

# ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

УДК 621.928:633.491

doi: 10.15507/2658-4123.034.202401.010-025

Оригинальная статья



## Исследование движения клубней картофеля на элеваторе с интенсификатором сепарации

П. И. Гаджиев<sup>1</sup>✉, И. А. Успенский<sup>2</sup>, И. А. Юхин<sup>2</sup>,  
Г. Г. Рамазанова<sup>1</sup>, И. П. Гаджиев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Российский государственный университет народного хозяйства имени В. И. Вернадского  
(г. Балашиха, Российская Федерация)*

<sup>2</sup> *Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева  
(г. Рязань, Российская Федерация)*

✉ [pgadjiev@yandex.ru](mailto:pgadjiev@yandex.ru)

### Аннотация

**Введение.** При уборке картофеля на почвах с повышенной влажностью забиваются зазоры между прутками элеваторов, уменьшается полнота сепарации почвы, увеличивается повреждение клубней картофеля и потеря урожая. Для улучшения качества сепарации в данном исследовании авторы предлагают интенсификатор картофелеуборочного комбайна в виде лопастного транспортера. В отличие от предшественников он расположен под рабочей ветвью полотна основного элеватора.

**Цель исследования.** Теоретическое обоснование лопастного интенсификатора сепарации картофелеуборочного агрегата на переувлажненных почвах с целью снижения повреждаемости клубней картофеля при уборке.

**Материалы и методы.** Проанализирована работа интенсификатора сепарации с лопастным транспортером, расположенного под рабочей ветвью основного элеватора картофелеуборочного комбайна с упругими плоскими лопастями, движущимися навстречу полотну основного элеватора. Лопасть интенсификатора, установленного под рабочей ветвью элеватора, должна выполнять функции толкателя при залипании и попадании клубней в зазор между прутками при уборке картофеля на переувлажненных почвах.

**Результаты исследования.** Анализ движения клубня относительно прутка показал, что при заданных параметрах и условиях шаг лопастей, равный 210 мм, обеспечивает падение шарового комка с прутка и лопасти на ленту транспортера без удара. Во избежание трения с прутками клубней и примесей расстояние между лентой транспортера интенсификатора и прутками должно превышать зазор между прутками. При заданном расстоянии ленты транспортера от прутка, равном 30 мм, шаг лопастей с точностью 1 % определяется скоростью лопасти в движении относительно прутка.

© Гаджиев П. И., Успенский И. А., Юхин И. А., Рамазанова Г. Г., Гаджиев И. П., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

*Обсуждение и заключение.* Проведенные теоретические исследования лопастного интенсификатора сепарации картофелеуборочного агрегата на переувлажненных почвах показали его эффективность, что подтверждено результатами полевых опытов.

**Ключевые слова:** интенсификатор, сепарация почвы, прижимной транспортер, повреждение клубней, картофелеуборочные машины

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Исследование движения клубней картофеля на элеваторе с интенсификатором сепарации / П. И. Гаджиев [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 1. С. 10–25. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.010-025>

Original article

## Study of Potato Tuber Motion on the Elevator with a Separation Intensifier

P. I. Gadzhiev<sup>a</sup>✉, I. A. Uspenskiy<sup>b</sup>, I. A. Yukhin<sup>b</sup>,  
G. G. Ramazanova<sup>a</sup>, I. P. Gadzhiev<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Russian State University of National Economy  
named after V. I. Vernadsky (Balashikha, Russian Federation)

<sup>b</sup> Ryazan State Agrotechnological University  
named after P. A. Kostychev (Ryazan, Russian Federation)

✉ [pgadjiev@yandex.ru](mailto:pgadjiev@yandex.ru)

### Abstract

**Introduction.** When harvesting potatoes from the waterlogged soils, the gaps between the elevator bars become clogged, the soil separation efficiency decreases while damage to potato tubers and yield loss increases. In this study, the authors propose a potato harvester intensifier in the paddle conveyor form to improve the separation quality for specific conditions. It is located under the carrying run of the main elevator apron.

**Aim of the Study.** The aim of the study is theoretical justification of the potato harvester paddle intensifier for separating potato tubers from waterlogged soils in order to reduce damage to potatoes during harvesting.

**Materials and Methods.** There was analyzed the work of the separation intensifier with a paddle conveyor located under the carrying side of the potato harvester main elevator with flexible flat blades moving towards the main elevator apron. The intensifier paddle, installed under the elevator carrying side, must act as a pusher when potato tubers stick and fall into the gap between the elevator bars in harvesting potatoes from waterlogged soils.

**Results.** The analysis of potato tuber motion relative to the bar has showed that under the specified parameters and conditions the pitch of blades equal to 210 mm provides the falling of the ball clod from the bar and blade on the conveyor belt without impact. In order to avoid the friction of potato tubers and impurities with bars, the distance between the intensifier conveyor belt and bars must exceed the gap between bars. When the distance between the conveyor belt and bar is equal to 30 mm, the blade pitch is determined to within 1 per cent by the speed of a blade moving relative to the bar.

**Discussion and Conclusion.** The conducted theoretical studies of the blade intensifier of potato harvester separation on overwatered soils revealed its high efficiency, which is confirmed by the results of field experiments.

**Keywords:** intensifier, soil separation, pressure conveyor, potato tuber damage, potato harvesters

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

*For citation:* Gadzhiev P.I., Uspenskiy I.A., Yukhin I.A., Ramazanova G.G., Gadzhiev I.P. Study of Potato Tuber Motion on the Elevator with Separation Intensifier. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):10–25. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.010-025>

## **Введение**

В области современного растениеводства одним из важнейших направлений выращивания сельскохозяйственных культур является картофелеводство. Возделывание картофеля требует значительных энергетических и трудоемких затрат. Около 60–70 % всех трудозатрат при производстве картофеля приходится только на уборку клубней.

