



## Кинематический и динамический анализ механизма машины для сортировки картофеля грохотного типа

**Гайрат Атаханович Бахадиров<sup>1</sup>**,  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: instmech@rambler.ru;  
**Бехзод Тургунпулатович Умаров<sup>1</sup>**,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: bexzodumarov@mail.ru;

**Исмоил Эсоналиевич Турсуналиев<sup>2</sup>**,  
докторант,  
e-mail: tursunaliyevismoil@gmail.com

<sup>1</sup>Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент, Республика Узбекистан;

<sup>2</sup>Ферганский государственный технический университет, г. Фергана, Республика Узбекистан

**Реферат.** Отметим, что сортировка представляет собой ключевой технологический этап производства картофеля. Минимизации повреждения клубней выступает основным критерием оценки эффективности сортировочных машин с эластичным покрытием рабочих поверхностей для снижения ударных нагрузок. (*Цель исследования*) Провести кинематический и динамический анализ механизма привода рабочего оборудования сортировочной машины *Tolsma* для оценки эксплуатационных характеристик в условиях картофелеводческого кластера *AGROVER* (Ташкентская область, Республика Узбекистан). (*Материалы и методы*) Методология направлена на оценку инерционных нагрузок, критичных с точки зрения минимизации повреждения клубней при сортировке, что согласуется с проблемой повышения качества работы машины. (*Результаты и обсуждение*) Проведен графический анализ вертикальной силы, действующей на клубни при колебаниях грохотов машины, показал. Как показал анализ, направление этой силы преимущественно совпадает с силой тяжести, что приводит к «забиванию» клубней в отверстия рабочей поверхности. Минимальная величина отталкивающих сил не обеспечивает эффективного перемещения продукции, усиливая риск повреждения из-за деформации эластичных покрытий и овальной формы клубней, которые действуют как клин. Установлено, что даже дополнительные механизмы не устраняют полностью проблему снижения производительности и травмирования клубней, связанную с инерционными нагрузками и геометрией грохотов. (*Выводы*) Результаты подтверждают выводы кинематического и динамического моделирования. Инерционные силы, возникающие при ускоренном движении грохотов, критически влияют на взаимодействие клубней с рабочими поверхностями, в связи с этим требуется оптимизация параметров сортировочной машины. **Ключевые слова:** сортировка овощей, калибровка, механизм, кинематика, динамика, грохот, инерционная сила, повреждение клубней.

■ **Для цитирования:** Бахадиров Г.А., Умаров Б.Т., Турсуналиев И.Э. Кинематический и динамический анализ механизма машины для сортировки картофеля грохотного типа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. №3. С. 4-9. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-4-9. EDN: UYGNLZ.

Scientific article

## Kinematic and Dynamic Analysis of the Mechanism of a Vibrating Screen Type Potato Sorting Machine

**Gayrat A. Bahadirov<sup>1</sup>**,  
Dr.Sc.(Eng.), professor,  
e-mail: instmech@rambler.ru;  
**Bexzod T. Umarov<sup>1</sup>**,  
Ph.D.(Eng.), associate professor,  
e-mail: bexzodumarov@mail.ru;

**Ismoil E. Tursunaliyev<sup>2</sup>**,  
Ph.D.(Eng.) student,  
e-mail: tursunaliyevismoil@gmail.com

<sup>1</sup>Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures named after M.T. Urazbaev of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan;

