

ОБОСНОВАНИЕ РАБОЧИХ ОРГАНОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ЗАКЛАДКИ НА ХРАНЕНИЕ КАРТОФЕЛЯ

© 2026 Дорохов А. С., Сибирёв А. В. ✉, Тетерин В. С., Мосяков М. А.

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
(г. Москва, Российская Федерация)
✉ sibirev2011@yandex.ru

Реферат. Закладка картофеля на хранение является критически важной и трудоемкой операцией, эффективность которой определяется конструкцией применяемых машин от качественного функционирования которых зависит минимизация повреждений клубней. Таким образом, актуальной проблемой является обоснование конструкции рабочих органов, способных минимизировать динамические нагрузки на продукцию и обеспечить равномерное распределение продукции. Целью исследования является определение закономерностей для обоснования функционирующих элементов автоматизированной машины для закладки картофеля на хранение. Проведение исследований выполнялось в условиях ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в 2024-2025 годы при использовании программ «SolidWorks», «Excel». Методы исследования базировались на комплексном теоретическом подходе, объединяющем математическую статистику, теорию случайных процессов для описания стохастического характера изменения плотности клубненосного вороха. Процесс транспортировки материала моделировался системой дифференциальных уравнений, преобразованных в операторную форму для анализа динамических свойств питателя как нелинейного звена с распределенной подачей. Проведен сравнительный анализ трех геометрических форм рабочей поверхности питателя на скорость подъема клубня: спирали Архимеда, логарифмической и гиперболической спиралей. Варьирование скоростей между типами исследуемых поверхностей в диапазоне углов $\pi/8$ – $3\pi/8$ находится в пределах 1–5%. Выявлено, что при увеличении угла поворота до $\pi/2$ только поверхность, выполненная по спирали Архимеда, обеспечивает линейный рост скорости подъема до максимального значения 1,6 м/с, в то время как логарифмическая и гиперболическая спирали дают прирост лишь до 1,0 м/с или снижение скорости. Полученные закономерности создают научно-техническую основу для проектирования автоматизированных машин для загрузки картофеля в хранилища, адаптированных для работы в условиях крестьянско-фермерских хозяйств с ограниченными площадями. Применение питателя, рабочая поверхность которого выполнена по спирали Архимеда, позволит повысить производительность за счет увеличения скорости подачи продукции, снизить ее травмирование и обеспечить более равномерное формирование насыпи.

Ключевые слова: хранение, автоматизация, картофель, теоретические исследования, обоснование параметров.

Для цитирования: Обоснование рабочих органов автоматизированной машины для закладки на хранение картофеля / А.С. Дорохов, А.В. Сибирёв, В.С. Тетерин, М.А. Мосяков // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 57-68. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-57-68

JUSTIFICATION OF THE OPERATING UNITS OF AUTOMATED MACHINE FOR STORED POTATOES

© 2026 Dorokhov A.S., Sibirev A.V. ✉, Teterin V.S., Mosyakov M.A.

Federal Scientific Agroengineering Center VIM
(Moscow, Russian Federation)
✉ sibirev2011@yandex.ru

Abstract. Potato storage is a critical and labor-intensive operation, the effectiveness of which is determined by the design of machines used, as their proper functioning minimizes damage to the tubers. Therefore, a pressing issue is the justification of operating units design capable of minimizing dynamic loads on the product and ensuring uniform distribution. The aim of this study is to identify patterns for justifying the operating elements of an automated machine for stored potatoes. The research was conducted at Federal Scientific Center for VIM in 2024-2025 using SolidWorks and Excel. Research methods were based on a comprehensive theoretical approach combining mathematical statistics and the theory of random processes to describe the stochastic nature of changes in tuber heap density. The material transport process was modeled using a system of differential equations transformed into operator form to analyze the dynamic properties of the feeder as a nonlinear element with distributed delivery. A comparative analysis of three geometric shapes of the feeder working surface for their effect on tuber lifting speed was conducted: an Archimedes spiral, a logarithmic spiral and a hyperbolic spiral. The speed

variation between studied surface types in the angle range of $\pi/8$ – $3\pi/8$ is within 1–5%. It was found that with an increase in the rotation angle to $\pi/2$, only the surface constructed according to Archimedes spiral ensures a linear increase in lifting speed to a maximum value of 1.6 m/s, while the logarithmic and hyperbolic spirals provide an increase of only up to 1.0 m/s or a decrease in speed. The obtained patterns provide a scientific and technical basis for the design of automated potato loading machines for storage facilities, adapted for use on small farms with limited space. Using a feeder with a working surface designed according to an Archimedes spiral will improve productivity by increasing the feed rate, reducing damage to the product and ensuring a more uniform mound formation.

Key words: storage, automation, potatoes, theoretical research, parameter justification.

For citation: Dorokhov AS, Sibirev AV, Teterin VS, Mosyakov MA. [Justification of the operating units of automated machine for stored potatoes]. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2026; Vol. 21. 1(81). 57–68 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-57-68

Введение. Технологический суверенитет Российской Федерации невозможно обеспечить без формирования условий качественно-го производства продукции растениеводства, что, в свою очередь, невозможно выполнить без надлежащей работы отечественной селекции при выведении новых сортов и гибридов семян [1, 2, 3]. Кроме того, обеспечение независимости продовольственной системы страны невозможно при высокой доле импорта машин и семенного материала, что ограничивает повышение объемов производства сельскохозяйственной продукции. Немаловажную роль играет технологическая модернизация, которая заключается в механизации и автоматизации наиболее трудоемких операций и постоянном повышении уровня технической оснащенности агропредприятий [4, 5, 6]. Одним из таких трудоемких и критически важных процессов, требующих механизации и повышения эффективности, является послеуборочное хранение полученного урожая картофеля [7, 8].

Наиболее важным этапом является операция закладки клубней в хранилище. Разнообразие различных типов погрузочных машин, ставит проблему выявления наиболее перспективных средств, способных эффективно работать в условиях крестьянско-фермерских хозяйств и небольших площадей хранилищ с использованием их полезной площади.

Для выполнения погрузочных операций при закладке продукции на хранение широкое распространение получили специализированные транспортеры-подборщики, такие как «Крот» производства ООО «Агротехмаш», ООО «Клиномаш», ООО «Колнаг и зарубежные аналоги от «Grimme», «Miedema». Данные машины оснащены телескопическими транспортерами, системой гасителей падения и гидравлическим приводом, направленными на снижение травмирования клубней и автоматизации процесса загрузки хранилищ. Однако, как показывает практика, всем указанным моделям присущи общие недостатки: недостаточная производительность при работе с засоренным ворохом, высокая материалоемкость и энергоемкость конструкции. Кроме того, погрузчики периодического действия не находят применения из-за высокой травмируемости продукции, что подтверждает необходимость совершенствования рабочих органов именно машин непрерывного действия.