Особенности развития механизированной уборки картофеля связаны с конструкцией картофелеуборочных машин, так как условия их работы разнообразны и требуют специального подхода к конструкциям. В технологическом процессе уборочных машин важную роль играет сепарация почвы, которая заключается в ее отделении, удалении ботвы, сорняков и твердых почвенных примесей, в том числе камней.

В связи с этим на этапе проектирования картофелеуборочных машин совершенствование сепарирующих рабочих органов всегда является актуальной задачей, особенно когда машины не приспособлены к работе в сложных почвенно-климатических условиях.

Разнообразии почвенно-климатических условий возделывания картофеля подтверждает актуальность вопроса об усовершенствовании сепарирующих рабочих органов картофелеуборочных машин, которые будут приспособлены работать повсеместно.

Сложность работы сепарирующих органов заключается в том, что содержание клубней в поступающей на элеватор почвенно-клубненой массе не превышает 2–4 %.

Так, на сепарацию почвы существенное влияние оказывает ее физико-механический состав [1–3]. На переувлажненных почвах прутковые элеваторы не справляются с отделением клубней картофеля от почвы без дополнительной интенсификации поступающей почвенно-клубненой массы [4–6]. На почвах с повышенной влажностью образуются глины, из-за чего при уборке картофеля забиваются зазоры между прутками, уменьшается полнота сепарации, а также увеличивается повреждение клубней, что в конечном итоге приводит к потере большей части урожая [7; 8].

## **Обзор литературы**

Обзор современной научной литературы, а также технологий уборки корнеплодов и картофеля, сепарирующих рабочих органов картофелеуборочных машин широко представлен в работах российских и зарубежных ученых. Анализ показывает, что повышение качества сепарации почвы и уровень эксплуатационных и технологических показателей во многом зависит от интенсификаторов, установленных на сепарирующих элеваторах [5]. Разработаны способы и схемы пневматического, гидравлического и механического принципа действия на почвенные комки для крошения почвы [4].

Подтверждено, что эффективность работы сепарирующего устройства напрямую связана с конструкцией и местом расположения самого интенсификатора в комбайне<sup>1</sup>. Это характеризуется отсутствием или незначительным содержанием в ворохе несепарируемых почвенных комков и количеством поврежденных клубней.

Характер поступающей на сепарирующие рабочие органы картофелеуборочного комбайна клубненосной массы во многом зависит от почвенно-климатических условий, в частности, от влажности почвы. С повышением скорости картофелеуборочной машины увеличивается толщина клубненосного пласта на сепарирующих рабочих органах [9; 10].

На основании данных проведенного анализа следует отметить, что применяемые современные конструкции интенсификаторов в зависимости от места расположения в комбайне влияют на степень повышения сепарации почвы и снижение повреждения клубней [11].

Например, интенсификаторы, расположенные над рабочим полотном, недостаточно эффективны в случае забивания зазоров между прутками элеватора глыбами и мелкими клубнями.

Для улучшения качества сепарации почвы авторы данной статьи предлагают интенсификатор картофелеуборочного комбайна в виде лопастного транспортера, который, в отличие от предшественников, расположен под рабочей ветвью полотна основного элеватора<sup>2</sup> [12]. Интенсификатор выполнен в виде транспортера с лопастями, установленными под некоторым углом. Он вращается в сторону, противоположную вращению сепарирующего элеватора картофелеуборочного комбайна, что позволяет защищать зазоры между прутками от залипания [13; 14]. Основная задача лопастного интенсификатора – не допускать залипания между прутками комбайна при уборке картофеля и тем самым уменьшать механические повреждения клубней картофеля и потерю урожая.

### **Материалы и методы**

Вопрос о воздействии лопастного транспортера сепарирующего элеватора на процесс сепарации почвы в картофелеуборочных комбайнах изучен с применением методов теоретической механики.

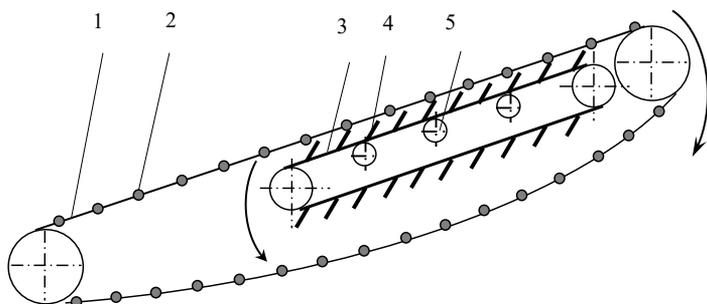
Рассмотрим интенсификатор сепарации с лопастным транспортером, расположенный под рабочей ветвью основного элеватора, с упругими плоскими лопастями, движущимися навстречу полотну основного элеватора (рис. 1). Лопасть интенсификатора, установленного под рабочей ветвью элеватора, должна выполнять функции толкателя при залипании и попадании клубней в зазор между прутками.

<sup>1</sup> Суздалева Г. Ф. Технология сепарации почвенно-картофельного вороха с обоснованием конструктивно-режимных параметров элеватора с комбинированными прутками и интенсификатором : дис. ... канд. техн. наук. Рязань, 2005. 169 с.

<sup>2</sup> Липатова М. А., Борычев С. Н. Обзор сепарирующих органов картофелеуборочных машин // Материалы Всерос. науч. конф., посвященной 80-летию со дня рождения профессора А. М. Лопатина. 2020. С. 133–138. URL: [http://rgatu.ru/archive/sborniki\\_konf/12-13\\_11\\_19/sbor.pdf](http://rgatu.ru/archive/sborniki_konf/12-13_11_19/sbor.pdf) (дата обращения: 15.02.2023).

