

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.184-195>

УДК 635.1+62-5



Разработка роботизированного буртоукладчика с цифровой системой автоматизированного движения для закладки на хранение картофеля и овощных культур

© 2025. А. С. Дорохов, А. В. Сибирёв✉, М. А. Мосяков, Н. В. Сазонов, А. В. Грищенко

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

Автоматизация процесса закладки картофеля и овощных культур на хранение является значимым фактором увеличения производительности производства. В статье выполнено теоретическое моделирование функциональных параметров роботизированного буртоукладчика. На основании полученных моделей разработан роботизированный буртоукладчик с цифровой системой автоматизированного движения, разработку которой выполняли с использованием методов классической и земледельческой механики, систем автоматизированного проектирования с пакетами прикладных программ Solidworks и «Компас». Для снижения контактного напряжения клубня картофеля при его сходе с поверхности транспортной ленты роботизированного буртоукладчика необходимо предусмотреть наличие устройства для гашения энергии падения клубней на поверхность хранилища. Выполнено теоретическое моделирование гасителя энергии при закладке на хранение картофеля. Рабочая поверхность гасителя колебаний выполнена из резиотехнического материала и представляет собой нелинейную упругую поверхность, имеющую возможность восстанавливаться после деформации. Для рабочего состояния взаимодействия клубня картофеля с гасителем энергии падения максимальное контактное напряжение во время процесса падения клубня составляет 0,107 МПа, а смещение при падении – 33 мм. Для проверки разработанных алгоритмов функционирования цифровой системы автоматизированного движения роботизированного комплекса машин для закладки на хранение картофеля и овощных культур проведены экспериментальные исследования по выполнению технологического процесса движения по хранилищу с определением основных показателей оценки качества и работоспособности машины. Определены результаты оценки обнаружения клубней картофеля в хранилище для развернутой модели искусственной нейронной сети: точности ($T = 93,9\%$), достоверности ($P = 98,2\%$), уровня полноты ($\Pi = 94,8\%$) и оценки ($F1 = 96,5\%$), а также зависимости обнаружения клубней картофеля в хранилище при точности заглубления, точности построения траектории движения машины при естественном и искусственном освещении.

Ключевые слова: технологическая платформа, исходные требования, моделирование, эксперимент, энергия падения

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: Дорохов А. С., Сибирёв А. В., Мосяков М. А., Сазонов Н. В., Грищенко А. В. Разработка роботизированного буртоукладчика с цифровой системой автоматизированного движения для закладки на хранение картофеля и овощных культур. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(1):184–195.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.184-195>

Поступила: 19.09.2024

Принята к публикации: 28.01.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

Development of a digital system for automated movement of a pick-up conveyor for storing potatoes and vegetable crops

© 2025. Aleksey S. Dorokhov, Aleksey V. Sibirev✉, Maksim A. Mosyakov, Nikolai V. Sazonov, Alexander V. Grishchenko

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Automation of the process of laying potatoes and vegetable crops for storage is a significant factor in increasing production productivity. The article presents theoretical modeling of the functional parameters of a robotic clamp stacker. Based on the obtained models, a robotic clamp stacker with a digital automated motion system was developed, the development of which was carried out using the methods of classical and agricultural mechanics, automated design systems with the Solidworks and

"Compass" application software packages. To reduce the contact stress of a potato tuber when it comes off the surface of the conveyor belt of a robotic clamp stacker, it is necessary to provide a device for damping the energy of the tubers falling onto the storage surface. Theoretical modeling of the energy damper when laying potatoes for storage was performed. The working surface of the vibration damper is made of rubber material and is a nonlinear elastic surface that can be restored after deformation. For the working state of the interaction of the potato tuber with the fall energy absorber, the maximum contact stress during the tuber fall is 0.107 MPa, and the displacement during the fall is 33 mm. To test the developed algorithms for the functioning of the digital system of automated movement of the robotic complex of machines for laying potatoes and vegetable crops for storage, experimental studies were conducted on the implementation of the technological process of movement along the storage facility with the definition of the main indicators of the quality and operability of the machine. The results of the potato tuber detection assessment in the storage facility for the expanded model of the artificial neural network were determined: accuracy ($T = 93.9\%$), reliability ($P = 98.2\%$), completeness level ($P = 94.8\%$) and assessment ($F1 = 96.5\%$), as well as the dependence of potato tuber detection in the storage facility on the accuracy of deepening, the accuracy of constructing the machine movement trajectory under natural and artificial lighting.

Keywords: technological platform, initial requirements, modeling, experiment, fall energy

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: Dorokhov A. S., Sibirev A. V., Mosyakov M. A., Sazonov N. V., Grishchenko A. V. Development of a digital system for automated movement of a pick-up conveyor for storing potatoes and vegetable crops. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):184–195. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.184-195>

Received: 19.09.2024

Accepted for publication: 28.01.2025

Published online: 26.02.2025

Одним из сдерживающих факторов более интенсивного увеличения объема валового сбора картофеля и овощных культур, а также площадей их возделывания являются морально устаревшие технологии системы сепарации и сортирования при послеуборочной обработке, которые не соответствуют современным требованиям к продукции при закладке на хранение. Это обусловлено тем, что послеуборочное сортирование вороха в основном является механическим. Данный способ приводит к травмированию картофеля и овощных культур рабочими органами машин для закладки на хранение, что снижает качество продукции и приводит к значительным потерям ее при хранении.

Процессы сепарации, сортирования и последующей закладки на хранение – основополагающие требования агротехнологии выращивания овощных культур и картофеля, которые являются одними из наиболее энергоемких [1, 2, 3].

Современные стандарты требуют, чтобы сельскохозяйственная продукция соответствовала определенным параметрам, таким как размер, цвет и качество. Для соблюдения данных стандартов и обеспечения качества продукции требуется разработка неинвазивных высокопроизводительных методов распознавания и классификации повреждений картофеля и овощных культур [4], выявления поражений их болезнями при сортировании в режиме реального времени при закладке на хранение [5]

с высоким уровнем автоматизации комплекса машин, выполняющих эти операции.

Автоматизация процесса конвейерной транспортировки овощных культур является значимым фактором увеличения производительности производства и включает автоматизацию отдельных конвейеров на определенных участках и линий в целом. В настоящее время предприятиями отечественного сельскохозяйственного машиностроения выпускаются комплексы машин для закладки на хранение овощных культур с частичной системой автоматизацией отдельных операций [4].