При загрузке хранилища важно следить за перемещением стрелы погрузчика в горизонтальной плоскости [5, 9], во избежание образования в насыпи овощных культур почвенных столбов, из-за чего клубень начинает гнить или прорасти. Эффективным решением данной задачи является применение цифровых систем автоматического контроля и управления, в частности, технологий машинного зрения, позволяющих в реальном времени отслеживать границы насыпи и формировать ее террасным способом для оптимального использования площади хранилища [9, 10]. В свою очередь, эффективность работы таких интеллектуальных систем напрямую зависит от стабильности технологического процесса, которая во многом определяется конструкцией рабочих органов.

При автоматизированной закладке на хранение картофеля с использованием оборудования с активным питателем возникает сложная динамическая проблема. Функционирующие элементы электропривода, обеспечивающие плавную регулировку подачи, подвергаются резкопеременным случайным нагрузкам. Эти нагрузки носят характер случайных ударных воздействий, обусловленных самим процессом работы: внедрением рабочего органа питателя в неоднородную поверхность бурта картофеля [11, 12, 13]. Соппротивление бурта не постоянно, в результате чего питатель последовательно встречает области с разной плотностью, коэффициентами трения-скольжения, фрикционными свойствами, а также отдельные крупные клубни. Подобные явления приводят к тому, что циклические ударные нагрузки вызывают ускоренный механический износ функциональных элементов конструкции автоматизированной машины для закладки на хранение, таких как редукторы, подшипники и соединительные муфты, одновременно заставляя электропривод работать в режиме частых перегрузок. Это ведет к перегреву, снижению ресурса оборудования и риску аварийной остановки. Случайные ударные воздействия и связанные с ними вибрации, передаваясь на конструкцию машины, повышают травмирование клубней, создавая очаги для развития заболеваний и увеличивая потери картофеля при хранении. Классические системы управления оказываются неэффективными в таких условиях, поскольку рассчитаны на плавные изменения нагрузки. Они не могут быстро

компенсировать резкие удары, что и приводит к описанным проблемам с точностью работы, износом оборудования и травмированию клубней.

Следовательно, для повышения равномерности распределения клубней картофеля по объёму хранилища и снижения негативного влияния резкопеременных нагрузок, необходимо обеспечить разработку автоматизированной машины для закладки картофеля на хранение, функционирующие элементы которой, и в первую очередь рабочие органы питателя, спроектированы с учетом закономерностей взаимодействия с неоднородной средой. Такой подход позволит не только формировать требуемый контур насыпи, но и минимизировать динамические нагрузки, предотвращая ускоренный износ оборудования и травмирование продукции. В связи с этим целью исследования является определение закономерностей для обоснования функционирующих элементов автоматизированной машины для закладки картофеля на хранение.

Условия, материалы и методы. Проведение исследований выполнялось в условиях отдела «Технологии и машины для овощеводства» ФГБНУ ФНАЦ ВИМ при использовании программ «SolidWorks», «Excel» использование которых позволило обеспечить разработку конструктивных схем рабочих элементов автоматизированной машины для закладки на хранение картофеля, выполнить определение сил, действующих на клубень картофеля в процессе движения по поверхности подпорного питателя при варьировании параметров движения в зависимости от угла трения продукции о материал подпорного питателя и радиуса вектора, определяющего положение клубня картофеля на подпорном питателе. Объектом проведения исследований является автоматизированная машина для закладки на хранение картофеля и технологический процесс ее работы, с определением ее конструктивных, технологических и режимных параметров, характеризующих предмет исследований. При проведении исследований использовались методы системного анализа и синтеза, математической статистики, численные методы решения аналитических зависимостей для получения определения закономерностей для обоснования функционирующих элементов автоматизированной машины для закладки картофеля на хранение. Движение автоматизированной машины для закладки на хранение картофеля основано на теории динамики многих тел, а взаимодействие питателя загрузки с насыпным ворохом картофеля основано на теории динамики и теории дискретных элементов. Метод дискретных элементов часто используется для изучения взаимосвязи между почвой, сельскохозяйственными культурами и другими многочастичными средами и действующими компонентами. Частицы почвы представлены сферами радиусом 5 мм [14].

Данный метод позволяет наблюдать и анализировать смещение и напряжение частиц

после воздействия на них рабочих компонентов, а затем обеспечивать основу для оптимизации структуры и параметров рабочих компонентов.

Процесс исследования базировался на комплексном подходе, объединяющем теоретический и экспериментальный анализ. Ключевым объектом изучения выступила динамика взаимодействия рабочего органа с клубненосным ворохом, рассматриваемым как сыпучая среда со стохастически изменяющейся насыпной плотностью. Для описания ключевых технологических параметров использовался аппарат теории случайных процессов. Транспортировка вороха была смоделирована системой дифференциальных уравнений, преобразованных в операторную форму для получения передаточной функции и анализа динамических свойств системы как нелинейного звена. Для обоснования формы рабочей поверхности питателя использован метод Лагранжа, позволивший вывести дифференциальное уравнение движения клубня, моделируемого как материальная точка, с учётом всех активных сил и геометрии поверхности. На заключительном этапе производился сравнительный анализ трёх геометрических форм поверхности с использованием критерия оптимизации представленным максимальной скоростью подъёма клубня. Методика проведения теоретических исследований не предполагала наличие приборной базы для оценки показателей качества работы автоматизированной машины, оценки ее энергетических параметров.

Для создания эффективной цифровой системы управления автоматизированной машиной для закладки на хранение картофеля (рис. 1), необходимо смоделировать ключевой процесс распределения клубней. Основной задачей моделирования является определение влияния режимов работы питателя (сосредоточенного и распределенного) на формирование бурта. Полученные результаты в дальнейшем позволят разработать алгоритмы работы системы.

При выполнении моделирования подпорный питатель автоматизированной машины для закладки на хранение картофеля движется с поступательной скоростью движения для имитации процесса подачи клубней картофеля. Для моделирования сцепления между частицами почвы была выбрана модель Герца-Миндлина с противоскользкой моделью для моделирования контакта между частицами почвы [14] с фиксированным временным шагом операции моделирования при значении $7,5 \times 10^{-6}$ с.