Благодаря поддерживающим роликам можно пренебречь прогибом ленты транспортера интенсификатора и поперечным перемещением лопасти-толкателя в направлении, перпендикулярном плоскости ленты, при взаимодействии толкателя с пластом [15–16].

Таким образом, толкатель может взаимодействовать только с такими частями находящихся между соседними прутками клубней, которые выступают за пределы плоскости, касающейся цилиндрических прутков и находящейся под ними.



Р и с. 1. Основной элеватор с интенсификатором сепарации:  
 1 – полотно основного элеватора; 2 – пруток основного элеватора;  
 3 – полотно резинового транспортера интенсификатора; 4 – лопасть;  
 5 – поддерживающий ролик

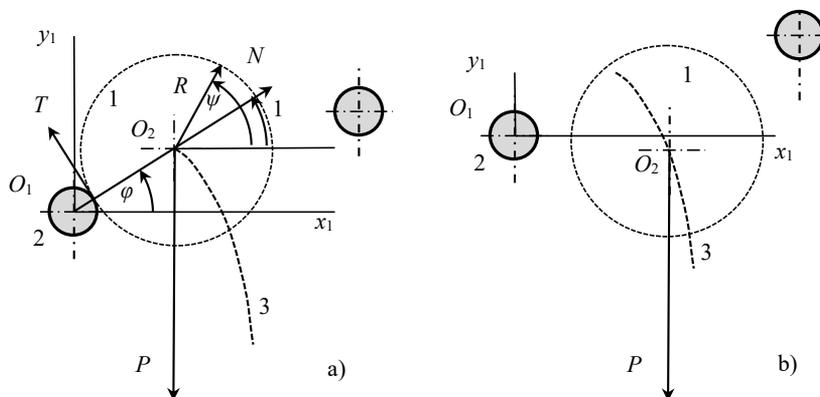
Fig. 1. Main elevator with separation intensifier:  
 1 – belt of the main elevator; 2 – bar of the main elevator;  
 3 – intensifier rubber conveyor belt; 4 – paddle;  
 5 – supporting roller

Выделим две фазы движения клубня в зазоре между прутками:

- 1) движение несвободного клубня при ограничениях, наложенных связью в виде прутка;
- 2) движение свободного клубня после освобождения от связи, то есть без контакта с прутком.

Введем дополнительно следующие обозначения (рис. 2):  $t$  – время, с;  $x_1, y_1$  – координаты центра масс  $O_2$  клубня в системе координат  $O_1x_1y_1$ , м;  $\varphi$  – полярный угол центра масс  $O_2$  клубня в системе координат  $O_1x_1y_1$  с отсчетом от оси  $O_1x_1$  и возрастанием в направлении против хода стрелки часов, рад;  $\varphi_0$  – полярный угол в начальный момент, рад;  $\psi$  – угол поворота клубня вокруг оси, проходящей через центр масс клубня параллельно прутку с отсчетом от оси, параллельной оси  $O_1x_1$ , и возрастанием в направлении против хода стрелки часов, рад;  $\psi_0$  – угол поворота клубня в начальный момент, рад;  $J$  – момент инерции клубня относительно оси, проходящей через центр масс клубня параллельно прутку, кг;  $\mu$  – коэффициент трения скольжения клубня по резине прутка и лопасти;  $m$  – масса клубня, кг;  $N$  – величина нормальной составляющей реакции прутка на клубень, Н;  $T$  – сила трения между клубнем и прутком, Н;  $P$  – вес клубня, Н;  $g$  – ускорение свободного падения клубня, м/с<sup>2</sup>;  $D, R$  – диаметр и радиус клубня со сферической поверхностью, м;  $d, r$  – диаметр и радиус цилиндрического прутка, м;  $h$  – расстояние

между прутком и лентой резинового транспортера интенсификатора сепарации, м;  $\alpha$  – угол наклона рабочей ветви полотна элеватора к горизонтальной плоскости, град;  $l$  – шаг лопастей, м;  $\Delta t$  – время падения тела в виде шара с полотна элеватора на ленту транспортера интенсификатора сепарации, с;  $v_e, v_i$  – величина скорости соответственно прутка и лопасти при поступательном движении относительно комбайна, м/с.



Р и с. 2. Положение клубня в зазоре между прутками на первой фазе движения относительно прутка (а) и на второй фазе движения (б) с указанием действующих на клубень сил:

1 – клубень; 2 – пруток; 3 – траектория центра масс клубня

Fig. 2. The position of the potato tuber in the gap between the bars in the first phase of motion relative to the bar (a) and in the second phase of motion (b) indicating the forces acting on the potato tuber:

1 – potato tuber; 2 – bar; 3 – trajectory of the center of the potato tuber mass

При составлении уравнений движения клубня относительно прутка на первой фазе необходимо рассматривать два случая: движение клубня без скольжения с прутком (перекатывание по прутку) и движение со скольжением относительно прутка.