В частности, компанией ООО «Агро-техмаш» выпускается машина (рис. 1), обеспечивающая механизированную закладку в хранилище овощной продукции при использовании в конструкции машины электрического привода основных рабочих элементов, которыми управляет оператор. Недостатком конструкции данной машины является невозможность проведения технологической операции без использования оператора, от квалификации которого зависит качество выполнения операции закладки на хранение.

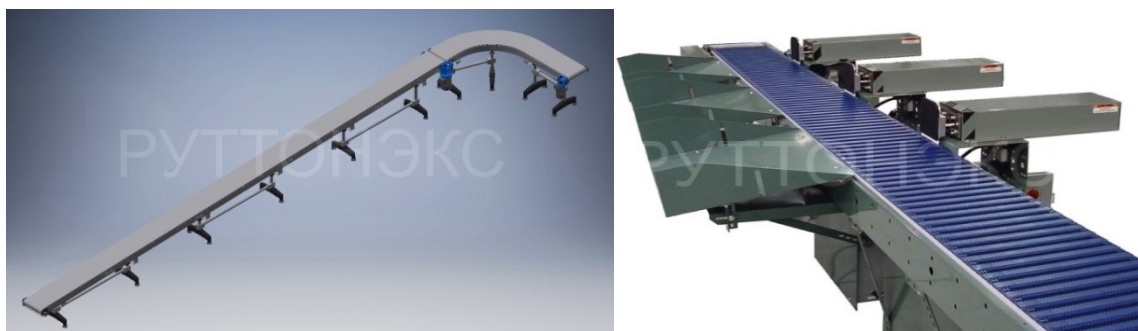
Известна система автоматизации конвейерной транспортировки овощных культур и картофеля (рис. 2) производства «Рутронэкс» (Россия), которая предназначена для перевода конвейерной линии в режим выполнения производственных задач без участия людей (или для его снижения до минимума) [4].

Технические средства для автоматизации процесса конвейерной транспортировки имеют широкую гамму, обладают большим функционалом и предназначены для выполнения ряда задач: изменение траектории движения продукции; скоростная сортировка продукции; автоматизированная отбраковка продукции; скоростной

спуск продукции; измерение параметров продукции в движении; сканирование данных штрих-кодов продукции; автоматизированное накопление и выдача тары; контроль положения грузов на участках движения и накопления; управление средствами автоматизации; безопасность работы оборудования [5].



*Рис. 1. Транспортер-подборщик корнеплодов овощных культур и картофеля /
Fig. 1. Conveyor-picker of root crops, vegetables and potatoes*



*Рис. 2. Система автоматизации конвейерной транспортировки овощных культур и картофеля /
Fig. 2. Automation system for conveyor transportation of vegetables and potatoes*

Экономический эффект от внедрения автоматизации конвейерного оборудования достигается, в основном, за счет высвобождения обслуживающего персонала [6, 7, 8].

Цель исследования – теоретическое моделирование функциональных параметров, в частности гасителя энергии падения при закладке на хранение картофеля, и разработка роботизированного буртоукладчика с цифровой системой автоматизированного движения.

Научная новизна – закономерности моделирования и управления адаптивной системой автоматизированных рабочих органов машины для закладки на хранение картофеля и овощных культур.

Материал и методы. Теоретические и экспериментальные исследования проводили

в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва), а также в производственных условиях ИСА-филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (Рязанская область) в 2022–2024 гг.

Программой предусматривалось проведение исследований по разработке цифровой системы движения роботизированного буртоукладчика для закладки на хранение картофеля и овощных культур, которые выполняли с использованием методов классической и земледельческой механики, систем автоматизированного проектирования с пакетами прикладных программ Solidworks и «Компас». Полученные результаты экспериментальных исследований обрабатывали методом математической статистики с помощью ЭВМ^{1, 2}.

¹Волкова П. А., Шипунов А. Б. Статистическая обработка данных: это должен знать каждый. Издание 3-е, переработанное. М., 2017. 89 с. URL: https://bioclass.ru/wp-content/uploads/2023/12/volkova_shipunov_obrabotka_2.pdf

²Усманов Р. Р. Статистическая обработка данных агрономических исследований в программе «STATISTICA»: учебно-методическое пособие. М.: РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2020. 177 с. URL: <http://elib.timacad.ru/dl/full/umo467.pdf/download/umo467.pdf>

Результаты и их обсуждение. Изменение функциональных параметров роботизированного буртоукладчика при варьировании вида корнеплодов или картофеля, закладываемых на хранение, можно представить как систему с конечным множеством состояний N , переходы в которой возможны в любой момент времени (в любом участке хранилища). Значение N определяется количеством типов корнеплодов в данном хранилище и выбирается согласно технико-экономическому критерию. Процесс перехода функциональных параметров роботизированного буртоукладчика при варьировании вида корнеплодов можно рассматривать как разрывный марковский процесс со счетным числом состояний, т. е. процесс $x(t)$ с N дискретными состояниями и непрерывным временем t .

После предварительной обработки полученной информации поступающий в микроконтроллер для идентификации выборки полученных значений через систему технического зрения – вид корнеплода, закладываемого на хранение, геометрия и площадь хранилища – определяем матрицу исследуемых параметров:

$$\|X\| = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{p1} & X_{p2} & \dots & X_{pn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\bar{X}_i = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{pi})^T$ – вектор измеренных значений признаков измеряемых параметров реализации инновационной технологии закладки на хранение (вид корнеплодов K , геометрии хранилища P и площади хранилища S).

Каждое исследуемое значение по реализации инновационной технологии закладки на хранение определяется системой взаимодействующих параметров роботизированного буртоукладчика, значения которых выражаются через состояние S_2 – нахождение роботизированного буртоукладчика в зоне режимов и S_1 – нахождение роботизированного буртоукладчика не в зоне описывается p -мерным нормальным распределением [5]:

$$N(X, a_K, \Sigma_K), \quad (2)$$

где a_K – оценка средних значений;
 Σ_K – ковариационная матрица.

