А. К., Корнилов Т. В., Хютти А. В. Вычислительная нейросеть для обработки светоотражательных спектров растений и дистанционного фитосанитарного мониторинга картофеля. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(2):283–292. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.2.283-292> EDN: KUSISD
21. Ибятков Р. И., Зиганшин Б. Г. О моделировании случайных процессов в агропромышленном комплексе. Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022;17(1(65)):50–55.
DOI: <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2022-50-55> EDN: SXOJGE
22. Голиков А. А., Костенко М. Ю., Рембалович Г. К., Успенский И. А. Математическая модель вероятной оценки наступления технологического отказа картофелеуборочной машины. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014;(99):244–255.
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21695002> EDN: SGTNZN

References

1. Lobachevskiy Ya. P., Beylis V. M., Tsench Yu. S. Aspekty tsifrovizatsii sistemy tekhnologiy i mashin. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovaniye v APK*. 2019;(3):40–45. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41192528>
2. Izmaylov A. Yu., Kolchin N. N., Lobachevskiy Ya. P., Kynev N. G. Modern technologies and special equipment for potato production. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2015;(3):43–47. (In Russ.). URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/76/32>
3. Lachuga Yu. F., Izmaylov A. Yu., Lobachevskiy Ya. P., Shogenov Yu. Kh. Intensive machine technologies, robotized equipment and digital systems for production of main groups of agricultural products. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2018;(7):2–7. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35303139>
4. Ponomarev A. G., Kolchin N. N., Zernov V. N., Petukhov S. N. Mechanization is necessary for breeding and seed growing of potato. *Kartofel' i ovoshchi* = Potato and Vegetables. 2017;(3):22–24. (In Russ.). URL: http://potatoveg.ru/wp-content/uploads/2018/04/3_2017.pdf
5. Laryushin N. P., Kukharev O. N., Kiryukhina T. A. Original position when designing onion harvesting machines. *Nauka v tsentral'noy Rossii* = Science in Central Russia. 2015;(6(18)):48–58. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25118239>
6. Lobachevskiy Ya. P., Tsench Yu. S. Principles of Forming Machine and Technology Systems for Integrated Mechanization and Automation of Technological Processes in Crop Production. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2022;16(4):4–12. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12>
7. Truflyak E. V., Kurchenko N. Yu., Daybova L. A., Kreymer A. S., Podushin Yu. V., Belaya E. M. Monitoring and forecasting of scientific and technological development of agro-industrial complex in the field of precision agriculture, automation and robotics. Scientific support of the agro-industrial complex: collection of articles on the materials of the 72nd scientific and practical conference of teachers. Krasnodar: *KubGAU im. I. T. Trubilina*, 2017. pp. 335–336. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29740008>
8. Dongre A. U., Battase R., Dudhale S., Patil V. R., Chavan D. Development of Potato Harvesting Model. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017;4(10):1567–1570. URL: <https://www.irjet.net/archives/V4/i10/IRJET-V4I10288.pdf>
9. Lü J. Q., Shang Q. Q., Yang Y., Li Zh. Design optimization and experiment on potato haulm cutter. *Transactions of the CSAM*. 2016;47(5):106–114. DOI: <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.015>
10. Azizi P., Dehkordi N. S., Farhadi R. Design, Construction and Evaluation of Potato Digger with Rotary Blade. *Cercetari Agronomice in Moldova*. 2014;47(3):5–13. DOI: <https://doi.org/10.2478/cerce-2014-0022>
11. Abd El-Rahman M. M. A. Development and Performance Evaluation of a Simple Grading Machine Suitable for Onion Sets. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*. 2014;2(2):213–226. DOI: <https://doi.org/10.21608/jssae.2011.55418>
12. Dandekar I., Joshi A., Patil V. Review Paper Based on Design and Development of an Onion Harvesting Machine. *Journal of Information and Computational Science*. 2020;9(12):333–337. URL: <https://www.researchgate.net/publication/339201506>
13. Jothi Shanmugam C., Senthilkumar G. Indigenous Development of Low Cost Harvesting Machine. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017;12(5):4489–4490. URL: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2017/jeas_0817_6236.pdf
14. Bachche S. Deliberation on Design Strategies of Automatic Harvesting Systems: A Survey. *Robotics*. 2015;4(2):194–222. DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics4020194>
15. Sazonov N. V., Mosyakov M. A., Teterin V. S., Panferov N. S., Godyaeva M. M., Trunov M. S. Quality Metrics of Automated Machinery in Potato Plant Cultivation for Breeding and Seed Production. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2024;18(1):60–67. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-1-60-67>
16. Smirnov I. G., Khort D. O., Kutyrev A. I. Intelligent Technologies and Robotic Machines for Garden Crops Cultivation. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2021;15(4):35–41. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41>
17. Kazakevich P. P., Yurin A. N., Prokopovich G. A. Technical vision system for apple defects recognition: justification, development, testing. *Vestsi Natsyyanal'noy akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk* = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series. 2021;59(4):488–500. (In Belarus). DOI: <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-4-488-500>
18. Lobachevskiy Ya. P., Lachuga Yu. F., Izmaylov A. Yu., Shogenov Yu. Kh. Scientific and technical achievements of agricultural engineering organizations in the context of digital transformation of agriculture. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2023;(4(310)):2–5. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-4-2-5>
19. Ganganagowdar N. V., Gundad A. V. An intelligent computer vision system for veg-etables and fruits quality inspection using soft computing techniques. *Agricultural Engineering International*. 2019;21(3):171–178.
20. Vorobyov N. I., Lysov A. K., Kornilov T. V., Hyutti A. V. Computational neural network for processing light-reflective spectra of plants and remote phytosanitary monitoring of potatoes. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(2):283–292. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.2.283-292>

