

Повышение эффективности грохотных картофелесортирующих машин путем совершенствования привода с модификацией алгоритма движения решет

Алексей Генрихович Иванов¹,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой, e-mail: ivalgen@inbox.ru;
Михаил Никитьевич Ерохин²,
доктор технических наук, профессор,
академик РАН, e-mail: n.erohin@rgau-msha.ru;
Сергей Павлович Казанцев²,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой, e-mail: smdm@rgau-msha.ru;

Павел Владимирович Дородов¹,
доктор технических наук, доцент, профессор,
e-mail: pvd80@mail.ru;
Ильхам Ильгизович Хузяхметов¹,
аспирант, e-mail: ilham_huzyahmetov@mail.ru;
Ильшат Тагирович Хакимов¹,
аспирант, e-mail: ilshat.1996@yandex.ru

¹Удмуртский государственный аграрный университет», г. Ижевск, Российская Федерация;

²Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

Реферат. Рассмотрели перспективную и эффективную картофелесортировку грохотного типа, входящую в состав механизированного комплекса для послеуборочной обработки и хранения картофеля. Подчеркнули актуальность разработки эффективных методик проектирования и расчета сортирующего устройства, разделяющего клубни картофеля на фракции по размерам. (*Цель исследования*) Усовершенствовать привод калибрующей машины путем модификации закономерностей движения решет для повышения эффективности ее функционирования. (*Материалы и методы*) Задействовали методы критического анализа теории механизмов и машин с целью проектирования оптимальной конструкции привода сортировки картофеля грохотного типа. Предложили использовать двухкулисный механизм привода решет. Для сравнения закономерностей движения решет грохота применили коэффициент эффективности, рассчитав его для двух вариантов привода. (*Результаты и обсуждение*) Доказали, что коэффициент эффективности решет в грохоте с двухкулисным механизмом привода равен 0,30-1,65, а в случае устройства с кривошипным приводом – 0,27-1,35. (*Выводы*) Рекомендовали использовать более низкую скорость приводного вала – 13,12-14,76 радиана в секунду, тогда как у кривошипного механизма привода угловая скорость кривошипа составляет 20 радиан в секунду. Углы установки решет следует выбирать в интервале 6-8 градусов.

Ключевые слова: сортирование картофеля, фракции клубней, картофелесортировальный пункт, сортировальная машина грохотного типа, двухкулисный привод, эффективность.

■ **Для цитирования:** Иванов А.Г., Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Дородов П.В., Хузяхметов И.И., Хакимов И.Т. Повышение эффективности грохотных картофелесортирующих машин путем совершенствования привода с модификацией алгоритма движения решет // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №2. С. 13-19. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-13-19. EDN ULMZDJ.

Improving the Efficiency of Screen Type Potato Sorting Machines by a Modification of the Sieve Drive Movement Algorithm

Aleksey G. Ivanov¹,
Ph.D.(Eng.), associate professor, head of department,
e-mail ivalgen@inbox.ru;
Mikhail N. Erokhin²,
Dr.Sc.(Eng.), professor, member of the Russian Academy
of Sciences, e-mail: n.erohin@rgau-msha.ru;
Sergey P. Kazantsev²,
Dr.Sc.(Eng.), professor; head of department,
email: smdm@rgau-msha.ru;

Pavel V. Dorodov¹,
Dr.Sc.(Eng.), associate professor, professor,
email: pvd80@mail.ru;
Ilkham I. Khuzyakhmetov¹,
Ph.D. student (Eng.),
e-mail: ilham_huzyahmetov@mail.ru;
Ilshat T. Khakimov¹,
Ph.D. student (Eng.), e-mail: ilshat.1996@yandex.ru

¹Federal state budget education institution for higher education «Udmurt state agricultural university», Izhevsk, Russian Federation

²Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper considers a promising and effective screen-type potato sorting, included in the mechanized complex for potato post-harvest processing and storage. The main technological equipment of potato sorting stations is a sorting device that separates potato tubers into size fractions. The paper emphasizes the relevance of developing effective methods for designing and calculating the parameters of this type sorting devices. (*Research purpose*) To upgrade the sizing machine drive by modifying the sieve movement patterns for improving its operation efficiency. (*Materials and methods*) The present research exploits the critical analysis methods of the theory of mechanisms and machines in order to design the optimal design of a sieve-type potato sorting drive. It is proposed to use a two-stage drive mechanism. To compare the movement patterns of the screen sieves, the efficiency coefficient has been calculated for two drive options. (*Results and discussion*) It is obtained that the sieve efficiency coefficient is 0.30-1.65 for a screen type sorting device with a two-stage drive mechanism, and equals 0.27-1.35 for a screen type sorting device with a crank drive mechanism. (*Conclusions*) It is recommended to use a lower drive shaft speed of – 13.12-14.76 radians per second, at the crank angular velocity of 20 radians per second in the crank drive mechanism. The sieve mounting angles are to be set within 6-8 degrees.

Keywords: potato sorting, tuber fractions, potato sorting station, screen type sorting machine, a two-stage drive mechanism, efficiency.

■ **For citation:** Ivanov A.G., Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Dorodov P.V., Khuzyakhmetov I.I., Khakimov I.T. Povyshenie effektivnosti grokhotnykh kartofelesortiruyushchikh mashin putem sovershenstvovaniya privoda s modifikatsiy algoritma dvizheniya reshet [Improving the efficiency of screen type potato sorting machines by a modification of the sieve drive movement algorithm]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N2. 13-19 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-13-19. EDN ULMZDJ.

Картофель широко распространен в России, его возделывают как продовольственную, кормовую, техническую культуру [1, 2]. Его можно долго хранить без глубокой консервации. Однако именно хранение остается слабым звеном при использовании клубнеплодов [3-5]. Закладка вороха картофеля сразу в хранилище прямо с поля приводит к потерям из-за высокой влажности, наличия большого количества почвенных примесей, некондиционных и больших клубней.

Важнейшее значение приобретает послеуборочная доработка вороха на картофелесортировальных пунктах, основу которых составляют сортирующие устройства [6-8]. В России и других странах широко применяют грохотные сортирующие устройства. Они отличаются хорошей производительностью, простой конструкции, удобством эксплуатации и низким удельным энергопотреблением [9-14]. Разработка эффективных методик проектирования и расчета таких машин с возможностью их внедрения в производство остается актуальной задачей [1, 2, 15-18]. Поэтому объектом нашего исследования стала перспективная и эффективная картофелесортировка грохотного типа, входящая в состав механизированного комплекса для послеуборочной обработки и хранения картофеля.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ – усовершенствовать привод калибрующей машины путем модификации закономерностей движения решет для повышения ее эффективности.

Задачи исследований:

- провести анализ работы грохотных калибрующих машин;
- доказать перспективность направления их развития в ходе совершенствования закономерностей движения решет грохотных калибрующих машин при использовании двухкулисного механизма привода;
- обосновать параметры движения решет с новым приводом и провести сравнение с кривошипным механизмом по предлагаемому авторами коэффициенту эффективности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Использовали методы критического анализа теории механизмов и машин с целью проектирования оптимальной конструкции привода сортировки картофеля грохотного типа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. В качестве исследуемого объекта рассмотрели привод сортировки картофеля грохотного типа (*рис. 1*).

Работа сортировки основана на принципе параллельного выделения фракций, в данном случае – трех. При помощи подающего транспортера общая масса картофеля поступает на верхнее решето с крупными отверстиями. Клубни с размерами менее ширины отверстия проваливаются на нижнее решето, где происходит выделение мелкой фракции. Оставшиеся на поверхности решет клубни в результате колебаний сходят в свои лотки.