Кроме того, необходимо предварительно выполнить настройку этапа обучения при известных состояниях системы S_1 и S_2 по обучающим выборкам объема m , представляющих собой результаты измерения значений признаков

m в момент времени с формированием оценки неизвестных векторов средних $\hat{a}_1$ и $\hat{a}_2$ [5]:

$$\hat{a}_1 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{X}_i^{(1)}; \quad (3)$$

$$\hat{a}_2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{X}_i^{(2)}. \quad (4)$$

Состояние системы S_1 :

$$\|X\|_m^{(1)} = \|\bar{X}_1^{(1)}, \bar{X}_2^{(1)} \dots \bar{X}_m^{(1)}\|. \quad (5)$$

Далее на этапе контроля по измеренным в n моментов времени значениям признаков вида корнеплодов $\bar{X}_1^{(1)}, \bar{X}_2^{(1)} \dots \bar{X}_m^{(1)}$ принимается решение о нахождении роботизированного буртоукладчика в зоне позиционирования его в хранилище.

При статистической идентификации по конечной выборке достаточно применить наиболее простой критерий правдоподобности полученных значений исследуемых параметров роботизированного буртоукладчика [5]:

$$\begin{cases} E(\|X\|) \geq 0, & \text{то } S \in S_2; \\ E(\|X\|) < 0, & \text{то } S \in S_1. \end{cases} \quad (6)$$

Задача оптимизации временных параметров технологического процесса работы роботизированного буртоукладчика формулируется как задача минимизации суммарного объема выполненных работ, а именно величины загрузки в хранилище картофеля и овощных культур:

$$\rho = \rho(2m + n), \quad (7)$$

где m – результаты измерения значений признаков n в момент времени с формированием оценки неизвестных векторов средних значений параметра.

Для достижения заданного уровня достоверности выполнения операции роботизированной загрузки хранилища при требуемой величине ограничения площади хранилища необходимо обеспечить проведение большого объема выборок экспериментальных данных как по занимаемой площади хранилища, так и по видам закладываемой на хранение товарной продукции [6, 7, 8].

Для снижения контактного напряжения клубня картофеля при его сходе с поверхности транспортной ленты роботизированного буртоукладчика в конструкции необходимо предусмотреть наличие устройства для гашения энергии падения клубней на поверхность хранилища (рис. 3).

Схема взаимодействия клубня картофеля с гасителем энергии падения представлена на рисунке 4.

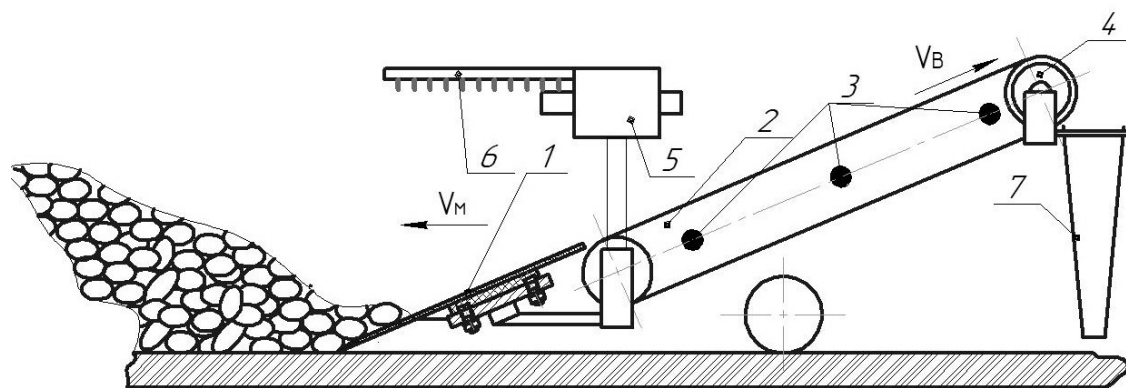


Рис. 3. Схема технологического процесса работы роботизированного буртоукладчика для закладки на хранение картофеля и овощных культур: 1 – питатель подпорный; 2 – транспортер выгрузной; 3 – источник ультрафиолетового излучения; 4 – ролик обводной; 5 – видеокамера; 6 – источник лазерный (диод); 7 – устройство для гашения энергии падения клубней /

Fig. 3. Scheme of the technological process of operation of the robotic complex of machines for laying potatoes and vegetable crops for storage: 1 – supporting feeder; 2 – unloading conveyor; 3 – ultraviolet radiation source; 4 – bypass roller; 5 – video camera; 6 – laser source (diode); 7 – device for damping the energy of falling tubers

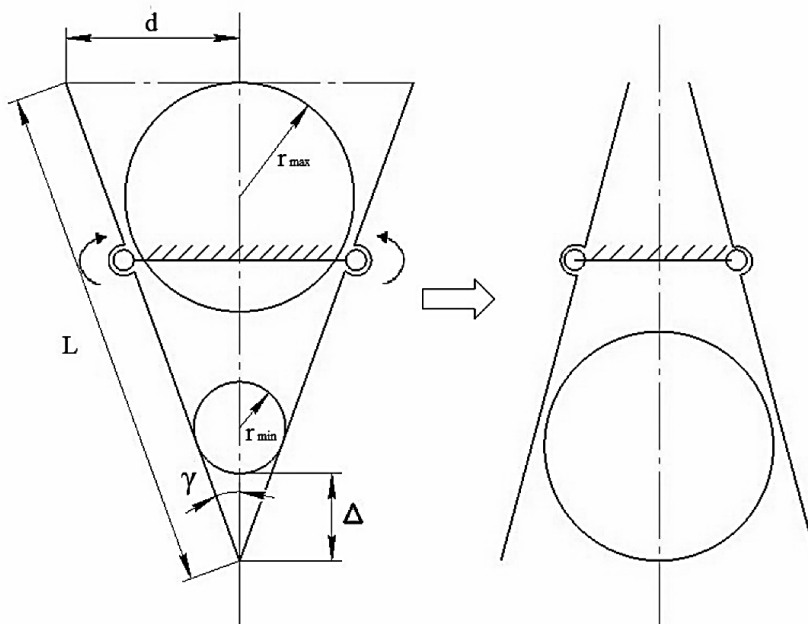


Рис. 4. Схема взаимодействия клубня картофеля с гасителем энергии падения /
Fig. 4. Scheme of interaction of potato tuber with fall energy absorber

Из геометрической зависимости, представленной на рисунке 4 определим: параметры угла вершины конуса γ гасителя энергии падения клубней, град; Δ – расстояние защемления клубня картофеля у основания конуса, м; d – расстояние от основания гасителя колебаний до центра клубня, м; L – длину образующей гасителя энергии падения клубней, м:

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{r_{\min}}{\Delta + r_{\min}}\right); \quad (8)$$

$$d = \frac{r_{\max}}{\operatorname{tg}[(90^\circ - \gamma)]/2}; \quad (9)$$

$$L = \frac{r_{\max} / \operatorname{tg}[(90^\circ - \gamma)]/2}{\sin \gamma}, \quad (10)$$

где $r_{\min}$ и $r_{\max}$ – минимальный и максимальный диаметры клубня картофеля, м.