В соответствии с известными характеристиками материала рабочей поверхности транспортерной ленты разрабатываемой автоматизированной машины и данными механических испытаний клубней картофеля установлены параметры материалов имитационной модели, значения которых представлены в таблице 1 [15, 16].

Таблица 1 – Физические параметры и контактные параметры имитационной модели рабочей поверхности выгрузного транспортера

Table 1 – Physical and contact parameters of the simulation model of the discharge conveyor's working surface

Параметр	Значение
Плотность клубней картофеля / (кг·м ³)	1090
Модуль упругости клубней картофеля / Па	6,6·10 ⁵
Коэффициент Пуассона клубней картофеля	0,37
Плотность силиконового каучука / (кг·м ³)	1400
Параметр C10 модели Муни-Ривлина для силиконовой резины, / Па	-423,8·10 ⁵
Параметр C01 модели Муни-Ривлина для силиконовой резины / Па	569,7·10 ⁵



Рис. 1 – Общий вид автоматизированной машины для закладки на хранение картофеля:

1 – подборщик автоматизированный; 2 – система транспортеров

Fig. 1 – General view of the automated machine for storing potatoes: 1 – automated pick-up device; 2 – conveyor system

Таблица 2 – Физические параметры и контактные параметры имитационной модели клубне-носного вороха (клубни картофеля и механические примеси)

Table 2 – Physical and contact parameters of the simulation model of the tuber-bearing heap (potato tubers and mechanical impurities)

Параметры	Грунт	Растительные примеси	Сталь
Плотность/(кг/м ³)	1850	243	7800
коэффициент Пуассона	0,38	0,4	0,31
Модуль сдвига/Па	1,0 × 10 ⁶	1,0 × 10 ⁶	7,0 × 10 ¹⁰
Коэффициент реституции (взаимодействие с клубнями)	0,2	0,5	0,28
Коэффициент статического трения (взаимодействие с грунтом)	0,4	0,3	0,5
Коэффициент трения качения (взаимодействие с клубнями)	0,25	0,05	0,04
Коэффициент реституции (взаимодействие с растительными примесями)	0,5	0,3	0,3
Коэффициент статического трения (взаимодействие с растительными примесями)	0,3	0,65	0,3
Коэффициент трения качения (взаимодействие с растительными примесями)	0,05	0,06	0,01
Коэффициент восстановления (взаимодействие со сталью)	0,28	0,3	-
Коэффициент статического трения (взаимодействие со сталью)	0,5	0,3	-
Коэффициент трения качения (взаимодействие со сталью)	0,04	0,01	-

В процессе моделирования использовались модели частиц почвы, картофеля и растительных остатков (ботва, корни) с физическими параметрами, представленными в таблице 2.

Для моделирования состояния насыпи клубне-носного вороха с растительными примесями в хранилище с учетом реальных размеров были созданы три длинные линейные модели общей длиной 39 мм, расположенные по оси X, которые состояли из 25 шариков с радиус 1,5 мм и межцентровое расстояние 1,5 мм. Центральные оси трех длинных линейных моделей параллельны друг другу, а центральные оси расположены последовательно с интервалом 1,5 мм вдоль направления оси Y, то есть окончательного размера модели строу-частицы (X- ось × ось Y × ось Z)

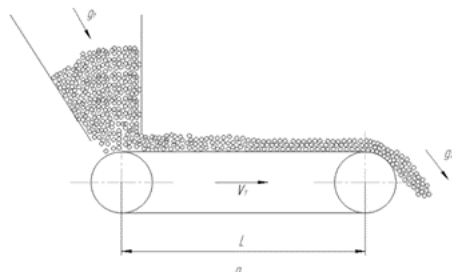
составляет 39 мм×6 мм×3 мм.

Изменение механического напряжения насыпной плотности $\rho_{нп}$ бурта картофеля, а также соответственно тягового сопротивления функционирующих элементов электропривода можно представить, как случайный процесс [14, 15, 16]. При этом, следует отметить, что переход насыпной плотности $\rho_{нп}$ из состояния $\rho_{1нп}$ в состояние $\rho_{2нп}$ (причем $\rho_{1нп} > \rho_{2нп}$) то для выполнения описания процесса закладки на хранение картофеля достаточно иметь информацию о одномерной плотности распределения вероятности $W_1(y_1, t_1)$ и двумерную условную плотность распределения вероятности перехода:

$$V_1(y_1, t_1 | y_{i-1}, t_{i-1}), \quad (1)$$

где i – значение текущего состояния процесса и времени.

Формирование требуемого контура загрузки хранилища картофеля определяется, в том числе способом подачи и равномерностью распределения клубней на транспортере загрузки.



Равномерность подачи клубненосного вороха при его сосредоточенной подаче в хранилище определяется функцией:

$$W_T = e^{-p\tau_T}, \quad (2)$$

где τ_T – время нахождения клубней картофеля на транспортере, с.

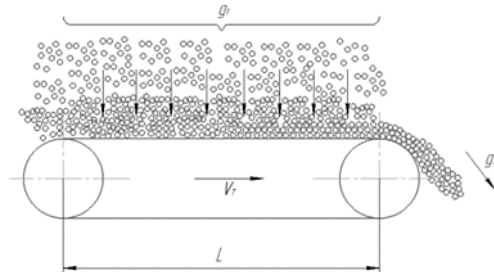


Рис. 2 – Равномерность распределения картофеля при закладке на хранение автоматизированной машиной: а – сосредоточенная подача; б – распределенная подача

Fig. 2 – Uniformity of potato distribution when stored using an automated machine: (a) concentrated feed; (b) distributed feed

Динамические свойства подпорного питателя 1 и выгрузного транспортера 2 (рис. 2) определяются функциональными зависимостями:

$$W_1 = e^{-p\tau_2}, W_2 = e^{-p\tau_3}, W_3 = e^{-p\tau_4}, \quad (3)$$

где τ_2 – время транспортирования клубненосного вороха по подпорному питателю автоматизированной машины, с;

τ_3 – время транспортирования клубненосного вороха от питателя до полотна автоматизированной машины, с;

τ_4 – время транспортирования клубненосного вороха от полотна до насыпной поверхности, с.

Примем допущение о том, что клубненосный ворох равномерно распределяется по всей поверхности транспортера при постоянной скорости переноса вороха $v_B = \text{const}$.

Удельная подача материала на единицу длины транспортера:

$$g = \frac{g_1}{L_T}, \quad (4)$$

где L_T – длина транспортера, м.

Предположим, что в результате стохастических процессов внешнего воздействия факторов, влияющих на качество закладки продукции в хранилище скачкообразно подача g_1 клубненосного вороха Δg .