Дифференциальные уравнения движения клубня на первой фазе в первом случае запишем как уравнения плоскопараллельного движения тела в инерциальной системе координат  $O_1x_1y_1$  в таком виде:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 = N \cos \varphi - T \sin \varphi; \\ m\ddot{y}_1 = N \sin \varphi + T \cos \varphi - P; \\ J\ddot{\varphi} = -TR. \end{cases} \quad (1)$$

Первый вариант имеет место, когда выполняется условие  $T < \mu N$ . В этом случае к уравнениям (1) следует добавить два аналитических уравнения связи:

$$\begin{cases} x_1 = (R + r) \cos \varphi; \\ y_1 = (R + r) \sin \varphi. \end{cases} \quad (2)$$

Данные уравнения имеют пять неизвестных функций от времени  $x_1, y_1, \varphi, N, T$ . Для их решения необходимо добавить начальные условия: в начальный момент

клубень, вытолкнутый из зазора между прутками, покоится на элеваторе, то есть справедливы равенства:

$$\varphi(t)|_{t=0} = \varphi_0; \dot{\varphi}|_{t=0} = 0; \dot{x}_1|_{t=0} = 0; \dot{y}_1|_{t=0} = 0, \tag{3}$$

где значение  $\varphi_0$ , указанное на рисунке 3, имеет вид:

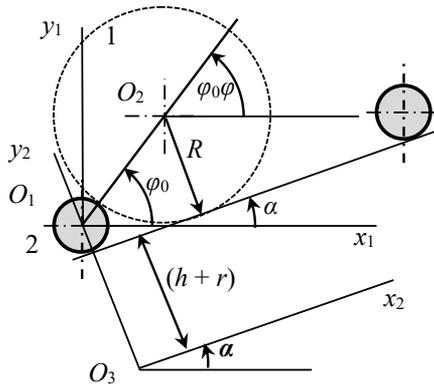
$$\varphi_0 = \arctan \frac{R-r}{R+r}.$$

Подставляя выражения (2) в уравнения (1) и исключая из трех полученных уравнений переменные  $N$  и  $T$ , приходим к одному дифференциальному уравнению:

$$[J + mR(R+r)]\ddot{\varphi} = -PR \cos \varphi;$$

при  $J = 2mR^2/5, P = mg$ :

$$[7R/5 + r]\ddot{\varphi} = -g \cos \varphi. \tag{4}$$



Р и с. 3. Начальное положение клубня в зазоре между прутками на первой фазе движения:  
1 – клубень; 2 – пруток

F i g. 3. The initial position of the potato tuber in the gap between the bars in the first phase of motion:  
1 – potato tuber; 2 – bar

Решение дифференциального уравнения (4) с начальными условиями (3) можно найти численными методами. При этом

$$N/m = g \sin \varphi - (R+r)\dot{\varphi}^2; T/m = g \cos \varphi / [7/2 + 5r/D] \tag{5}$$

Решение (5) для реактивных сил справедливо в первом случае, когда выполняются неравенства  $N/m > 0, T/m < \mu N/m$ .

Если в какой-то момент  $N/m > 0$ ,  $T/m \geq \mu N/m$ , то необходимо рассматривать второй случай.

Во втором случае, когда клубень движется по прутку со скольжением, следует принять равенство:

$$T = \mu N.$$

Дифференциальные уравнения движения клубня на первой фазе во втором случае запишем как уравнения плоскопараллельного движения тела в инерциальной системе координат  $O_1x_1y_1$  в таком виде:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 = N \cos \varphi - \mu N \sin \varphi; \\ m\ddot{y}_1 = N \sin \varphi + \mu N \cos \varphi - P; \\ J\ddot{\psi} = -\mu NR. \end{cases} \quad (6)$$

К уравнениям (6) следует добавить аналитические уравнения связи (2).

Пять уравнений (6), (2) имеют пять неизвестных функций от времени  $x_1, y_1, \varphi, N, \psi$ . Для их решения необходимо добавить начальные условия: в начальный момент с отсчетом времени от 0 положение и скорость центра масс клубня следует принять как решение уравнений (1), (2) в момент начала скольжения, когда  $N/m > 0$ ,  $T < \mu N$ .

Подставляя выражения (2) в уравнения (6), после исключения из трех полученных уравнений переменной  $N$  придем к следующим двум дифференциальным уравнениям:

$$\begin{cases} m(R+r)\ddot{\varphi} = -\mu m(R+r)\dot{\varphi}^2 - P(\cos \varphi - \mu \sin \varphi); \\ J\ddot{\psi} = -\mu [P \sin \varphi - m(R+r)\dot{\varphi}^2] R, \end{cases}$$

а при  $J = 2mR^2/5$ ,  $P = mg$ :

$$\begin{cases} (R+r)\ddot{\varphi} = -\mu(R+r)\dot{\varphi}^2 - g(\cos \varphi - \mu \sin \varphi); \\ (2R/5)\ddot{\psi} = -\mu [g \sin \varphi - (R+r)\dot{\varphi}^2]. \end{cases} \quad (7)$$

Решение дифференциальных уравнений (7) можно найти численными методами. Начальные условия для переменной  $\psi$  совпадают с условиями для переменной  $\varphi$  в момент окончания движения на первой фазе без скольжения относительно прутка, то есть в первом случае. При этом

$$N/m = g \sin \varphi - (R+r)\dot{\varphi}^2. \quad (8)$$

Первая фаза движения заканчивается, когда на этой фазе выполняется неравенство  $N/m < 0$ . Если неравенство  $N/m < 0$  имело место на первой фазе движения в первом случае, то второй случай рассматривать не нужно, то есть первая фаза заканчивается в первом случае.