В процессе работы грохотной установки ее рабочий орган выполняет две функции – калибрует и транспортирует материал, что предъявляет к механизму

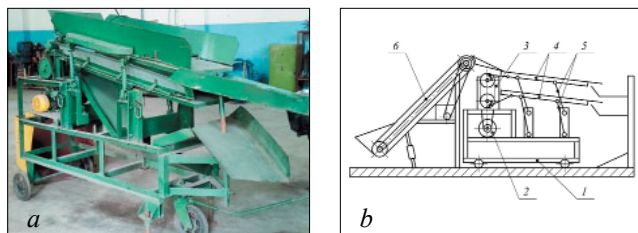


Рис. 1. Сортировальная машина грохотного типа: а – общий вид; б – схема: 1 – рама; 2 – асинхронный электродвигатель; 3 – привод с кривошипами; 4 – решета; 5 – поводки; 6 – подающий транспортер

Fig. 1. Screen potato sorter: a – general view; b – diagram: 1 – frame; 2 – asynchronous electric motor; 3 – drive with cranks; 4 – sieves; 5 – leashes; 6 – feeding conveyor

противоположные требования. Большая производительность будет обеспечена при быстром ходе клубней картофеля с решета, а высокая точность разделения на фракции – при достаточно длительном нахождении клубней на решетке.

Для привода решет с колебательным движением используют кривошипно-шатунные схемы – с регулируемой частотой вращения и переменным радиусом кривошипа. Однако такой механизм не может реализовать весь потенциал калибрующей машины. Повысить ее эффективность можно в случае более частой смены знака ускорения привода [19, 20]. Предлагается использовать муфту с двухкулисным механизмом привода, который может обеспечить модифици-

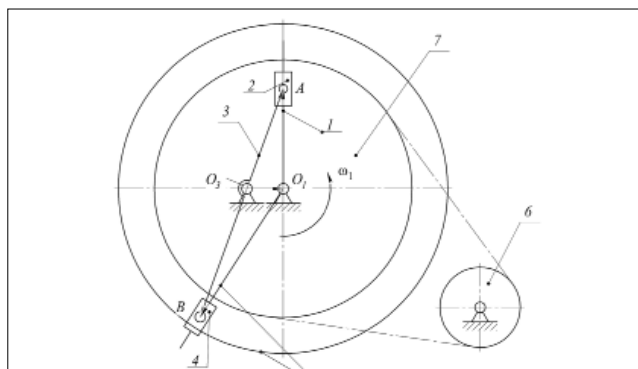


Рис. 2. Двухкулисный механизм привода кривошипов: 1 – входной кривошип, жестко связанный с ведомым шкивом; 2, 4 – камни; 3 – коромысло; 5 – кулиса, жестко связанная с кривошипом привода решет; 6 – шкив ведущий; 7 – шкив ведомый, связанный с входным кривошипом; O_1 – ось кривошипа 1; O_3 – ось коромысла 3; А – кинематическое соединение звеньев 1 и 2; В – кинематическое соединение звеньев 3 и 4; ω_1 – угловая скорость кривошипа 1

Fig. 2. Two-stage crank drive mechanism: 1 – input crank rigidly connected to the driven pulley; 2, 4 – stones; 3 – rocker arm; 5 – a backstage rigidly connected to the crank of the sieve drive; 6 – drive pulley; 7 – driven pulley connected to input crank O_1 , O_3 , A, B – kinematic pairs (movable joints of links); O_1 – crank axis 1; O_3 – rocker arm axis 3; A – kinematic connection of links 1 and 2; B – kinematic connection of links 3 and 4; ω_1 – angular velocity of crank 1

рованные алгоритмы движения решет [15] (рис. 2).

По результатам кинематического анализа данного механизма определены примерные зависимости углов поворота от размеров звеньев [15, 19, 21-23] (рис. 3).

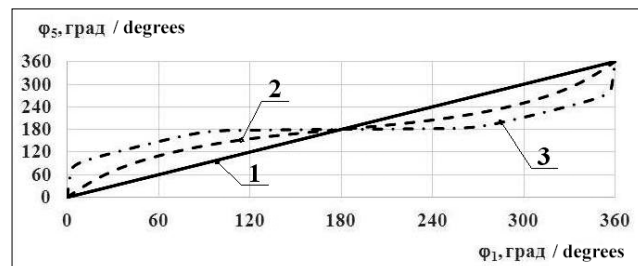


Рис. 3. Зависимость угла φ_5 поворота кривошипа (выходного звена) от угла поворота φ_1 входного кривошипа при смещении оси O_3 относительно оси O_1 (радиус $O_3A = 0,03$ м): 1 – без смещения осей O_1 и O_3 ; 2 – со смещением оси O_3 относительно оси O_1 вправо на 0,014 м; 3 – со смещением оси O_3 относительно оси O_1 вправо на 0,029 м