<sup>2</sup>Fergana State Technical University, Fergana, Republic of Uzbekistan

**Abstract.** Potato and onion sorting is a key technological stage in their production process. Minimizing tuber damage is a key criterion for evaluating the efficiency of sorting machines equipped with elastic coatings on their working surfaces designed to reduce impact loads. (*Research purpose*) The study aims to conduct kinematic and dynamic analysis of the drive mechanism of the Tolsma sorting machine's working unit to assess its performance under the operating conditions of the AGROVER potato production cluster (Tashkent region, Republic of Uzbekistan). (*Materials and methods*) The methodology focuses on evaluating inertial loads which are critical to minimizing tuber damage during sorting, aligning with the broader goal of improving the machine efficiency. (*Results and discussion*) A graphic analysis was conducted to examine the vertical force acting on tubers during screen oscillation. The results show that the direction of this force closely aligns with gravity, leading to tuber clogging within the holes of the working surface. The minimal repulsive forces fail to ensure efficient produce movement, increasing the risk of damage due to elastic coating deformation and the oval shape of the tubers, which act as wedges. Even additional mechanisms do not fully resolve the problems of reduced productivity and tuber damage associated with inertial loads and screen geometry. (*Conclusions*) The findings support the results of kinematic and dynamic modeling. Inertial forces generated by the accelerated movement of the screens critically affect tubers-surfaces interaction, necessitating machine parameters optimization.

**Keywords:** vegetable sorting, grading, mechanism, kinematics, dynamics, screen, inertial force, damage.

■ **For citation:** Bahadirov G.A., Umarov B.T., Tursunaliyev I.E. Kinematic and dynamic analysis of the mechanism of a vibrating screen type potato sorting machine. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N3. 4-9 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-4-9. EDN: UYGNLZ.

В мире требования к качественным характеристикам продовольственных продуктов постоянно растут. В последние годы принят ряд документов, направленных на упорядочение качества сельскохозяйственной продукции, в частности картофеля и репчатого лука, где четко указаны требования к их характеристикам, включая размеры. Также установлен способ калибровки картофеля путем прохождения клубней через квадратные отверстия определенного размера, а калибровка лука – по максимальному поперечному диаметру [1, 2].

В Центральной Азии (в частности, Узбекистане и Казахстане) на предприятиях и кластерах, специализирующихся на выращивании и переработке картофеля и лука, широко применяются калибровочные машины иностранного производства (*Grimme*, *Schouten* и *Tolsma*), рабочие органы которых имеют квадратные отверстия. Наиболее распространены модели *Tolsma* благодаря компактности и простоте конструкции, надежности по сравнению с другими типами, однако они имеют несколько недостатков. Наряду с общим для всех калибровочных машин застреванием клубней в отверстиях, специфической проблемой машин *Tolsma* является частый выход из строя муфты вала, передающего движение на рабочее оборудование, а также быстрое изнашивание и разрыв ремней привода [3-5]. На данный момент обслуживают эти машины преимущественно иностранные компании, и основные причины неисправностей, а также структура их механизмов не были изучены.

**Цель исследования.** Провести кинематический и динамический анализ механизма, приводящего в движение рабочее оборудование машины *Tolsma*, используемой в картофелеводческом кластере *AGROVER* (Ташкентская обл.). В результате анали-

за можно сделать вывод о взаимодействии между рабочей поверхностью машины и клубнями.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Рабочее оборудование машины состоит из нескольких (на рисунке 1 их пять, но может быть и три) взаимно параллельных и расположенных друг над другом грохотов, которые с обеих сторон прикреплены к раме машины с помощью двух коромысел. При запуске машины коромысло получает движение от кривошипно-шатунного механизма, и грохоты начинают колебаться вместе с коромыслом. Поскольку грохоты обладают определенной массой и совершают вращательное движение с ускорением, в них возникают инерционные силы и моменты инерционных сил, которые, в свою очередь, передаются на другие части машины. Также взаимодействие между клубнями и грохотами, движущимися с ускорением, усложняется. Для полного изучения процесса требуется кинематический и динамический анализ механизма машины. Поскольку все грохоты имеют одинаковые размеры и прикреплены к раме одинаковым образом, на начальном этапе проведен кинематический анализ только одного грохота.



Рис. 1. Калибровочная машина *Tolsma*

Fig. 1. *Tolsma* grading machine

Схема механизма передачи движения на грохот машины и траектории движения его звеньев показана на рисунке 2.