На второй фазе, начиная с нулевого момента времени, центр масс клубня движется как свободная материальная точка:

$$\begin{cases} x_1 = x_{10} + \dot{x}_{10}t; \\ y_1 = y_{10} + \dot{y}_{10}t - gt^2/2, \end{cases} \quad (9)$$

где  $x_{10}, y_{10}$  и  $\dot{x}_{10}, \dot{y}_{10}$  – координаты и проекции скорости центра масс клубня по осям  $O_1x_1$  и  $O_1y_1$  в момент окончания первой фазы движения, которые запишем в виде преобразованных формул (2), когда величины  $\varphi, \dot{\varphi}$  принимают значения  $\varphi_{10}, \dot{\varphi}_{10}$  и  $\dot{\varphi}_{10}, \ddot{\varphi}_{10}$  соответственно:

$$\begin{cases} x_{10} = (R + r) \cos \varphi_{10}; \\ y_{10} = (R + r) \sin \varphi_{10}; \\ \dot{x}_{10} = -(R + r) \dot{\varphi}_{10} \sin \varphi_{10}; \\ \dot{y}_{10} = (R + r) \dot{\varphi}_{10} \cos \varphi_{10}. \end{cases}$$

Момент времени, когда клубень соприкоснется с лентой транспортера, определяется из условия:

$$y_1 - x_1 \operatorname{tg} \alpha + (h + r - R) / \cos \alpha \leq 0. \quad (10)$$

За время  $\Delta t$  падения клубня на ленту транспортера лопасть переместится относительно клубня вдоль ленты и полотна транспортера на расстояние  $l$ . Учитывая, что скорость лопасти относительно клубня вдоль рабочего полотна элеватора складывается из суммы величин скоростей точек лопасти и прутка элеватора относительно комбайна, запишем выражение для минимального шага  $l$  лопастей так:

$$a_1 t_3^2 + b_1 t_3 + c_1 = 0. \quad (11)$$

Вторая фаза движения клубня заканчивается в момент выполнения условия (10). Подставляя выражения (9) координат  $x_1, y_1$  в равенство (10), запишем уравнение для определения времени  $t_3$  движения клубня на второй фазе в таком виде:

$$a_1 t_3^2 + b_1 t_3 + c_1 = 0, \quad (12)$$

где:

$$a_1 = g/2; b_1 = \dot{x}_{10} \operatorname{tg} \alpha - \dot{y}_{10}; c_1 = x_{10} \operatorname{tg} \alpha - y_{10} - (h + r - R) / \cos \alpha.$$

Расчет координат центра шарового мелкого клубня или комка почвы при его движении через зазор между прутками элеватора на первой фазе по дифференциальным уравнениям (4) и (7) и на второй фазе по уравнениям (12) позволяет моделировать движение точки на компьютере и анализировать траектории ее

движения. Анализ уравнений движения позволяет сделать вывод о том, что время падения шара на ленту транспортера из начального положения, при котором шар опирается на пруток и лопасть, при заданном расстоянии от ленты до прутка элеватора и заданном коэффициенте трения комка с прутком не зависит от скоростей точек лопасти и прутка, а зависит только от диаметра шара. Следовательно, в соответствии с формулой (12) шаг  $l$  лопастей увеличивается прямо пропорционально увеличению скорости точки лопасти в движении относительно прутка. Поэтому при расчете минимального шага лопасти скорость ее точки относительно прутка следует назначать максимальной из расчетных значений при разных условиях эксплуатации.

Для оценки шага  $l$  лопастей интенсификатора сепарации по формуле (11) удобно рассматривать движение центра масс клубня относительно лопасти и ленты транспортера интенсификатора. В связанной с лопастью системе координат  $O_3x_2y_2$  уравнения движения центра клубня на обеих фазах запишем так (рис. 2b, рис. 3):

$$\begin{cases} x_2 = x_1 \cos \alpha + y_1 \sin \alpha + (v_e + v_i)t; \\ y_2 = -x_1 \sin \alpha + y_1 \cos \alpha + h + r, \end{cases} \quad (13)$$

где  $x_1, y_1$  – координаты движущегося центра клубня в системе координат  $O_1x_1y_1$ .

Момент времени  $\Delta t$ , когда клубень в виде шара соприкоснется с лентой транспортера, определяется из следующего условия:

$$y_2 - R \leq 0.$$

При этом формула (11) примет такой вид:

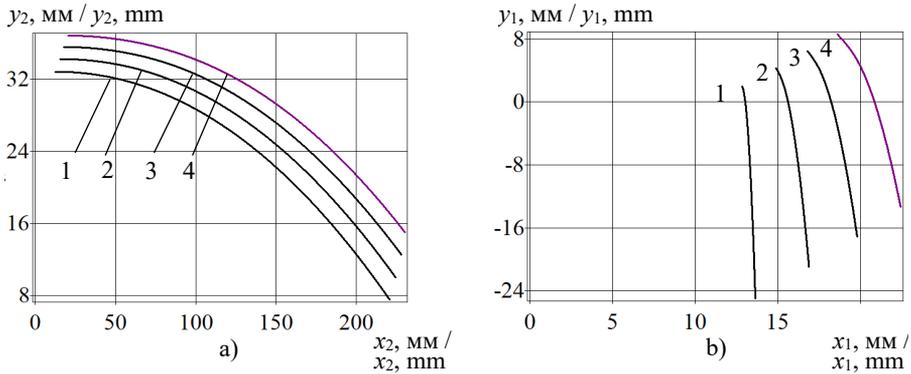
$$l = x_2(\Delta t) - x_2(0).$$

Минимальный шаг  $l$  лопастей равен разности абсцисс  $x_2$  концевых точек траектории центра комка при движении его относительно лопасти (рис. 4a).

#### **Результаты исследования**

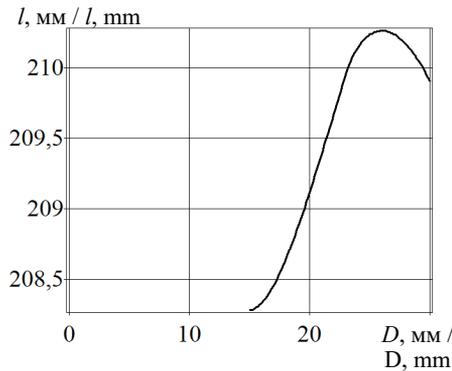
Анализ решения дифференциальных уравнений движения клубня (форма клубня подразумевается в виде шара) относительно прутка показал, что при диаметре клубня 25 мм и 30 мм имеют место оба случая движения на первой фазе. Сначала шар перекачивается по прутку, затем скользит по нему с замедленным вращением и после схода с прутка на второй фазе движется как свободное тело (рис. 4b, 3).