Выше сказанное позволяет констатировать то, что перемещение клубненосного вороха на сходе с поверхности транспортера изменяется по линейной зависимости:

$$\partial g_2 = \Delta g / v_B dt \quad (5)$$

В то время как клубненосный ворох в течении времени τ_T достигнет схода:

$$\Delta g_2 = \Delta g v_B \int_0^{\tau_T} dt = \Delta g v_B \tau_T, \quad (6)$$

где τ_T – время транспортирования картофеля по транспортеру, с.

Скачкообразное изменение подачи показано на рисунке 3, в абсолютных величинах изменения расхода Δg_2 .

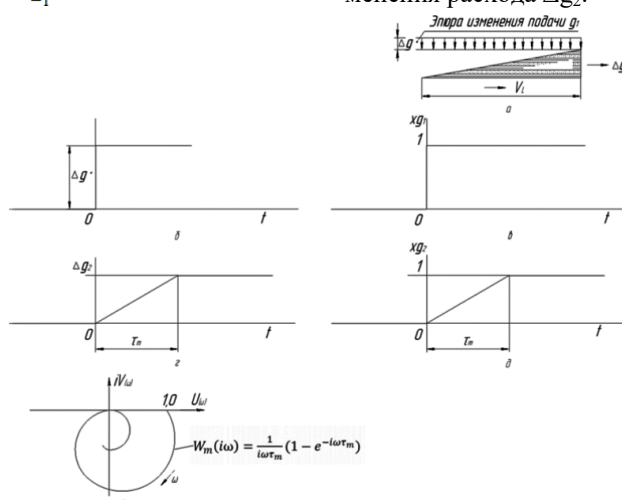


Рис. 3 – Динамика потоков вороха картофеля на транспортирующем устройстве с распределенной подачей материала

Fig. 3 – Dynamics of potato heap flows on a transporting device with distributed material feed

Исследуемый переходный процесс транспортирования клубненосного вороха автоматизированной машиной определяется системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{1}{v_B} \frac{\partial g_2}{\partial t} = \Delta g', \\ \Delta g_2 = \Delta g' v_B \tau_T. \end{cases} \quad (7)$$

Система уравнений (7) имеет решение

$$0 < t < \tau_T. \quad (8)$$

В операторной форме система уравнений (7) запишется в виде

$$X_{g_2} = \frac{1}{\tau_T p} (1 - e^{-p \tau_T}) X_{g_1} = W_T^p X_{g_1}. \quad (9)$$

Принимая во внимание выражение (9) имеем, что транспортер с распределенной подачей материала является динамически нелинейным звеном при абсолютно линейной статистической характеристике.

$$W_T^p = \frac{1}{p \tau_T} (1 - e^{-p \tau_T}). \quad (10)$$

Технологическая схема заборного элемента автоматизированной машины представлена на рисунке 4, представляющего собой подпорный элемент, обеспечивающий перемещение клубненосного вороха по своей поверхности и передачу на выгрузной транспортер автоматизированной машины (рис. 4).

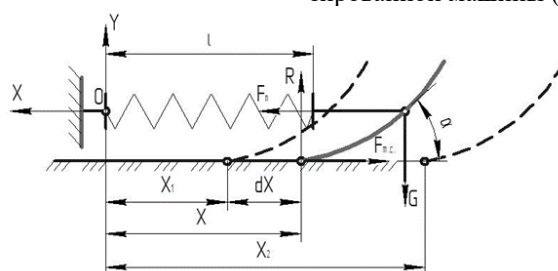


Рис. 4 – Схема к определению уравнения движения материальной точки по поверхности подпорного питателя

Fig. 4 – Diagram for determining the equation of motion of a material point on the surface of a retaining feeder

Необходимо уточнить, что в процессе перемещения забора клубней картофеля из бурта, лимитирующим параметром, определяющим качество подъема товарной продукции, является форма рабочей поверхности подпорного питателя [17].

Установлено, что в начальный момент

времени перемещение товарной поверхности по рабочей поверхности функционирующего элемента происходит по прямолинейной поверхности с соблюдением условия:

$$\gamma > \varphi, \quad (11)$$

где φ – угол трения почвы о материал подпорного питателя, град.

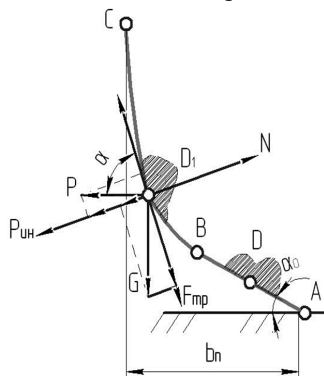


Рис. 5 – Силы, действующие на материальную точку по поверхности подпорного питателя
Fig. 5 – Forces acting on a material point on the surface of a retaining feeder

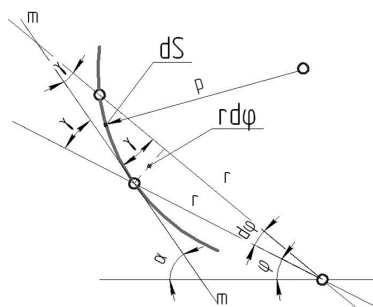


Рис. 6 – Схема для определения угла α
Fig. 6 – Diagram for determining angle α

Кроме того, повышение скорости подачи клубней картофеля на выгрузной транспортер автоматизированной машины для загрузки в хранилище зависит от формы поверхности рабочего органа для забора товарной продукции из бурта. Примем допущение и будем рассматривать клубень картофеля в виде материальной точки для определения уравнения ее движения [17]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad (12)$$

где i – число степеней свободы механической системы, $i = 1, 2, 3 \dots S$;

$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}$ – частные производные кинетической

энергии по обобщенным скоростям $\dot{q}_i$;

$\frac{\partial T}{\partial q_i}$ – частные производные кинетической энергии по обобщенным координатам q_i .

Для механической системы, обобщенная сила Q_i , соответствующая i -й обобщенной координаты равна [16]:

$$Q_i = \frac{\sum A_c}{\partial q_i}, \quad (13)$$

где $\sum A_c$ – сумма работ сил, действующих на материальную систему, Дж;

∂q_i – частная производная по обобщенной координате q_i .

Для определения обобщенной силы системы, вычислим сумму работ всех активных сил на возможных перемещениях точек системы.

В качестве обобщенной координаты выберем перемещение X подпорного питателя из начального X_1 в конечное X_2 положения.

К системе приложены активные силы: сила тяжести подпорного питателя – G , сила упругости насыпной поверхности корнеклубнеплодов – F_{Π} , нормальная реакция поверхности почвы – R .