Величину Δ определяли проведением имитационного эксперимента, т. е. если $\Delta = 50$ мм, то согласно уравнениям (8)–(10), получим $\gamma = 19^\circ$, $d = 59,5$ мм; $L = 183,5$ мм.

Рабочая поверхность гасителя колебаний выполнена из резинотехнического материала и представляет собой нелинейную упругую поверхность, имеющую возможность восстанавливаться после деформации [9].

Функция упругой потенциальной энергии, описывающая определяющее соотношение нелинейной упругой поверхности [10, 11], имеющей возможность восстанавливаться после деформации, дописывается моделью Муни-Ривлина в форме двух параметров [3]:

$$W = C_{01}(I_1 - 3) + C_{10}(I_2 - 3), \quad (11)$$

где I_i – i -й инвариант тензора деформации Грина; C_{ij} – параметры материала модели резинотехнического материала.

Уравнение гиперэластичного резинового материала можно выразить как тензор напряжений Кирхгофа второго рода S и тензор деформации Коши-Грина E [5]:

$$\begin{cases} S = \frac{\partial W}{\partial E}, \\ S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} = \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial E_{ij}} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial E_{ij}} + \frac{\partial W}{\partial I_3} \frac{\partial I_3}{\partial E_{ij}}. \end{cases} \quad (12)$$

Согласно выражениям (11) и (12) и в сочетании с соответствующей нелинейной теорией сплошной среды, можно сделать вывод о том, что функциональная связь между инженерным напряжением и инженерной деформацией при одноосном растяжении определяется выражением [5]:

$$\nu = 2[(1 + \varepsilon) - (1 + \varepsilon)^{-2}][C_{01} + (1 + \varepsilon)^{-1}C_{10}], \quad (13)$$

где ε – степень деформации материала гасителя энергии падения.

Вышепредставленное уравнение описывает конститутивную модель каучука Муни-Ривлина. Параметры этой модели можно определить при сопоставлении данных испытаний резинового материала на одноосное растяжение с использованием уравнения (13).

При проектировании роботизированного буртоукладчика для загрузки овощных культур и картофеля плотность материала рабочей поверхности полотна транспортера, изготовленного из силиконового каучука, составляет $1,4 \text{ г см}^3$, а параметры модели, определенные по данным испытаний силиконового каучука на одноосное растяжение, составляют:

$$C_{01} = -42,08, \quad C_{10} = 56,97 \text{ МПа}. \quad (14)$$

Для облегчения решения моделирования взаимодействия клубня картофеля с устройством гашения энергии падения клубней модель данного взаимодействия была упрощена – опорный стержень удален, оставлены только сетка и рама (рис. 5).

Для рабочего состояния взаимодействия клубня картофеля с гасителем энергии падения, представленного на рисунке 6, максимальное контактное напряжение во время процесса падения клубня составляет $0,107 \text{ МПа}$, а смещение при падении – 33 мм .

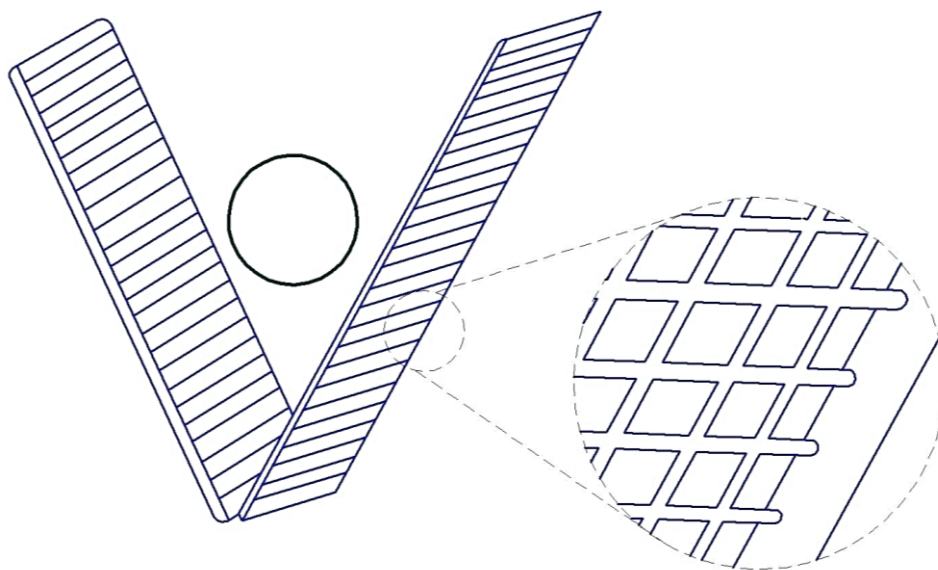


Рис. 5. Моделирование взаимодействия клубня картофеля с гасителем энергии падения /
Fig. 5. Modeling the interaction of potato tuber with a fall energy absorber