Fig. 3. The dependence of the crank rotation angle – φ_5 (output link) on the input crank rotation angle – φ_1 when O_3 axis is displaced against O_1 axis (O_3A radius = 0.03 m): 1 – without a displacement of O_1 and O_3 axes; 2 – with a 0.014 m displacement of O_3 axis against O_1 axis to the right; 3 – with a 0.029 m displacement of O_3 axis against O_1 axis to the right

Углы поворота звеньев 3 и 5 рассчитывали в куочно-заданном виде, учитывая несколько вариантов:

$$\varphi_3 = \begin{cases} \arccos\left(\frac{O_1A \sin \varphi_1}{O_3O_1 + O_1A \cos \varphi_1}\right), & \text{при } \varphi_1 < \pi - \arccos \frac{O_3O_1}{O_1A}; \\ \frac{\pi}{2}, & \text{при } \varphi_1 = \pi - \arccos \frac{O_3O_1}{O_1A}; \\ \pi + \arccos\left(\frac{O_1A \sin \varphi_1}{O_3O_1 + O_1A \cos \varphi_1}\right), & \\ \text{при } \pi - \arccos \frac{O_3O_1}{O_1A} < \varphi_1 < \pi + \arccos \frac{O_3O_1}{O_1A}; \\ \frac{3\pi}{2}, & \text{при } \varphi_1 = \pi + \arccos \frac{O_3O_1}{O_1A}; \\ 2\pi + \arccos\left(\frac{O_1A \sin \varphi_1}{O_3O_1 + O_1A \cos \varphi_1}\right), & \text{при } \pi + \arccos \frac{O_3O_1}{O_1A} < \varphi_1 \leq 2\pi. \end{cases} \quad (1)$$

$$\varphi_5 = \begin{cases} \pi + \arccos\left(\frac{O_3B \sin(\pi + \varphi_3)}{-O_1O_3 + O_3B \cos(\pi + \varphi_3)}\right), & \text{при } \varphi_3 < \pi - \arccos \frac{O_1O_3}{O_3B}; \\ \frac{3\pi}{2}, & \text{при } \varphi_3 = \pi - \arccos \frac{O_1O_3}{O_3B}; \\ 2\pi + \arccos\left(\frac{O_3B \sin(\pi + \varphi_3)}{-O_1O_3 + O_3B \cos(\pi + \varphi_3)}\right), & \\ \text{при } \pi - \arccos \frac{O_1O_3}{O_3B} < \varphi_3 < \pi + \arccos \frac{O_1O_3}{O_3B}; \\ \frac{\pi}{2}, & \text{при } \varphi_3 = \pi + \arccos \frac{O_1O_3}{O_3B}; \\ 3\pi + \arccos\left(\frac{O_3B \sin(\pi + \varphi_3)}{-O_1O_3 + O_3B \cos(\pi + \varphi_3)}\right), & \\ \text{при } \pi + \arccos \frac{O_1O_3}{O_3B} < \varphi_3 \leq 2\pi. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь все отрезки соответствуют размерам звеньев механизма (рис. 2). Первые и вторые производные углов (1) и (2) являются угловыми скоростями и угловыми ускорениями этих звеньев. Далее известными методами исследования кинематики кривошипных механизмов находили закономерности движения решет и клубней.

Влияние величины смещения осей O_3O_1 на вращение кривошипа по отношению к вращению приводного вала очень существенно (рис. 3). Для оценки эффективности движения решет предложили использовать обобщенный коэффициент, который определяется по формуле:

$$K = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (V_i - \langle V \rangle)^2} \cdot \frac{L^2}{T^2} = \frac{n \cdot \langle V \rangle^2}{\sum_{i=1}^n (V_i - \langle V \rangle)^2} \quad (3)$$

где n – число фиксируемых моментов времени t_i ;

V_i – скорость центра масс компонента (клубня), вычисленная в моменты времени t_i , м/с;

$\langle V \rangle$ – средняя за время схода скорость центра масс компонента, м/с;

L – длина решета, м;

T – среднее время схода компонентов с решета, с; причем:

$n / (\sum_{i=1}^n (V_i - \langle V \rangle)^2)$ – квадрат среднего отклонения скорости от среднего значения, $\text{м}^2/\text{с}^2$.