В том случае, если не связи, наложенные на материальную систему являются идеальными, то к активным силам необходимо приложить еще силы реакции связи и силы трения, в нашем случае на систему действует сила трения скольжения почвы по поверхности подпорного питателя – $F_{T.C}$.

Искомая сумма работ сил имеет вид:

$$\sum A_c = A(G) + A(F_{\Pi}) + A(R) + A(F_{T.C}), \quad (14)$$

где $A(G)$ – работа силы тяжести, Дж; $A(F_{\Pi})$ – работа силы упругости пружины пружинно-упругого механизма, Дж; $A(R)$ – работы нормальной реакции поверхности почвы, Дж; $A(F_{T.C})$ – работа силы трения скольжения корнеклубнеплода по поверхности подпорного питателя, Дж.

Работа $A(G)$ силы тяжести G положительна, так как при движении подпорного питателя движется в направлении оси X :

$$A(G) = m_1 \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \delta X, \quad (15)$$

где m_1 – масса материальной точки, кг.

Рассмотрим силы, действующие на материальную частицу D , находящейся на поверхности подпорного питателя в произвольном положении. На корнеклубнеплод при подъеме из бурта действуют:

- G – вес корнеклубнеплода:

$$G = mg, \quad (16)$$

где m – масса корнеклубнеплода, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²;

P – сопротивление корнеклубнеплода подъему, Н; $P_{\text{ин}}$ – сила инерции, прижимающая корнеклубнеплод к поверхности подпорного питателя, Н;

N – нормальная реакция поверхности подпорного питателя, Н; $F_{\text{тр}}$ – сила трения корнеклубнеплода о поверхность подпорного питателя, Н.

Сила $P_{\text{ин}}$ инерции определяется:

$$P_{\text{ин}} = m \cdot \rho \cdot a_3^2 = \frac{m \cdot v^2}{\rho}. \quad (17)$$

Сила $F_{\text{тр}}$ трения корнеклубнеплода о рабочую поверхность подпорного питателя:

$$F_{\text{тр}} = f \cdot \left(G \cdot \cos \alpha + P \cdot \sin \alpha + \frac{m \cdot v^2}{\rho} \right). \quad (18)$$

Если кривую, описывающую форму подпорного питателя представить уравнением в полярных координатах $r = f(\varphi)$, то радиус кривизны поверхности рабочего органа:

$$\rho = \frac{[f^2(\varphi) + f'^2(\varphi)]^{3/2}}{[f^2(\varphi) + 2f^2(\varphi) - f(\varphi)f''(\varphi)]}. \quad (19)$$

Дифференциальное уравнение движения частицы корнеклубнеплода по поверхности рабочего органа имеет вид:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = P \cdot \cos \alpha - G \cdot \sin \alpha - f \cdot \left(G \cdot \cos \alpha + P \cdot \sin \alpha + \frac{m \cdot v^2}{\rho} \right), \quad (20)$$

Согласно рисунку 6 имеем, что:

$$\alpha = \varphi + \gamma. \quad (21)$$

Так как

$$\sin \gamma = \frac{rd\varphi}{ds}, \quad (22)$$

$$\cos \gamma = \frac{dr}{ds}, \quad (23)$$

Имеем:

$$\sin \alpha = \sin(\varphi + \gamma) = \sin \varphi \cdot \cos \gamma + \cos \varphi \cdot \sin \gamma = \frac{dr}{ds} \cdot \sin \varphi + \frac{rd\varphi}{ds} \cdot \cos \varphi, \quad (24)$$

$$\cos \alpha = \cos(\varphi + \gamma) = \cos \varphi \cdot \cos \gamma - \sin \varphi \cdot \sin \gamma = \frac{dr}{ds} \cdot \cos \varphi - \frac{rd\varphi}{ds} \cdot \sin \varphi. \quad (25)$$

Если пренебречь силой инерции $P_{\text{ин}}$:

$$P_{\text{ин}} = m \cdot \rho \cdot a_3^2 = \frac{m \cdot v^2}{\rho} = 0, \quad (26)$$

то уравнение (26) движения корнеклубнеплода по поверхности рабочего органа подпорного питателя запишется в виде:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = (P - f \cdot G) \cdot \cos \alpha - (G + f \cdot P) \cdot \sin \alpha. \quad (27)$$

Для решения уравнения (27) воспользуемся подстановкой:

$$A = (P - f \cdot G). \quad (28)$$

$$B = (G + f \cdot P). \quad (29)$$

С учетом выражений (28) и (29) выражение (30) примет вид:

$$m \cdot v \cdot dv = (A \cdot \cos \varphi - B \cdot \sin \varphi) \cdot dr - (A \cdot \sin \varphi - B \cdot \cos \varphi) \cdot r \cdot d\varphi. \quad (30)$$

Тогда

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = \int (A \cdot \cos \varphi - B \cdot \sin \varphi) \cdot a \cdot d\varphi - \int (A \cdot \sin \varphi + B \cdot \cos \varphi) \cdot a \cdot \varphi d\varphi. \quad (31)$$

Решая уравнение (31) при сравнении скорости движения клубня картофеля по рассматриваемым поверхностям заборного элемента определим рабочую поверхность, форма которой способствует повышению

скорости подъема, с учетом угла подъема формы поверхности:

$$a = \operatorname{ctg} \gamma_1 = \operatorname{ctg} 20^\circ = 2,74, \quad (32)$$

где γ_1 – угол между рабочей поверхностью подпорного питателя и касательной $m-m$ к рабочей поверхности, град.

Результаты и обсуждение. В результате выполненного моделирования процесса распределения клубней картофеля учитывающее динамические свойства транспортирующего устройства. Установлено, что коэффициент заполнения подпорного питателя машины для загрузки картофеля в хранилище является безразмерной величиной, равной отношению плотности фактически находящегося на рабочей поверхности биологических объектов с учетом пространства между клубнями к «идеальной» плотности сортированных клубней с размерами не менее 30-60 мм.