21. Ibyatov R. I., Ziganshin B. G. On simulation of random processes in agricultural complex. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of the Kazan State Agrarian University. 2022;17(1(65)):50–55. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2022-50-55>

22. Golikov A. A., Kostenko M. Yu., Rembalovich G. K., Uspenskiy I. A. Mathematical model of probabilistic assessment of the onset of technological failure of a potato harvester. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University. 2014;(99):244–255. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21695002>

Вклад авторов: Сибирев А. В. – общее руководство, постановка задач исследования, научное редактирование текста статьи; Тетерин В. С. – подготовка текста, сбор материалов, анализ литературных данных, формирование выводов; Сазонов Н. В. – редактирование текста, доработка текста, анализ литературных данных, формирование выводов; Пономарев А. Г. – сбор материалов, доработка текста, анализ литературных данных; Волков А. О. – сбор материалов, подготовка текста, анализ литературных данных.

Сведения об авторах

✉ **Сибирёв Алексей Викторович**, доктор техн. наук, профессор РАН, главный научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>, e-mail: sibirev2011@yandex.ru

Тетерин Владимир Сергеевич, доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8116-723X>

Сазонов Николай Викторович, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4899-9197>

Пономарев Андрей Григорьевич, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8871-4419>

Волков Артем Олегович, младший научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru

Author contributions: Sibirev A. V. – general supervision, formulation of research objectives, scientific editing of the text of the article; Teterin V. S. – preparation of text, collection of materials, analysis of literature data, drawing conclusions; Sazonov N. V. – text editing, revision of text, analysis of literature data, drawing conclusions; Ponomarev A. G. – collection of materials, revision of the text, analysis of literature data; A. O. Volkov – collection of materials, preparation of the text, analysis of literature data.

Information about the authors

✉ **Aleksey V. Sibirev**, DSc in Engineering, Professor of the Russian Academy of Sciences, chief researcher, the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>, e-mail: sibirev2011@yandex.ru

Vladimir S. Teterin, DSc in Engineering, leading researcher, the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8116-723X>

Nikolay V. Sazonov, PhD in Engineering, leading researcher, the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4899-9197>

Andrey G. Ponomarev, PhD in Engineering, leading researcher, the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8871-4419>

Artem O. Volkov, junior researcher, the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author