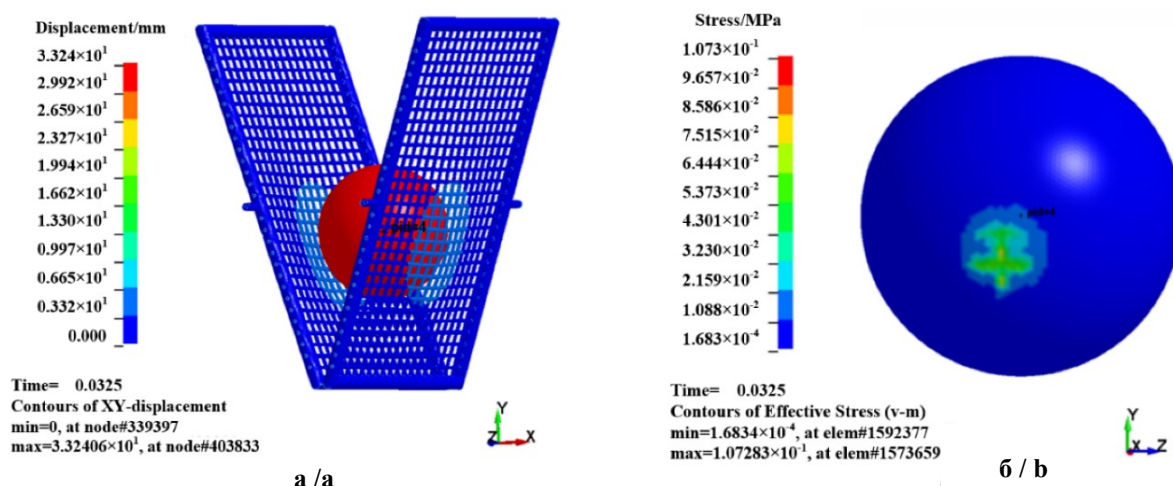


Рис. 6. Результаты моделирования взаимодействия клубня картофеля с гасителем энергии падения: а – смещение клубня картофеля; б – максимальная нагрузка на клубень картофеля /

Fig. 6. Results of modeling the interaction of a potato tuber with a fall energy absorber: a – displacement of the potato tuber; b – maximum load on the potato tuber

Поскольку пиковое контактное напряжение было меньше напряжения повреждения ткани кожуры клубня картофеля на 0,122 МПа, поэтому кожура клубня картофеля не может быть повреждена, т. к. конструкция гасителя энергии падения клубня способствует снижению повреждений.

Когда клубень картофеля при моделировании переместили на расстояние 42 мм от нижней границы, скорость снизилась до 0, и он больше не двигался в отрицательном направлении оси у.

Клубень картофеля не столкнулся с нижней границей, что указывает на то, что запас Δ для предотвращения столкновений 50 мм в формулах (8)-(10) соответствует ограничениям, что обеспечивает основу для расчета размерного параметра механизма гасителя энергии падения.

Данные результаты исследований позволили разработать цифровую систему автоматизированного движения роботизированного буртоукладчика, состоящего из основных аппаратно-программных средств: микроконтроллера 1 ArduinoUNO, блока управления 2; системы технического зрения, состоящей из камеры OrbbecAstraProPlus 3, размещенной на фокусном расстоянии 4, одноплатного компьютера 5 NvidiaJetson, обеспечивающего обработку изображения и генерацию управляющих сигналов для драйверов 6 электропривода ведущих колес и системы лазерных светодиодов (рис. 7).

Для обеспечения автоматизированного движения роботизированного буртоукладчика разработан программный код расчета.

С использованием программно-аппаратных средств цифровой системы автоматизированного движения роботизированного буртоукладчика для закладки на хранение картофеля и овощных культур проведены эксперименты по проверке алгоритмов движения машины в лабораторных условиях ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

Для регистрации основных параметров использовали лабораторно-измерительный комплекс, состоящий из блока снятия регистрационных параметров и персонального компьютера [12, 13].

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволили разработать роботизированный буртоукладчик для закладки на хранение картофеля и овощных культур с цифровой системой автоматизированного движения, представленный на рисунке 8.

Для проверки разработанных алгоритмов функционирования цифровой системы автоматизированного движения роботизированного комплекса машин для закладки на хранение картофеля и овощных культур необходимо проведение экспериментальных исследований в производственных условиях выполнения технологического процесса движения по хранилищу с определением основных показателей оценки качества и работоспособности машины [14, 15].

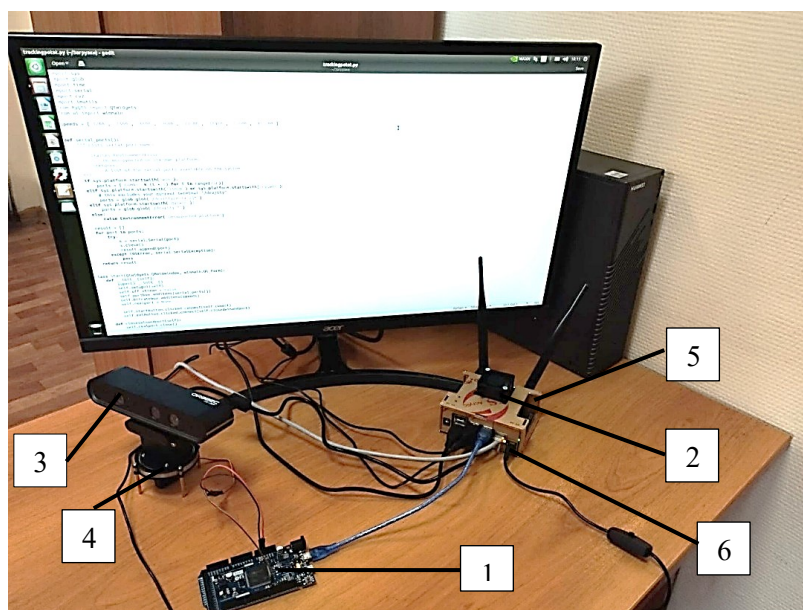


Рис. 7. Программно-аппаратные средства цифровой системы автоматизированного движения роботизированного буртоукладчика: 1 – микроконтроллер ArduinoUNO; 2 – блок управления; 3 – видеочка; 4 – фокус расстояния; 5 – одноплатный компьютер; 6 – драйвер электропривода ведущих колес и системы лазерных светодиодов /

Fig. 7. Hardware and software for a digital system of automated movement of a robotic complex of machines for storage: 1 – microcontroller Arduino UNO; 2 – control unit; 3 – video camera; 4 – distance focus; 5 – single board computer; 6 – driver for electric drive of driving wheels and laser LED system