Таблица 3 – Результаты исследований по обоснованию конструкции рабочей поверхности подпорного питателя по наибольшей $v_{с.п.}$ скорости подъема клубня в зависимости от формы поверхности

Table 3 — Research results on justifying the design of the working surface of a retaining feeder based on the highest tuber lifting speed $v_{с.п.}$ depending on the surface shape

Скорость подъема клубня $v_{с.п.}$, м/с	Форма поверхности подпорного питателя			
	Спираль Архимеда			
	$r = a \cdot \varphi$			
	Угол поворота φ , град			
	$\frac{\pi}{8}$	$\frac{2\pi}{8}$	$\frac{3\pi}{8}$	$\frac{4\pi}{8}$
	0,61	0,63	0,65	1,57
Скорость подъема клубня $v_{с.п.}$, м/с	Логарифмическая спираль			
	$r = a \cdot e^\varphi$			
	Угол поворота φ , град			
	$\frac{\pi}{8}$	$\frac{2\pi}{8}$	$\frac{3\pi}{8}$	$\frac{4\pi}{8}$
	0,35	0,88	0,92	0,97
Скорость подъема клубня $v_{с.п.}$, м/с	Гиперболическая спираль			
	$r = a/\varphi$			
	Угол поворота φ , град			
	$\frac{\pi}{8}$	$\frac{2\pi}{8}$	$\frac{3\pi}{8}$	$\frac{4\pi}{8}$
	0,93	0,81	0,69	0,57

Данные, представленные в таблице 3 свидетельствуют о том, что поверхность, обладающей наибольшей скоростью подъема корнеклубнеплода является поверхность, выполненная по спирали Архимеда.

Анализ полученных результатов исследований, представленный в таблице 2 отображен в форме графической зависимости рисунка 7, свидетельствующий о перспективности проведения работ в направлении совершенствования функционирующего элемента автоматизированной машины, выполненной по форме спирали Архимеда, как рабочего органа с наибольшей скоростью подъема клубней картофеля.

Ось абсцисс представленного графика отображает изменения формы поверхности рабочего элемента – угол поворота образующей формы поверхности, по оси ординат указан исследуемый технологический параметр – скорость подъема клубня картофеля.

Анализ графической зависимости, представленной на рисунке 7 свидетельствует о том, что при увеличении угла поворота поверхности подпорного питателя в интервале до происходит повышение скорости подъема частиц от 0,4 до 1,0 м/с всех типов исследуемых поверхностей, в среднем до 1-5% при варьировании типа рабочего органа.

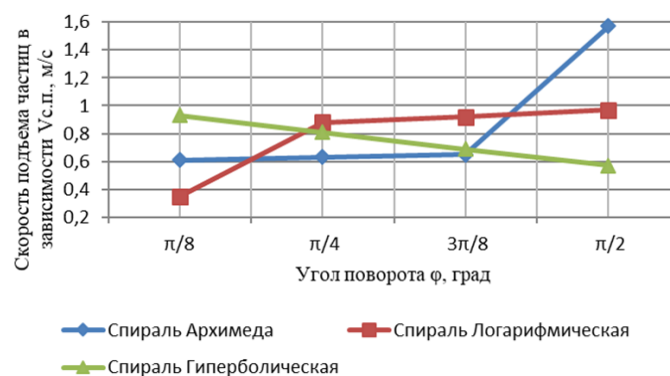


Рис. 7 – Зависимость скорости подъема клубня картофеля от формы поверхности подпорного питателя $V_{с.п.}$

Fig. 7 — Dependence of the potato tuber lifting speed on the shape of the retaining feeder's surface ($V_{с.п.}$)

Однако, дальнейшее увеличение угла поворота рабочей поверхности до приводит к увеличению скорости подъема корнеклубнеплода до значения 1,6 м/с только лишь у рабочей поверхности питателя, выполненной по спирали Архимеда. Данное обстоятельство характеризуется особенностью элементов конструкции подпорного питателя, обусловленная равномерным увеличением радиуса при вращении точки вокруг центра поверхности питателя.

Линейное повышение скорости подъема корнеклубнеплода до значения 1,0 м/с в диапазоне углов $\pi/8$ - $\pi/2$, у рабочей поверхности питателя, выполненной по логарифмической спирали объясняется формированием траектории движения корнеклубнеплода со скоростью, пропорционально пройденному расстоянию равномерно вращающейся по прямой, согласно свойству данной поверхности. Движение корнеклубнеплода по рабочей поверхности подпорного питателя, выполненной по гиперболической спирали в интервале исследуемых углов поворота от до выполняется по линейной затухающей траектории со снижением скорости от 0,9 до 0,5 м/с, что следует интерпретировать обстоятельством, обусловленным формированием данной рабочей поверхности обратно пропорционально увеличению радиуса при вращении точки вокруг центра поверхности питателя. Варьирование скоростей между типами исследуемых поверхностей подпорного питателя находится в интервале значений 1-5% в диапазоне углов $\pi/8$ - $3\pi/8$ следует объяснить наличием равных начальных скоростей движения клубня и их увеличением при $\pi/2$ до значений 0,6 м/с, 1,0 м/с и 1,6 м/с в зависимости от типа рабочей поверхности в виду особенностей формы рабочей поверхности. Статистические характеристики результатов исследований ограничивались определением стандартной ошибки 1,16, и дисперсии ошибки 1,36.

Анализ предшествующих научных исследований данной тематической области [14, 18, 19], а также существующих конструкций машин для загрузки сельскохозяйственных культур

свидетельствует о том, что предлагаемая конструкция подпорного питателя разрабатываемой автоматизированной машины обеспечивает наибольшую скорость подъема клубня картофеля по подпорному питателю, равную 1,6 м/с при значении угла поворота $\pi/2$, форма рабочей поверхности которого выполнена по спирали Архимеда.

Таким образом, полученные результаты исследований позволяют констатировать целесообразность разработки, изготовления и проведения дальнейших экспериментальных исследований подпорного питателя автоматизированной машины для закладки на хранение картофеля рабочая поверхность которого выполнена по спирали Архимеда, что обеспечивает наибольшую скорость подъема клубня картофеля и передачи товарной продукции на дальнейшие устройства сепарации, что способствует повышению производительности выполнения технологической операции загрузки картофеля в хранилище.