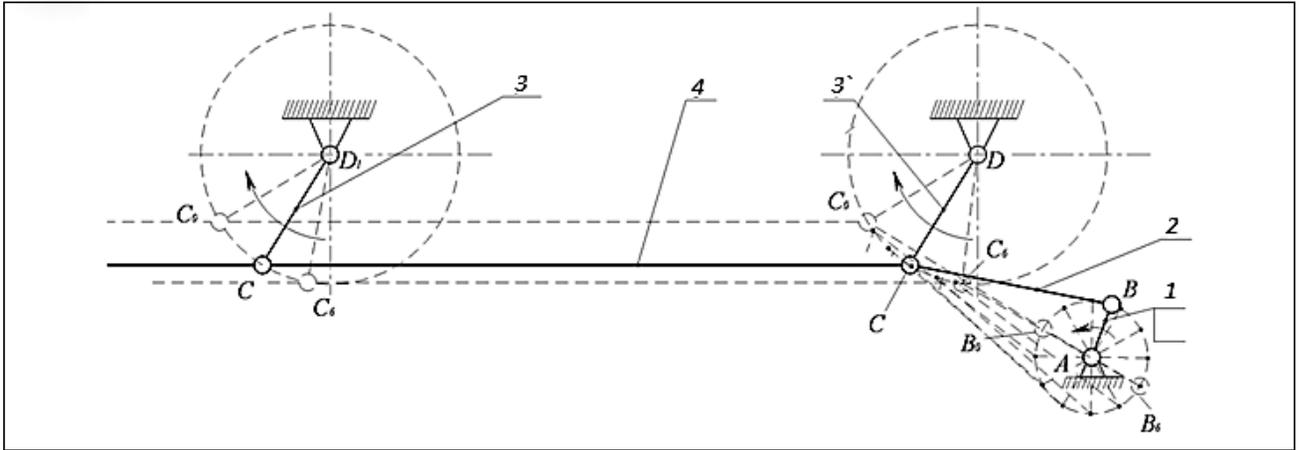


Рис. 2. Механизм передачи движения на грохот сортировочной машины: 1 – кривошип; 2 – шатун; 3, 3' – коромысло; 4 – грохот;

Fig. 2. Diagram showing the mechanism of transmitting motion to the sorting machine screen: 1 – crank; 2 – connecting rod; 3, 3' – rocker; 4 – screen

Степень подвижности механизма равна 1, т.е. его состояние можно выразить через положение кривошипа.

В механизме рабочим звеном является грохот, он прикреплен с обеих сторон к опоре через два коромысла одинаковой длины, расположенные под одинаковым углом относительно вертикали, и совершает возвратно-поступательное движение. Для кинематического анализа движения грохота достаточно изучить движение любой его точки  $C$ .

Кинематику этой точки  $C$ , которая относится к грохоту (поскольку точки сопряжения коромысел и грохота расположены друг над другом, и обозначены одной буквой  $C$  на рис. 2), будем анализировать с использованием аналитического метода (метод замкнутых контуров вектора) (рис. 3).

$$\varphi_4 = \arccos \frac{l_3^2 - l_2^2 - l_1^2 + 2l_1l_2 \cos \varphi_2 - l_4^2}{2l_4 \sqrt{l_2^2 + l_1^2 - 2l_1l_2 \cos \varphi_2}} - \arctan \frac{l_2 \sin \varphi_2}{l_1 - l_2 \cos \varphi_2} \quad (1)$$

Поскольку определить первую и вторую производную функции (1) по обобщенной координате  $\varphi_2$  сложно, целью кинематического анализа движения точки  $C$  является лишь понимание природы инерционных сил, то движение точки  $C$  будет рассматриваться графическим методом, а закон ее движения можно восстановить с использованием метода интерполяции.