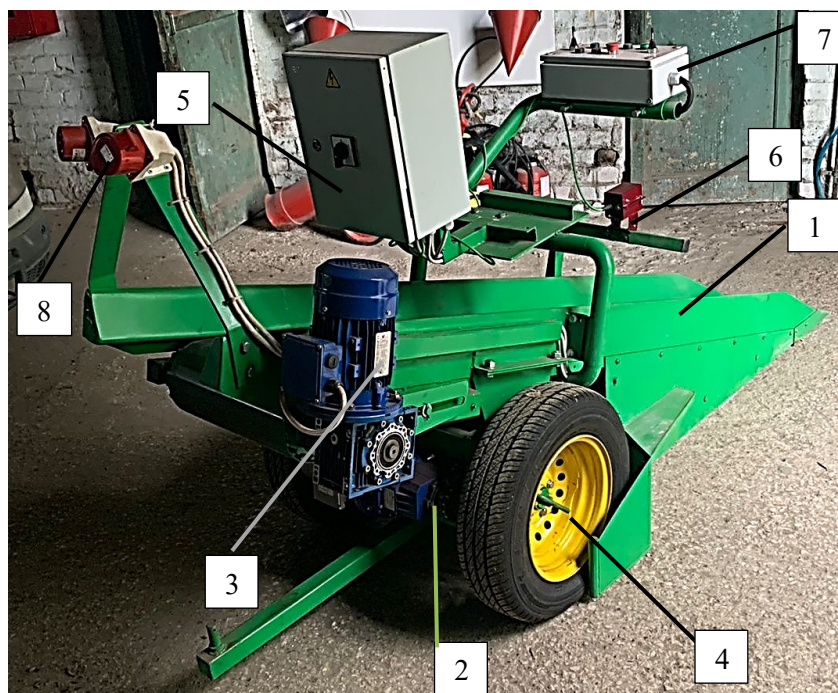


Рис. 8. Общий вид роботизированного буртоукладчика: 1 – транспортер; 2 – конический редуктор привода ротора; 3 – электродвигатель с червячным редуктором; 4 – движитель колесный; 5 – шкаф управления; 6 – система технического зрения; 7 – пульт управления; 8 – система питания /

Fig. 8. General view of the robotic complex of machines for storage: 1 – conveyor; 2 – bevel gear box of the rotor drive; 3 – electric motor with worm gear; 4 – wheel propeller; 5 – control cabinet; 6 – technical vision system; 7 – control panel; 8 – power system

На рисунке 9 представлены результаты экспериментальных исследований роботизированного комплекса машин для закладки на хранение картофеля и овощных культур при

определении точности (Т), достоверности (Р), полноты (П) и оценки (F1) модели обнаружения буртовой поверхности клубней картофеля в хранилище.

Модель показывает уровень достоверности $P = 98,2\%$, точности $T = 93,9\%$, полноты $\Pi = 94,8\%$ и оценки $F1 = 96,5\%$.

$$T = \frac{(I_{\Pi} + I_{OT})}{(I_{\Pi} + I_{OT} + \Phi_{\Pi} + \Phi_{OT})}, \quad (15)$$

где I_{Π} , I_{OT} – истинные положительные и отрицательные значения, %;

Φ_{Π} , Φ_{OT} – ложные положительные и отрицательные значения, %.

$$P = \frac{I_{\Pi}}{I_{OT}} + \Phi_{\Pi}. \quad (16)$$

$$\Pi = \frac{I_{\Pi}}{I_{OT}} + \Phi_{OT}. \quad (17)$$

$$F1 = \frac{2 \times P \times \Pi}{P} + \Pi. \quad (18)$$

На рисунке 10 представлен график потерь модели CNN для заданного выбранного номера эпохи 100.

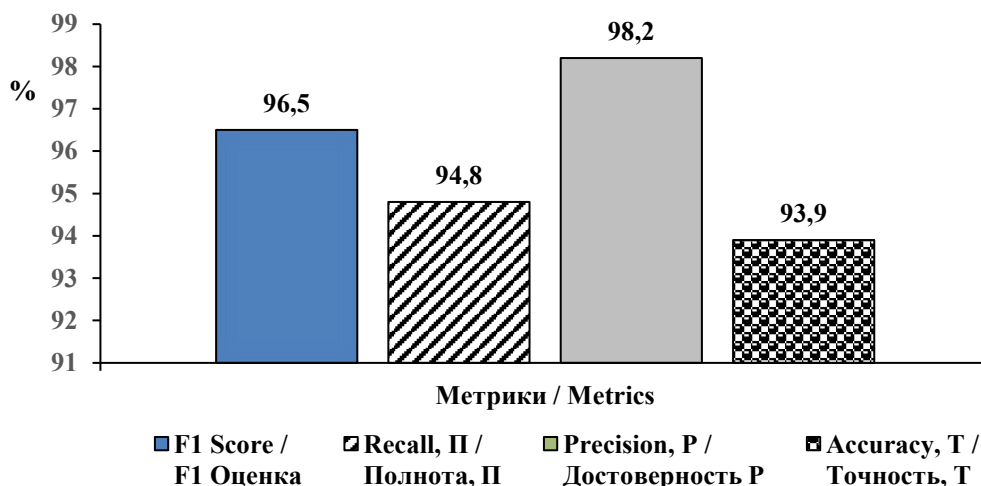


Рис. 9. Результаты оценки обнаружения клубней картофеля в хранилище для развернутой модели искусственной нейронной сети /

Fig. 9. Potato tuber detection evaluation results in storage for the deployed artificial neural network model

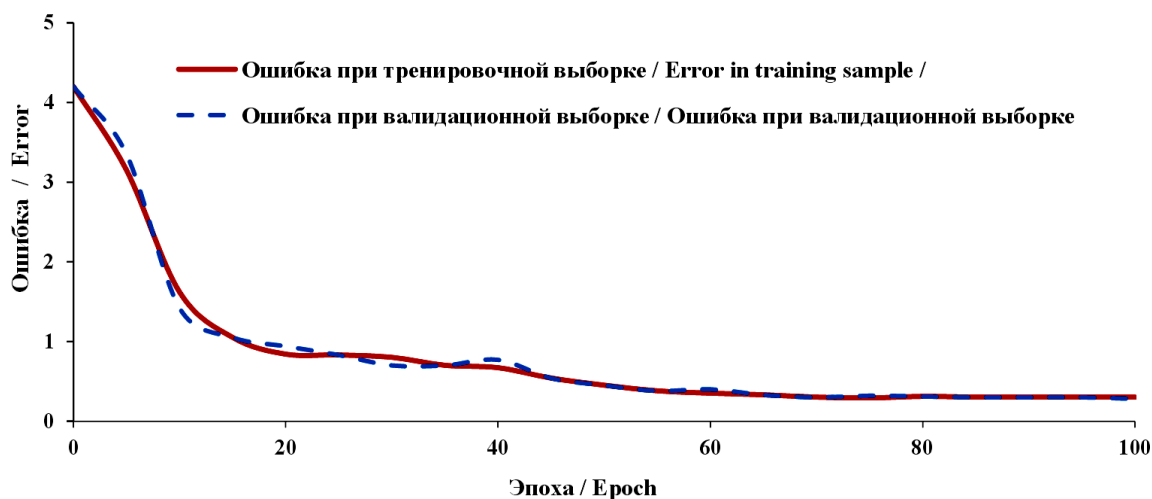


Рис. 10. График зависимости потерь модели CNN для обучающих и тестовых данных от номера эпохи /

Fig. 10. The diagram of dependence of model loss versus epoch number for CNN model on training and test data

На рисунке 11 даны графические зависимости обнаружения клубней картофеля в хранилище, точность заглабления, точность построения траектории движения машины. Кроме того, на рисунке 11 представлено сравнение обнаружения клубней картофеля при разном освещении.