Выводы. Определены закономерности для обоснования функционирующих элементов (подпорного питателя и транспортирующего устройства с распределенной/равномерной подачей материала) автоматизированной машины для закладки картофеля на хранение. Рассмотрены способы подачи картофеля при технологическом процессе работы автоматизированной машины для закладки на хранение при сосредоточенной и распределенной подаче. Установлена динамика потоков схода клубненосного вороха на транспортирующем устройстве с распределенной подачей материала при технологическом процессе работы автоматизированной машины для загрузки картофеля. Определены теоретические зависимости скорости подъема клубней картофеля от формы поверхности подпорного питателя (спираль Архимеда, логарифмическая и гиперболическая спирали) при варьировании параметров движения корнеклубнеплода по поверхности рабочего органа от угла трения продукции и радиуса вектора, определяющего положение корнеклубнеплода на подпорном питателе. Варьирование скоростей между

типами исследуемых поверхностей подпорного питателя находится в интервале значений 1-5% в диапазоне углов $\pi/8$ - $3\pi/8$ и объясняется наличием равных начальных скоростей движения клубня с их увеличением до значений 0,6 м/с, 1,0 м/с и 1,6 м/с при угле подъема до $\pi/2$ в зависимости от типа рабочей поверхности в виду особенностей их конструктивного исполнения. Установлено, что увеличение угла поворота рабочей поверхности до приводит к повышению скорости подъема корнеклубнеплода до значения 1,6 м/с только лишь у рабочей поверхности питателя, выполненной по спирали Архимеда, что определяет целесообразность проведения дальнейших экспериментальных исследований данного подпорного питателя, обеспечивающего наибольшую скорость подъема клубня картофеля и передачу товарной продукции на дальнейшие устройства сепарации, что

способствует повышению производительности выполнения технологической операции загрузки картофеля в хранилище.

Использование автоматизированной машины для загрузки картофеля на хранение способствует повышению равномерности распределения продукции в хранилище, а также снижение прямых затрат труда, себестоимости продукции за счет повышения производительности, в том числе за счет увеличения скорости подъема клубня картофеля по поверхности подпорного питателя. Полученные результаты исследований создают научно-техническую основу для создания отечественного импортозамещающего автоматизированного комплекса для загрузки картофеля в хранилище, ориентированного на устойчивое, ресурсосберегающее и высокопродуктивное сельскохозяйственное производство.

Литература

1. Овэс Е. В., Гаитова Н. А., Шишкина О. А. Индуцирование микроклубнеобразования новых перспективных сортов картофеля в асептической культуре // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2020. Т.15. № 4(60):48-54. doi: 10.12737/2073-0462-2021-48-54
2. Картофель: российский опыт возделывания // Наше сельское хозяйство. 2020. № 11(235). С. 86-90.
3. Гаврилова А. Ю., Конова А. М., Чехалкова Л. К. Влияние применения возрастающих доз минеральных удобрений на урожайность и качество клубней картофеля нового сорта «Смоляночка» // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 2(66). С. 62-69. doi: 10.18286/1816-4501-2024-2-62-69.
4. Научно-технические достижения агроинженерной науки в условиях цифровизации сельского хозяйства / Я.П. Лобачевский, Ю.Ф. Лачуга, А.Ю. Измайлов, Ю.Х. Шогенов // Российская сельскохозяйственная наука. 2025. №. 3. С. 45-53.
5. Xiong, Y., Ge Y., Grimstad L., et al. An autonomous strawberry-harvesting robot: Design, development, integration, and field evaluation. // J. Field Robot. 2020, 37, 202–224. doi:10.1002/rob.21889
6. Создание устойчивой среды при выращивании картофеля / О.А. Старовойтова, В.И. Старовойтов, А.А. Манохина, В.А. Чайка // Агроинженерия. 2020. № 5(99). С. 15-20. doi: 10.26897/2687-1149-2020-5-15-20.
7. Контейнерно-транспортная технология уборки, хранения и реализации селекционного картофеля первой полевой репродукции / А.С. Дорохов, А.В. Сибирев, М.А. Мосяков и др. // Вестник РСХН. 2024. № 1. С. 72 -76. doi: 10.31857/S2500208224010168
8. Актуальные проблемы и приоритетные направления развития картофелеводства / А.В. Коршунов, Е.А. Симаков, Ю.Н. Лысенко и др. // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 3. С. 12-20. doi: 10.24411/0235-2451-2018-10303.
9. Оценка эффективности технологического процесса машинно-тракторного агрегата для уборки овощных культур и картофеля / А.С. Дорохов, А.Г. Аксенов, А.В. Сибирев и др. // Аграрный научный журнал. 2023. № 2. С. 112-116. doi: 10.28983/asj.y2022i2pp112-116.
10. Golmohammadi A., Bejaei F., Behfar H. Design, Development and Evaluation of an Online Potato Sorting System Using Machine Vision // International Journal of Agriculture and Crop Sciences. 2013. Vol. 6. P. 396–402.
11. Физико-механические параметры почвы при выращивании картофеля на грядах / О.А. Старовойтова, В.И. Старовойтов, А.А. Манохина, С.М. Духанина // Земледелие. 2018. № 5. С. 16-20. doi: 10.24411/0044-3913-2018-10504.
12. Совершенствование технологической системы для фитосанитарных работ в биологизированном производстве семян картофеля / А.Б. Калинин, В.А. Смелик, И.З. Теплинский и др. // Техника и оборудование для села. 2025. № 12(342). С. 2-6. doi: 10.33267/2072-9642-2025-12-2-6.
13. Колчин Н.Н., Пономарев А.Г., Зернов В.Н. Новая техника для картофелеводства // Картофель и овощи. 2019. № 6. С. 26 – 29. doi: 10.25630/PAV.2019.77.31.006
14. Suprem A., Mahalik N., Kim K. A review on application of technology systems, standards and interfaces for agriculture and food sector // Comput. Stand. Interfaces. 2013. 35. Pp. 355–364.
15. Zu L. et al. Design and experiment of nondestructive post-harvest device for tomatoes // Agriculture. 2022. T. 12. №. 8. С. 1233.
16. Показатели качества работы автоматизированной машины для ухода за растениями картофеля в селекции и семеноводстве / Н.В. Сазонов, М.А. Мосяков, В.С. Тетерин и др. // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. Т. 18. № 1. С. 60-67. doi: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-60-67.
17. Lü J.Q., Sun H., Dui H., et al. Design and experiment on conveyor separation device of potato digger under heavy soil condition // Transactions of the CSAM. 2017. Issue number 48(11). P. 146 – 155. doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.018a
18. Лобачевский Я. П. Научное обеспечение приоритетных технологий агропромышленного комплекса Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2024. Т. 94. № 3. С. 275-282. doi: 10.31857/S0869587324030102.

19. Дорохов А. С., Аксенов А. Г., Сибирев А. В. Лабораторные исследования макетного образца микроклиматической камеры для хранения мини-клубней картофеля в селекционно-семеноводческом процессе // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 1(61). С. 183-189. doi: 10.18286/1816-4501-2023-1-183-189.