Расчеты показали, что при заданных параметрах и условиях шаг лопастей, равный 210 мм, обеспечивает падение шарового комка с прутка и лопасти на ленту транспортера без столкновения со следующей лопастью (рис. 5).



Р и с. 4. Траектории движения центра шара разного диаметра  $D$  через зазор между прутками элеватора и зависимости его координаты  $y_2$  от  $x_2$  при движении относительно лопасти (а) и координаты  $y_1$  от  $x_1$  при движении относительно прутка (б):  
 1 –  $D = 15$  мм; 2 –  $D = 20$  мм; 3 –  $D = 25$  мм; 4 –  $D = 30$  мм

F i g. 4. Trajectories for motion of the center of a ball of different diameters  $D$  through the gap between the elevator bars and the dependence of its coordinate  $y_2$  on  $x_2$  when moving relative to the paddle (a) and the coordinate  $y_1$  on  $x_1$  when moving relative to the bar (b):  
 1 –  $D = 15$  мм; 2 –  $D = 20$  мм; 3 –  $D = 25$  мм; 4 –  $D = 30$  мм



Р и с. 5. Расчетная зависимость минимального шага  $l$  лопастей от диаметра  $D$  шара при скорости лопасти относительно прутка  $2,9$  м/с

F i g. 5. The estimated dependence of the minimum pitch  $l$  of the paddles on the diameter  $D$  of the ball at a blade speed relative to the rod of  $2.9$  m/s

Как можно видеть на графике, представленном на рисунке 5, зависимость шага от диаметра шара, изменение диаметра от  $15$  мм до  $30$  мм приводит к увеличению шага на  $2$  мм, что составляет  $1\%$ . Таким образом, при заданном расстоянии ленты транспортера от прутка, равном  $30$  мм, шаг лопастей с точностью  $1\%$  определяется скоростью лопасти в движении относительно прутка.

Для подтверждения теоретических исследований были проведены полевые испытания модернизированного картофелеуборочного комбайна КПК-2-01, оснащенного лопастным интенсификатором сепарирующего элеватора.

Результаты некоторых основных сравнительно-полевых исследований приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

**Агротехнические показатели работы комбайна КПК-2-01**  
**Agrotechnical performance of the combine harvester КПК-2-01**

Показатели / Indicators	КПК-2-01 / КПК-2-01	КПК-2-01 с экспериментальным рабочим органом / КПК-2-01 with experimental working body
Скорость комбайна, м/с / Harvester speed, m/s	0,84	0,86
Полнота выкапывания клубней, % / Efficiency of digging potato tubers, %	97,8	98,9
Оставлено на поверхности, % / Left on the surface, %		
в том числе: / including:	–	–
не оторвано от ботвы / not torn off from the tops		
всего потерь / total losses	2,2	1,1
Чистота в таре, % / Purity in container, %:		
в том числе: / including:		
клубни / potato tubers	88,9	97,8
почва / soil	10,1	1,3
растительные остатки / plant remains	1,0	0,9
Полнота сепарации, % / Separation efficiency, %	85,2	93,5
Повреждения клубней, % / Damage to potato tubers, %	4,5	2,8

### Обсуждение и заключение

Исследование показало, что шаг лопастей, равный 210 мм, обеспечивает падение шарового комка с прутка и лопасти на ленту транспортера без удара со следующей лопастью. Изменение диаметра от 15 мм до 30 мм приводит к увеличению шага на 2 мм, что составляет 1 %. Таким образом, при заданном расстоянии ленты транспортера от прутка, равном 30 мм, шаг лопастей с точностью 1 % определяется скоростью лопасти в движении относительно прутка.

На основании таблицы 1 можно сделать следующее заключение. Неповрежденные клубни составляют 97,2 %, поврежденные клубни – 2,8 %. Благодаря установленному транспортеру с лопастным интенсификатором не наблюдалось залипания просвета между прутками. Повреждения клубней уменьшаются на 38 %. Это происходит за счет выталкивания клубней из зазоров между соседними прутками, при случае если клубни закрывают зазоры и транспортирование отсепарированных примесей без заклинивания их между лопастью и прутком. Отсутствие залипания просвета между прутками позволило увеличить рабочую скорость модернизированного комбайна КПК-2-01 с 0,84 м/с на 0,86 м/с.