Учитывая, что в схемах на рисунках 2 и 3 начальное положение кривошипа принято с разницей в  $30^\circ$ , получаем следующие выражения:

$$v_c = 78 \sin(\varphi_2 - 30), \quad (2)$$

$$a_c = 78 \cos(\varphi_2 - 30). \quad (3)$$

Основная цель кинематического анализа механизма заключается в определении величины и направления инерционных сил в его ключевых точ-

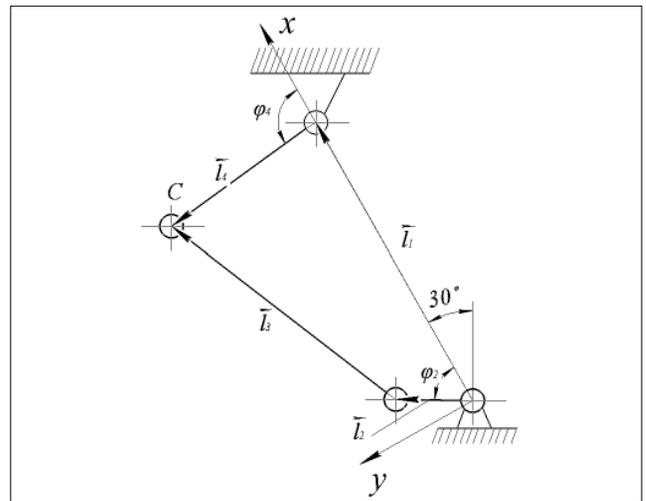


Рис. 3. Замкнутый контур векторов  
Fig. 3. Closed vector loop

ках, обладающих массой. Массу грохота машины и обрабатываемых продуктов  $m$  примем за сосредоточенную массу в точке  $C$  и определим действующие на нее силы.

На точку  $C$  (рис. 4) действуют:

- сила тяжести  $\vec{F}_{og'} = m\vec{g}$ , (4)
- сила, направленная противоположно нормальному ускорению (центробежная)

$$\vec{F}_n = m\vec{a}_n = m \frac{v_c^2}{l_4} = m \frac{6084 \sin^2(\varphi_2 - 30)}{l_4}, \quad (5)$$

- инерционная сила, направленная противоположно тангенциальному ускорению

$$\vec{F}_i = m\vec{a}_\tau = m\vec{a}_c = m78 \cos(\varphi_2 - 30). \quad (6)$$

Известно, что в возвратно-поступательном движении все точки тела имеют одинаковую кинематику. Силы (4)-(6) также действуют на элементы (т.е. клубни), расположенные на рабочей поверхности.

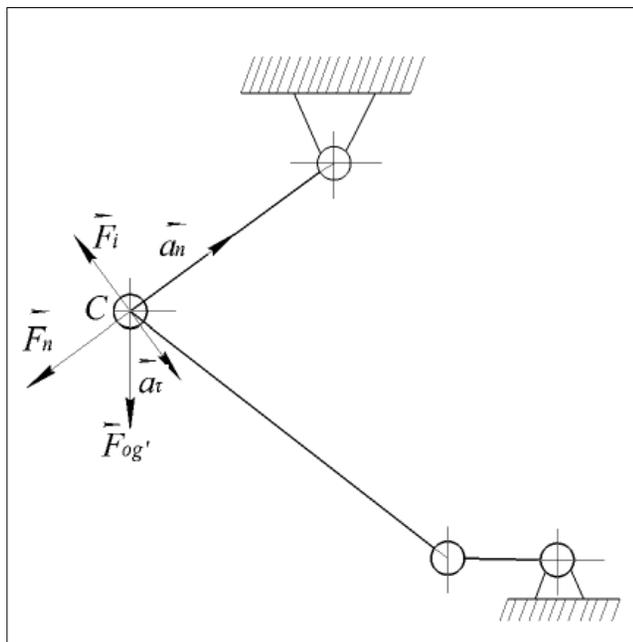


Рис. 4. Силы, действующие на точку C  
Fig. 4. Forces acting on point C

Определим силы, действующие на клубни в вертикальном направлении:

- вертикальная составляющая инерционной силы, возникающая за счет тангенциального ускорения, будет:

$$\vec{F}_{iv} = 78m \cos(\varphi_2 - 30) \cos(\varphi_4 - 60); \quad (7)$$

- вертикальная составляющая инерционной силы, возникающая за счет нормального ускорения:

$$\vec{F}_{nv} = m \frac{6084 \sin^2(\varphi_2 - 30)}{l_4} \cos(150 - \varphi_4); \quad (8)$$

- общая вертикальная сила, действующая на клубень в вертикальном направлении:

$$\vec{F}_{iv} = \vec{F}_{iv} + \vec{F}_{nv} + \vec{F}_{og'iv}. \quad (9)$$

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** На основе геометрических и кинематических параметров сортировочной машины получим график изменения вертикальной силы в зависимости от  $\varphi_2$  (рис. 5):  $l_1 = 0,4$  м,  $l_2 = 0,09$  м,  $l_3 = 0,3$  м,  $l_4 = 0,2$  м,  $\omega_2 = 25$  рад/с,  $0 \leq \varphi_2 \leq 2\pi$ .

Вертикальные силы, действующие на клубень за один оборот кривошипа, направлены в основном вниз (рис. 5). Прыжковое движение частицы вдоль грохота обусловлено частью сил, лежащих ниже горизонтальной оси. Эта сила, отталкивающая клубень от грохота, почти не видна на рисунке 5, поскольку она очень мала по сравнению с силой, толкающей клубень к грохоту.

Самым большим недостатком рассматриваемого типа машин является то, что клубни застревают под действием инерционных сил в рабочем оборудовании машины, и высок риск их повреждения.

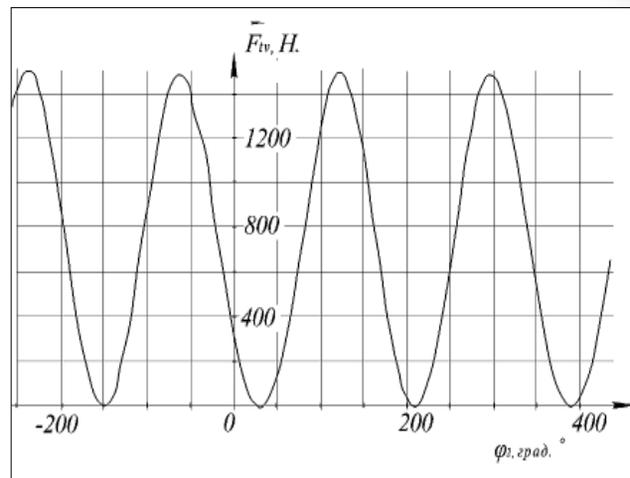


Рис. 5. Изменение вертикальной силы, действующей на клубни, в зависимости от состояния кривошипа, при этом масса клубня условно получена  $m = 0,1$  кг

Fig. 5. Variation of the vertical force acting on the tubers depending on the crank position, with the tuber mass conditionally set to  $m = 0.1$  kg.

Так как отверстия рабочего органа – грохота выполнены из эластичного материала, а картофельные и луковые клубни также деформируются под воздействием внешних сил, то клубень «забивается» в отверстия ударом за счет вертикального действия инерционных сил. Для устранения этого недостатка на машине установлен дополнительный механизм, что, однако, не исключает полностью «забивания» клубней в отверстия.

Из-за овальной геометрической формы клубни, поперечный размер которых больше размера отверстия, будут как «клин» входить в отверстия, когда их длинная ось перпендикулярна плоскости грохота. Этот дефект существенно влияет на производительность машины, увеличивая риск повреждения продукции в процессе сортировки и снижая проницаемость сортировочной поверхности. Полностью устранить застревание клубней картофеля дополнительными техническими средствами невозможно [6, 7].