References

1. Oves EV, Gaitova NA, Shishkina OA. [Induction of microtuber formation of new promising potato varieties in aseptic culture]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020; Vol.15. 4(60). 48-54 p. doi: 10.12737/2073-0462-2021-48-54
2. [Potatoes: Russian cultivation experience]. Nashe selskoe khozyaystvo. 2020; 11(235). 86-90 p.
3. Gavrilova Ayu, Konova AM, Chekhalkova LK. [The influence of increasing doses of mineral fertilizers on yield and quality of potato tubers of the new variety Smolyanochka]. Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2024; 2(66). 62-69 p. doi: 10.18286/1816-4501-2024-2-62-69.
4. Lobachevskiy YaP, Lachuga YuF, Izmaylov AYU, Shogenov YuKh. [Scientific and technical achievements of agroengineering science in the context of digitalization of agriculture]. Rossiyskaya selskokhozyaystvennaya nauka. 2025; 3. 45-53 p.
5. Xiong Y, Ge Y, Grimstad L. An autonomous strawberry-harvesting robot: Design, development, integration and field evaluation. J. Field Robot. 2020; 37. 202-224 p. doi:10.1002/rob.21889
6. Starovoytova OA, Starovoytov VI, Manokhina AA, Chayka VA. [Creating a sustainable environment for growing potatoes]. Agrozhenneriya. 2020; 5(99). 15-20 p. doi: 10.26897/2687-1149-2020-5-15-20.
7. Dorokhov AS, Sibirev AV, Mosyakov MA. [Container-transport technology for harvesting, storing and selling breeding potatoes of the first field reproduction]. Vestnik RSKhN. 2024; 1. 72-76 p. doi: 10.31857/S2500208224010168
8. Korshunov AV, Simakov EA, Lysenko YuN. [Actual problems and priority areas for the development of potato growing]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2018; Vol.32. 3. 12-20 p. doi: 10.24411/0235-2451-2018-10303.
9. Dorokhov AS, Aksenov AG, Sibirev AV. [Evaluation of the efficiency of technological process of a machine-tractor unit for harvesting vegetable crops and potatoes]. Agrarnyy nauchnyy zhurnal. 2023; 2. 112-116 p. doi: 10.28983/asj.y2022i2pp112-116.
10. Golmohammadi A, Bejaei F, Behfar H. Design, development and evaluation of an online potato sorting system using machine vision. International Journal of Agriculture and Crop Sciences. 2013; Vol.6. 396-402 p.
11. Starovoytova OA, Starovoytov VI, Manokhina AA, Dukhanina SM. [Physico-mechanical parameters of the soil when growing potatoes on ridges]. Zemledelie. 2018; 5. 16-20 p. doi: 10.24411/0044-3913-2018-10504.
12. Kalinin AB, Smelik VA, Teplinskiy IZ. [Improvement of the technological system for phytosanitary work in the biologized production of potato seeds]. Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2025; 12(342). 2-6 p. doi: 10.33267/2072-9642-2025-12-2-6.
13. Kolchin NN, Ponomarev AG, Zernov VN. [New equipment for potato growing]. Kartofel i ovoshchi. 2019; 6. 26-29 p. doi: 10.25630/PAV.2019.77.31.006
14. Suprem A, Mahalik N, Kim K. A review on application of technology systems, standards and interfaces for agriculture and food sector. Comput. Stand. Interfaces. 2013; 35. 355-364 p.
15. Zu L. Design and experiment of nondestructive post-harvest device for tomatoes. Agriculture. 2022; Vol.12. 8. 1233 p.
16. Sazonov NV, Mosyakov MA, Teterin VS. [Performance indicators of an automated machine for potato plant care in breeding and seed production]. Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii. 2024; Vol.18. 1. 60-67 p. doi: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-60-67.
17. Lu JQ, Sun H, Dui H. Design and experiment on conveyor separation device of potato digger under heavy soil condition. Transactions of the CSAM. 2017; Issue number 48(11). 146-155 p. doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.018a
18. Lobachevskiy YaP. [Scientific support for priority technologies of the agro-industrial complex of the Russian Federation]. Vestnik Rossiyskoy akademii nauk. 2024; Vol.94. 3. 275-282 p. doi: 10.31857/S0869587324030102.
19. Dorokhov AS, Aksenov AG, Sibirev AV. [Laboratory studies of the model sample of microclimate chamber for storage of potato minitubers in seed selection process]. Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2023; 1(61). 183-189 p. doi: 10.18286/1816-4501-2023-1-183-189.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Дорохов Алексей Семенович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, академик РАН, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5), e-mail: dorokhov@rgau-msha.ru, ORCID 0000-0002-4758-3843

Сибирев Алексей Викторович – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5), e-mail: sibirev2011@yandex.ru, ORCID 0000-0002-9442-2276

Тетерин Владимир Сергеевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5), e-mail: v.s.teterin@mail.ru, ORCID 0000-0001-8116-723X

Мосяков Максим Александрович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5), e-mail: maks.mosyakov@yandex.ru, ORCID 0000-0002-5151-7312

Вклад авторов:

А.С. Дорохов – формулирование основной концепции исследования;
В.С. Тетерин – разработка методологии исследования;
А.В. Сибирёв – описание результатов и формирование выводов исследования, подготовка начального варианта текста;
М.А. Мосяков – представление результатов, подготовка графических материалов.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 24.08.2025; одобрена после рецензирования 23.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Dorokhov Alexey Semenovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Academician of the Russian Academy of Sciences (RAS), Federal Scientific Agroengineering Center VIM (1st Institutskiy Proyezd, Building 5, Moscow, 109428, Russian Federation), e-mail: dorokhov@rgau-msha.ru, ORCID 0000-0002-4758-3843

Sibirev Alexey Viktorovich – Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Chief Researcher at the Department of Technologies and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (1st Institutskiy Proyezd, Building 5, Moscow, 109428, Russian Federation), e-mail: sibirev2011@yandex.ru, ORCID 0000-0002-9442-2276

Teterin Vladimir Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher at the Department of Technologies and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (1st Institutskiy Proyezd, Building 5, Moscow, 109428, Russian Federation), e-mail: v.s.teterin@mail.ru, ORCID 0000-0001-8116-723X

Mosyakov Maxim Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher at the Department of Technologies and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (1st Institutskiy Proyezd, Building 5, Moscow, 109428, Russian Federation), e-mail: maks.mosyakov@yandex.ru, ORCID 0000-0002-5151-7312

Contribution of the authors:

A.S. Dorokhov – Conceptualization;

V.S. Teterin – Research methodology;

A.V. Sibirev – Description of the results (data curation) and presentation of conclusions, Writing – original draft preparation;

M.A. Mosyakov – Presentation of results, Visualization.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 24.08.2025; revised 23.03.2026; accepted 01.04.2026.