Таким образом, результаты полевых исследований показали высокую эффективность работы картофелеуборочного комбайна КПК-2-01, оснащенного лопастным интенсификатором. Следовательно, теоретические предпосылки подтвердились.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Формирование комплекса картофелеуборочных и транспортных машин / И. А. Успенский [и др.] // Техника и оборудование для села. 2021. № 2. С. 27–31. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-27-31>
2. Колчин Н. Н., Пономарев А. Г., Петухов С. Н. Как снизить повреждение клубней в машинных технологиях // Картофель и овощи. 2019. № 3. С. 14–16. <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.48.28.002>
3. Design of Small Potato Diggers / N. G. Bayboboev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2022. Vol. 1010, Issue 1. Article no. 012080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1010/1/012080>
4. Оценка перспективной технологической схемы картофелеуборочного комбайна / И. А. Успенский [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 1. С. 262–269. URL: <https://clck.ru/gfaw> (дата обращения: 15.02.2023).
5. Совершенствование отделения картофельных примесей на основе применения поперечного вращающего ворошителя картофелекопателя / А. Н. Бачурин [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2019. № 1 (41). С. 99–103. URL: <https://clck.ru/37bBLz> (дата обращения: 15.02.2023).
6. Кузьмин А. В., Вамбуева Э. Б., Болохоев В. С. Проблемы снижения повреждаемости клубней картофеля при уборке // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2009. № 4 (31). С. 177–183. URL: <https://clck.ru/37bBXd> (дата обращения: 15.02.2023).
7. Болохоев В. С. Обоснование параметров сепарирующих рабочих органов картофелеуборочных машин с целью снижения повреждений клубней // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В. Р. Филиппова. 2015. № 1 (38). С. 51–57. URL: <https://clck.ru/37mJZP> (дата обращения: 15.02.2023).
8. Основные задачи и направления НИР по снижению повреждений картофеля и овощей в машинных технологиях их производства / В. Н. Зернов [и др.] // Агротехника и энергообеспечение. 2019. № 4 (25). С. 6–16. EDN: [TANUJF](https://doi.org/10.25630/PAV.2019.48.28.002)
9. Гаджиев П. И., Рамазанова Г. Г., Гаджиев И. П. Условия работы сепарирующего элеватора картофелеуборочных машин на переувлажненных почвах // Наука в центральной России. 2022. № 2 (56). С. 98–106. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-2-98-106>
10. Experiment and Analysis of Potato-Soil Separation Based on Impact Recording Technology / Z. Wei [et al.] // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2019. Vol. 12, Issue 5. P. 71–80. URL: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/4573> (дата обращения: 15.02.2023).
11. Сепарирующий рабочий орган картофелеуборочных машин : патент 2785297 Российская Федерация / Гаджиев П. И. [и др.]. № 2021112154/10(025976) ; заявл. 28.04.2021 ; опубл. 06.12.2022, Бюл. № 34. 7 с.
12. Сепарирующий элеватор с очищающими лопастями : патент 214988 Российская Федерация / Гаджиев П. И. [и др.]. № 2022111458/09(024091) ; заявл. 27.04.2022 ; опубл. 23.11.2022, Бюл. № 33. 5 с.
13. Экономическая эффективность комбайновой уборки картофеля с применением интенсификатора сепарирующего элеватора / И. А. Успенский [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева. 2022. Т. 14, № 4. С. 177–184. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2022.88.19.023>
14. Результаты полевых испытаний картофелеуборочного комбайна КПК-2-01, оснащенного интенсификатором / П. И. Гаджиев [и др.] // Наука в центральной России. 2022. № 6 (60). С. 71–77. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-6-71-77>
15. Исследование влияния лопастного интенсификатора на полноту сепарации / П. И. Гаджиев [и др.] // Техника и оборудование для села. 2023. № 1 (307). С. 27–29. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-1-27-29>

16. Гаджиев П. И., Гаджиев И. П., Рамазанова Г. Г. Определение конструктивных параметров интенсификатора и условия выталкивания клубня из затора между прутками сепарирующих эле-  
ватор // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25. № 1. С. 35–39. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-17-22>

*Поступила в редакцию 24.03.2023; поступила после рецензирования 04.04.2023;  
принята к публикации 15.05.2023*

*Об авторах:*

**Гаджиев Парвиз Имранович**, доктор технических наук, профессор, декан факультета электроэнергетики и технического сервиса Российского государственного университета народного хозяйства имени В. И. Вернадского (143907, Российская Федерация, г. Балашиха, ул. Шоссе Энтузиастов, д. 50), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6877-6126>, Researcher ID: [DNC-7890-2022](https://orcid.org/0000-0002-6877-6126), [pgadjiev@yandex.ru](mailto:pgadjiev@yandex.ru)

**Успенский Иван Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической эксплуатации транспорта Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Researcher ID: [B-7990-2019](https://orcid.org/0000-0002-4343-0444), [ivan.uspenskiy@yandex.ru](mailto:ivan.uspenskiy@yandex.ru)

**Юхин Иван Александрович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой автотракторной техники и теплоэнергетики Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>, Researcher ID: [Q-8188-2017](https://orcid.org/0000-0002-3822-0928), [yuival@rambler.ru](mailto:yuival@rambler.ru)

**Рамазанова Гюльбике Гудретдиновна**, кандидат технических наук, доцент кафедры природообустройства и водопользования Российского государственного университета народного хозяйства имени В. И. Вернадского (143907, Российская Федерация, г. Балашиха, ул. Шоссе Энтузиастов, д. 50), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2758-9479>, Researcher ID: [CPQ-5874-2022](https://orcid.org/0000-0003-2758-9479), [gulbike@yandex.ru](mailto:gulbike@yandex.ru)

**Гаджиев Имран Парвизович**, кандидат технических наук, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9073-5657>, [imgadjiev@mail.ru](mailto:imgadjiev@mail.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

П. И. Гаджиев – научное руководство, постановка задачи исследования.

И. А. Успенский – формулирование основной концепции исследования.

И. А. Юхин – разработка математической зависимости, критический анализ полученных результатов.

Г. Г. Рамазанова – постановка и проведение полнофакторного эксперимента, критический анализ полученных результатов.