#### Выводы

Грохотные сортировочные машины, разработанные компанией *Tolsma*, имеют ряд преимуществ. Однако именно при сортировке картофеля основным критерием, определяющим качество машины, являются показатели повреждения клубней в этом технологическом процессе [8-14]. Исследования показывают, что при сортировке на грохотных машинах повреждение клубней повышается. Поэтому основная цель дальнейших исследований состоит в устранении факторов, вызывающих повреждение клубней при сортировке на таких машин, с сохранением других преимущественных характеристик машины.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Bahadirov G., Sultanov T., Umarov B., Bakhadirov K. Advanced machine for sorting potatoes tubers. *IOP Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 883. 012132. DOI: 10.1088/1757-899x/883/1/012132.
2. Bahadirov G., Umarov B., Obidov N. et al. Justification of the geometric dimensions of drum sorting machine. *IOP Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 937. N3. 032043. DOI: 10.1088/1755-1315/937/3/032043.
3. Nie J., Wang Y., Li Y., Chao X. Artificial intelligence and digital twins in sustainable agriculture and forestry: a survey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2022. Vol. 46. N5. 5. DOI: 10.55730/1300-011X.3033.
4. Дорохов А.С., Мосяков М.А., Сазонов Н.В. Автоматизированная линия для послеуборочной обработки корнеплодов и картофеля // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N1. С. 22-26. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-22-26.
5. Иванов А.Г., Ерохин М.Н., Казанцев С.П. и др. Повышение эффективности грохотных картофелесортирующих машин путем совершенствования привода с модификацией алгоритма движения решет // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N2. С. 13-19. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-13-19.
6. Крюков М.Л., Зернов В.Н., Калинин Г.А. и др. Технология уборки и транспортировки семенного картофеля // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N1. С. 24-30. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-11-2-24-30.
7. Jia Sh., Liu G., Jia J., Yang T. Development and application of the intelligent seed processing technology and equipment. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. Vol. 15(4). 24-28. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-24-28.
8. Khan R. Artificial intelligence and machine learning in food industries: A study. *J Food Chem Nanotechnol*. 2022. Vol. 7. N3. 60-67. DOI:10.17756/jfcn.2021-114.
9. Danielak M., Przybył K., Koszela K. The need for machines for the nondestructive quality assessment of potatoes with the use of artificial intelligence methods and imaging techniques. *Sensors*. 2023. Vol. 23. N4. 1787. DOI: 10.3390/s23041787.
10. Haverkort A.J., Struik P.C., Linnemann A.R., Wiskerke J.S.C. On processing potato 3: survey of performances, productivity and losses in the supply chain. *European Potato Journal*. 2023. Vol. 66. N2. 385-427. DOI: 10.1007/s11540-022-09576-7.
11. Cortiello M., Sanfelici A., Milc J.A., Martini S. Genotype and plant biostimulant treatments influence tuber size and quality of potato grown in the pedoclimatic conditions in Northern Apennines in Italy. *International Journal of Plant Production*. 2024. 18(36). 1-21. DOI: 10.1007/s42106-024-00311-5.
12. Коротченя В.М., Ценч Ю.С., Лобачевский Я.П. Система машин как фактор научно-технического прогресса в агропромышленном комплексе // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2024. N4. С. 67-72. DOI: 10.31857/S250026272404012.
13. Измайлов А.Ю., Колчин Н.Н., Лобачевский Я.П., Кынев Н.Г. современные технологии и специальная техника для картофелеводства. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. N3. С. 43-47. EDN: TTLVUJ.
14. Orlando Guerrero I. J. et al. Embedded vision system controlled by dual multi-frequency tones. *Proceedings ICITA*. 2023. 593-603. DOI: 10.1007/978-981-19-9331-2\_51.