Улучшенная модель CNN, обученная на специально подобранном наборе данных, продемонстрировала существенное улучшение точности обнаружения клубней картофеля в хранилище в динамических условиях. Результаты проведенных экспериментальных исследований подтвердили адаптивность полу-

ченной модели распознавания, улучшив общую точность модели до 93,9 %, а точность распознавания – до 98,2 %.

Синергетическое использование оптимизированного алгоритма планирования траектории машины значительно способствует

повышению общей эффективности процесса роботизированной загрузки картофеля в хранилище за счет снижения времени обнаружения клубней картофеля в хранилище в цикле всей операции по закладке на хранение со средним временем 7,2 с.

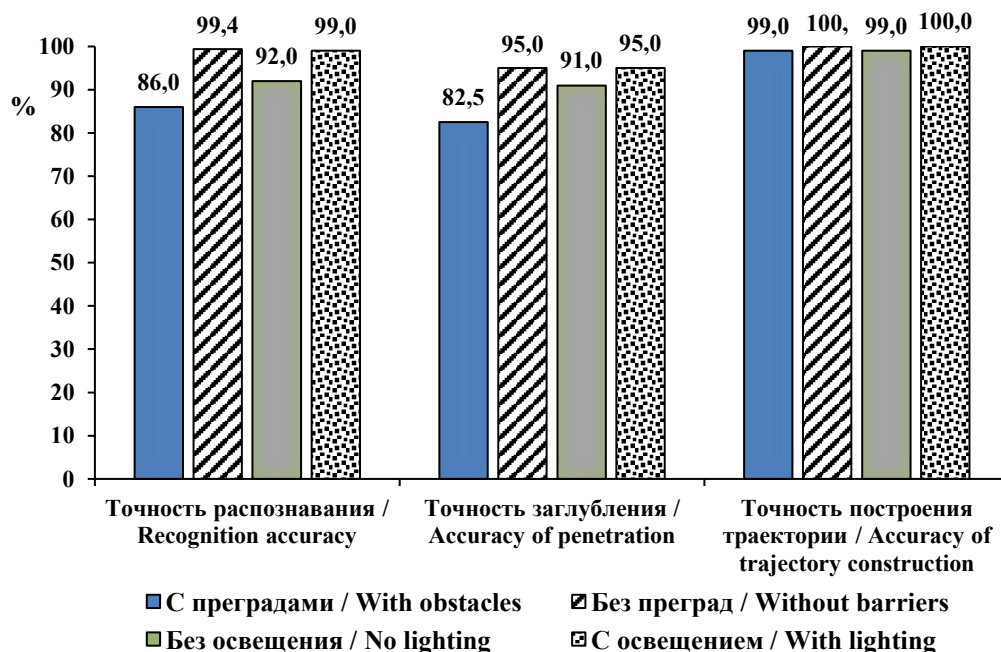


Рис. 11. Показатели эффективности обнаружения клубней картофеля в хранилище с наличием преград и разным освещением /

Fig. 11. Indicators of the efficiency of detection of potato tubers in storage with the presence of obstacles and different lighting

Выводы. Выполнено теоретическое моделирование автоматизированной загрузки картофеля и овощных культур, включающее взаимодействие клубня картофеля с гасителем энергии падения. Результаты моделирования при взаимодействии клубня картофеля с поверхностью транспортной ленты после подачи лопастным питателем свидетельствуют о пиковом контактом напряжении клубня картофеля, составляющим 0,122 МПа, что является очень близким значением предела текучести клубня картофеля, т. е. происходит его повреждение. Максимальное контактное напряжение клубней картофеля, при котором не происходит его повреждение, является значение не более 0,11 МПа.

Для рабочего состояния взаимодействия клубня картофеля с гасителем энергии падения, максимальное контактное напряжение во время процесса падения клубня составляет 0,107 МПа, а смещение при падении – 33 мм. Определено, что пиковое контактное напряжение было меньше напряжения повреждения ткани кожуры клубня картофеля на 0,122 МПа, кожура клубня картофеля не может быть повреждена, и

конструкция гасителя энергии падения клубня способствует снижению повреждений. Данные результаты исследований позволили разработать роботизированный буртоукладчик с цифровой системой автоматизированного движения закладки картофеля на хранение.

Для проверки разработанных алгоритмов функционирования цифровой системы автоматизированного движения роботизированного комплекса машин для закладки на хранение картофеля и овощных культур проведены экспериментальные исследования по выполнению технологического процесса движения по хранилищу с нахождением основных показателей оценки качества и работоспособности машины.

Определены результаты оценки обнаружения клубней картофеля в хранилище для обратной модели искусственной нейронной сети при уровне достоверности точности распознавания 98,2 %, уровне полноты оценки распознавания 94,8 %, а также зависимости обнаружения клубней картофеля в хранилище при точности заглабления, точности построения траектории движения машины при естествен-

ном и искусственном освещении. Результаты проведенных экспериментальных исследований подтвердили адаптивность полученной модели

распознавания, улучшив общую точность модели до 93,9 %, а достоверность оценки распознавания до 98,2 %.