И. П. Гаджиев – литературный и патентный анализ данных.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Uspensky I.A., Yukhin I.A., Machnev A.V., Golikov A.A. Creating an Integrated System of Potato Harvesters and Transport Vehicles. *Technique and Equipment for the Village*. 2021;(2):27–31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-27-31>

2. Kolchin N.N., Ponomarev A.G., Petukhov S.N. How to Reduce Damage to Tubers in Machine Technologies. *Potatoes and Vegetables*. 2019;(3):14–16. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.48.28.002>

3. Bayboboev N.G., Muxamedov J.M., Goyipov U.G., Akbarov Sh.B. Design of Small Potato Diggers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;1010(1):012080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1010/1/012080>

*Technologies, machinery and equipment*

4. Uspenskiy I.A., Rymbalovich G.K., Kostenko M.U., Beznosyuk R.V. Evaluation of a Promising Technological Scheme for a Potato Harvester. *Proceedings of the Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*. 2018;(1):262–269. Available at: <https://clck.ru/gfacv> (accessed: 02.15.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
5. Bachurin A.N., Ruzimurovov A.A., Kostenko M.Yu., Lipin V.D., Kalmykov D.V., Golahov A.A. Perfection of the Department of Potato Impurities Based on the Application of the Cross-Rotating Turneter of the Potato. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University*. 2019;(1):99–103. Available at: <https://clck.ru/37bBLz> (accessed: 15.02.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
6. Kuzmin A.V., Vambueva E.B., Bolokhoev V.S. Problems of Potato Tubers Damageability Decrease in the Process of Gathering. *Bulletin of KrasGAU*. 2009;(4):177–183. Available at: <https://clck.ru/37bBXD> (accessed: 15.02.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
7. Bolokhoev V.S. A Rationale for Parameters of a Potato Harvester Separating Mechanism Aimed at Tuber Damage Reducing. *Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy*. 2015;(1):51–57. Available at: <https://clck.ru/37mJZP> (accessed: 15.02.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
8. Zernov V.N., Petukhov S.N., Aksenov A.G., Siberjev A.V. The Main Objectives and Directions of Research to Reduce Damage to Potatoes and Vegetables in Machine Technologies of Their Production. *Agrotechnics and Energy Supply*. 2019;(4):6–16. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: TANUJF
9. Gadzhiev P.I., Ramazanova G.G., Gadzhiev I.P. Separating Elevator Operating Conditions Potato Harvesters on Wet Soils. *Science in Central Russia*. 2022;(2):98–106. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-2-98-106>
10. Wei Z.C., Li H.W., Mao Y.J., Sun C.Z., Li X.Q., Liu W.Z., et al. Experiment and Analysis of Potato-Soil Separation Based on Impact Recording Technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2019;12(5):71–80. Available at: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/4573> (accessed: 02.15.2023).
11. Gadzhiev P.I., Akhmedov I.O., Sorokin A.A., Petrov G.D., Chebotareva I.G. [Separating Working Body of Potato Harvesters]. Patent 2785297 Russian Federation. 2022 December 06. 7 p. (In Russ.)
12. Gadzhiev P.I., Makhmutov M.M., Khismatullina Yu.R., Ramazanova G.G., Shtayunda E.N., Makhmutov M.M., et al. [Separating Working Body of Potato Harvesters]. Patent 2785297 Russian Federation. 2022 December 06. 5 p. (In Russ.)
13. Uspenskiy I.A., Yukhin I.A., Gadzhiev P.I., Ramazanova G.G. Economic Efficiency of Potatoes Combine Harvesting Using the Intensifier of the Separating Elevator. *Bulletin of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev*. 2022;14(4):177–184. <https://doi.org/10.36508/RSA-TU.2022.88.19.023>
14. Gadzhiev P.I., Bashkirov A.P., Ramazanova G.G., Gadzhiev I.P., Shershnev N.S. Field Test Results of a Potato Harvestercombine KPK-2-01 Equipped with an Intensifier. *Science in the Central Russia*. 2022;(6):71–77. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-6-71-77>
15. Gadzhiev P.I., Shemyakin A.V., Uspenskiy I.A., Ramazanova G.G., Gadzhiev I.P. Exploring the Influence of a Paddle Intensifier on the Completeness of Separation. *Technique and Equipment for the Village*. 2023;(1):27–29. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-1-27-29>
16. Gadzhiev P.I., Gadzhiev I.P., Ramazanova G.G. Determining the Structural Parameters of the Intensifier and Conditions for Pushing Potato Tubers from the Gap between the Rods of Separating Elevators. *Agricultural Engineering*. 2023;25(1):17–22. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-17-22>

Submitted 24.03.2023; revised 04.04.2023; accepted 15.05.2023

About the authors:

**Parviz I. Gadzhiev**, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Dean of the Electrical Power Engineering and Technical Service Faculty of the Russian State University of National Economy named after V.I. Vernadsky (50 Shosse Entuziastov, Balashikha 143907, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6877-6126>, Researcher ID: DNC-7890-2022, [pgadjiev@yandex.ru](mailto:pgadjiev@yandex.ru)

**Ivan A. Uspenskiy**, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Chair of Technical Operation of Transport, Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Researcher ID: B-7990-2019, [ivan.uspensckij@yandex.ru](mailto:ivan.uspensckij@yandex.ru)

**Ivan A. Yukhin**, Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, Head of Chair of Machine Park Operation, Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>, Researcher ID: Q-8188-2017, [yuival@rambler.ru](mailto:yuival@rambler.ru)

**Gulbike G. Ramazanova**, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor of the Department of Environmental Engineering and Water Resources Management of the Russian State University of National Economy named after V.I. Vernadsky (50 Shosse Entuziastov, Balashikha 143907, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2758-9479>, Researcher ID: CPQ-5874-2022, [gulbike@yandex.ru](mailto:gulbike@yandex.ru)

**Imran P. Gadzhiev**, Cand.Sci. (Engr.), Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9073-5657>, [imgadjiev@mail.ru](mailto:imgadjiev@mail.ru)

*Authors contribution:*

P. I. Gadzhiev – scientific guidance, formulation of the research problem.

I. A. Uspensky – formulation of the main concept of the study.

I. A. Yukhin – development of mathematical dependence, critical analysis of the results obtained.

G. G. Ramazanova – setting up and conducting a full-factor experiment, critical analysis of the results.

I. P. Gadzhiev – literary and patent data analysis.

*All authors have read and approved the final manuscript.*