**REFERENCES**

1. Bahadirov G., Sultanov T., Umarov B., Bakhadirov K. Advanced machine for sorting potatoes tubers. *IOP Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 883. 012132 (In English). DOI: 10.1088/1757-899x/883/1/012132.
2. Bahadirov G., Umarov B., Obidov N. et al. Justification of the geometric dimensions of drum sorting machine. *IOP Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 937. N3. 032043 (In English). DOI: 10.1088/1755-1315/937/3/032043.
3. Nie J., Wang Y., LI Y., Chao X. Artificial intelligence and digital twins in sustainable agriculture and forestry: a survey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2022. Vol. 46. N5. 5 (In English). DOI: 10.55730/1300-011X.3033.
4. Dorokhov A.S., Mosyakov M.A., Sazonov N.V. Automated line for post-harvest processing of root crops and potatoes. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N1. 22-26 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-22-26.
5. Ivanov A.G., Erokhin M.N., Kazantsev S.P. et al. Improving the efficiency of screen type potato sorting machines by a modification of the sieve drive movement algorithm. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N2. 13-19 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-13-19.
6. Kryukov M.L., Zernov V.N., Kalinkin G.A. et al. Seed potatoes harvesting and transportation technology. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017. Vol. 2. 24-30 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2017-2-24-30.
7. Jia Sh., Liu G., Jia J., Yang T. Development and application of the intelligent seed processing technology and equipment. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. Vol. 15(4). 24-28 (In English). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-24-28.
8. Khan R. Artificial intelligence and machine learning in food industries: A study. *J Food Chem Nanotechnol*. 2022. Vol. 7. N3. 60-67 (In English). DOI: 10.17756/jfcn.2021-114.
9. Danielak M., Przybył K., Koszela K. The need for machines for the nondestructive quality assessment of potatoes with the use of artificial intelligence methods and imaging techniques. *Sensors*. 2023. Vol. 23. N4. 1787 (In English). DOI: 10.3390/s23041787.
10. Haverkort A.J., Struik P.C., Linnemann A.R., Wiskerke J.S.C. On processing potato 3: survey of performances, productivity and losses in the supply chain. *European*

- Potato Journal*. 2023. Vol. 66. N2. 385-427 (In English). DOI: 10.1007/s11540-022-09576-7.
11. Cortiello M., Sanfelici A., Milc J.A., Martini S. Genotype and plant biostimulant treatments influence tuber size and quality of potato grown in the pedoclimatic conditions in Northern Apennines in Italy. *International Journal of Plant Production*. 2024. 18(36). 1-21 (In English). DOI: 10.1007/s42106-024-00311-5.
12. Korotchenya V.M., Tsench Yu.S., Lobachevsky Ya.P. The machine system as a factor of scientific and technological progress in agro-industrial complex. *Rossiiskaia selskokhoziaistvennaia nauka*. 2024. N4. 67-72 (In Russian). DOI: 10.31857/S250026272404012.
13. Izmaylov A.Yu., Kolchin N.N., Lobachevskiy Ya.P., Kynev N.G. Modern technologies and special equipment for potato production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2015. N3. 43-47 (In Russian). EDN: TTLVUJ.
14. Orlando Guerrero I. J. et al. Embedded vision system controlled by dual multi-frequency tones. *Proceedings ICITA*. 2022. 593-603 (In English). DOI: 10.1007/978-981-19-9331-2\_51.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

**Заявленный вклад соавторов:**

Бахадиров Г.А. – постановка задачи, теоретический анализ, подготовка рукописи;  
Турсуналиев И.Э. – проведение экспериментов, сбор и обработка данных;  
Умаров Б.Т. – статистическая обработка результатов, редактирование текста.  
*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Coauthors' contribution:**

Bahadirov G.A. – problem formulation, theoretical analysis, manuscript preparation;  
Tursunaliev I.E. – conducting experiments, data collection and processing;  
Umarov B.T. – statistical analysis of results, manuscript revision.  
*The authors read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию  
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on  
The paper was accepted for publication on

30.06.2025  
19.08.2025