Список литературы

1. Erokhin M. N., Dorokhov A. S., Sibirev A. V., Aksenov A. G., Mosyakov M. A., Sazonov N. V., Godyaeva M. M. Development and Modeling of an Onion Harvester with an Automated Separation System. *AgriEngineering*. 2022;4(2):380–399. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering4020026>
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/viewFile/67/23> EDN: TTLVUJ
3. Guo H., Lu H., Gao G., Wu t., Chen H., Qiu Z. Design and Test of a Levelling System for a Mobile Safflower Picking Platform. *Applied Sciences*. 2023;13(7):4465. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13074465>
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
5. Краснощеков Н. В. Агроинженерная стратегия: от механизации сельского хозяйства к его интеллектуализации. *Тракторы и сельхозмашины*. 2010;(8):5–8. Режим доступа: https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/68902/ru_RU#
6. Дорохов А. С., Аksenov A. G., Сибирев А. В., Мосяков М. А. Аналитические исследования машинно-технологических комплексов для сорто-фиточистки посадок картофеля и овощных культур в селекции и семеноводстве. *Аграрный научный журнал*. 2022;(4):76–82. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i4pp76-82> EDN: DHXNNI
7. Jahanbakhshi A. Determine some engineering properties of snake melon (*cucumis melo* var. *flexuosus*). *Agricultural Engineering International: The CIGR Journal*. 2018;(20):171–176. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Determine-some-engineering-properties-of-snake-melo-Jahanbakhshi/86e61051046dbacb1057bffe56f90a49f97ef5c>
8. Lehnert C., McCool Ch., Sa I., Perez T. Performance improvements of a sweet pepper harvesting robot in protected cropping environments. *Journal of Field Robotics*. 2020;37(7):1197–1223. DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.21973>
9. Qin Z., Xiaoliang Y. U. E., Bin L. I., Xianping J., Zheng X., Can X. U. Motion planning of picking manipulator based CTB_RRT algorithm. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2021;52(10):129–136. URL: <https://www.nyjxb.net/index.php/journal/article/view/1252>
10. Klose R., Penlington J., Ruckelshausen A. Usability study of 3D time-of-flight cameras for automatic plant phenotyping. *Bornimer Agrartechnische Berichte*. 2009;69:93–105. URL: https://www.researchgate.net/publication/285737807_Usability_study_of_3D_Time-of-Flight_cameras_for_automatic_plant_phenotyping
11. Li J. 3D Machine Vision System for Robotic Weeding and Plant Phenotyping. Ph.D. Thesis, Iowa State University, Ames, IA, USA. 2014. URL: <https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/032b1abf-6350-45d9-8402-ed11da2c4bd5>
12. 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: MAJKHM
13. 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: KIGZDF
14. Казаков С. С., Живаев О. В., Никулин А. В. Конструкционные пути снижения повреждаемости клубней посадочного картофеля при работе цепочно-ложечного высаживающего аппарата. *Тракторы и сельхозмашины*. 2019;(3):29–34. DOI: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-3-29-34> EDN: ARTNCV
15. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021;15(4):6–10. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10> EDN: YFRZDV

References

1. Erokhin M. N., Dorokhov A. S., Sibirev A. V., Aksenov A. G., Mosyakov M. A., Sazonov N. V., Godyaeva M. M. Development and Modeling of an Onion Harvester with an Automated Separation System. *AgriEngineering*. 2022;4(2):380–399. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering4020026>
2. Izmaylov A. Yu., Kolchin N. N., Lobachevskiy Ya. P., Kynev N. G. Modern technologies and special equipment for potato production. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2015;(3):43–47. (In Russ.). URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/viewFile/67/23>
3. Guo H., Lu H., Gao G., Wu t., Chen H., Qiu Z. Design and Test of a Levelling System for a Mobile Safflower Picking Platform. *Applied Sciences*. 2023;13(7):4465. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13074465>
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. Krasnoshechekov N. V. Agroengineering strategy: from mechanization of agriculture to its intellectualization. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2010;(8):5–8. (In Russ.). URL: https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/68902/ru_RU#
6. Dorokhov A. S., Aksenov A. G., Sibirev A. V., Mosyakov M. A. Analytical studies of machine-technological complexes for variety-phytocleaning of potato and vegetable crops in breeding and seed production. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2022;(4):76–82. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i4pp76-82>
7. Jahanbakhshi A. Determine some engineering properties of snake melon (*cucumis melo* var. *flexuosus*). *Agricultural Engineering International: The CIGR Journal*. 2018;(20):171–176. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Determine-some-engineering-properties-of-snake-melo-Jahanbakhshi/86e61051046dbacb1057bffe56f90a49f97ef5c>

8. Lehnert C., McCool Ch., Sa I., Perez T. Performance improvements of a sweet pepper harvesting robot in protected cropping environments. *Journal of Field Robotics*. 2020;37(7):1197–1223. DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.21973>
9. Qin Z., Xiaoliang Y. U. E., Bin L. I., Xianping J., Zheng X., Can X. U. Motion planning of picking manipulator based CTB_RRT algorithm. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2021;52(10):129–136. URL: <https://www.nyjxxb.net/index.php/journal/article/view/1252>
10. Klose R., Penlington J., Ruckelshausen A. Usability study of 3D time-of-flight cameras for automatic plant phenotyping. *Bornimer Agrartechnische Berichte*. 2009;69:93–105. URL: https://www.researchgate.net/publication/285737807_Usability_study_of_3D_Time-of-Flight_cameras_for_automatic_plant_phenotyping
11. Li J. 3D Machine Vision System for Robotic Weeding and Plant Phenotyping. Ph.D. Thesis, Iowa State University, Ames, IA, USA. 2014. URL: <https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/032b1abf-6350-45d9-8402-ed11da2c4bd5>
12. 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>
13. 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 oborudovanie 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>
14. Kazakov S. S., Zhivaev O. V., Nikulin A. V. Structural ways to reduce the damage of planting potatoes bulbs when using a chain-spoon planting machine. *Traktory i sel'khozmashiny*. 2019;(3):29–34. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-3-29-34>
15. Lobachevskiy Ya. P., Dorokhov A. S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):6–10. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>

Сведения об авторах

Дорохов Алексей Семенович, доктор техн. наук, академик РАН, зам. директора по научно-организационной работе, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

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

Мосяков Максим Александрович, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-7312>

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

Грищенко Александр Васильевич, магистрант, инженер отдела технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3959-3047>

Information about the authors

Aleksey S. Dorokhov, DSc in Engineering, academician of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Scientific and Organizational Work, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

✉ **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, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>, e-mail: sibirev2011@yandex.ru

Maksim A. Mosyakov, PhD in Engineering, senior researcher, the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-7312>

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

Alexander V. Grishchenko, master's student, engineer, the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3959-3047>

✉ – Для контактов / Corresponding author