Работа грохота представляет собой стохастический процесс, в котором клубни картофеля попадают на решето случайным образом. Начало их движения происходит в разные фазы поворота кривошипа. Заданная закономерность движения решета определяется средним значением $\langle K \rangle$ всех коэффициентов эффективности, вычисленных при разных начальных условиях.

Для расчета радиус кривошипа принимается равным 32 мм, ход решета – 65 мм. Варьируемые величины – угловая скорость кулачка ω и угол наклона решет γ .

Результаты физического моделирования движения клубня по решетку грохота при двухкулидном механизме привода в сравнении с кривошипным представили в виде графиков ускорения решета a , скорости V и перемещения центра масс S (рис. 4).

Привод с двухкулисным механизмом обеспечивает более интенсивное перемещение модели клубня по сравнению с кривошипным приводом вследствие большего количества изменений знака ускорения решет, приходящихся на один оборот приводного вала.

В первом случае за 4 оборота приводного вала клубень, при нулевой начальной скорости центра масс, перемещается на 0,4 м, а во втором случае – только на 0,1 м. При этом в варианте кривошипного цикла максимумы изменения скорости центра масс клубня ухудшают процесс калибровки картофеля на отдельные фракции. Колебания ускорений решет близки к гармоническому (синусоидальному) закону.

В случае кривошипного механизма клубни интенсивно перемещаются как в сторону схода, так и назад. При таких колебаниях они не успевают сориентироваться в отверстиях решета, скорость транспортирования снижается.

Предлагаемый двухкулисный механизм обеспечивает более плавное изменение скорости, достаточное

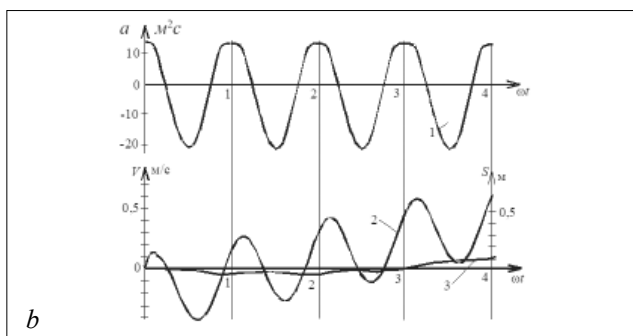
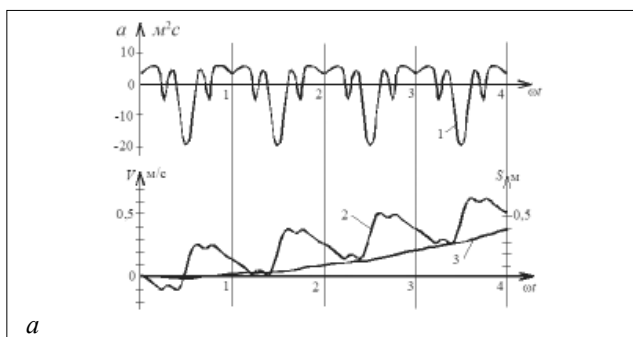


Рис. 4. Движение модели клубня: а – при двухкулидном механизме привода; б – при кривошипном механизме привода; 1 – ускорение решета; 2 – скорость клубня; 3 – перемещение центра масс

Fig. 4. Tuber model movement: a – with a two-stage drive mechanism; b – with a crank drive mechanism; 1 – sieve acceleration; 2 – tuber speed; 3 – a center-of-mass displacement

время для надежного ориентирования компонентов картофельной смеси в отверстиях решета и более закономерное смещение клубней в сторону схода. Плавное и направленное движение по поверхности решета повышает точность калибрования, ускоряет сход с решета, что повышает производительность машины.

Результаты расчетов коэффициента эффективности K по формуле (3) для рассматриваемых механиз-

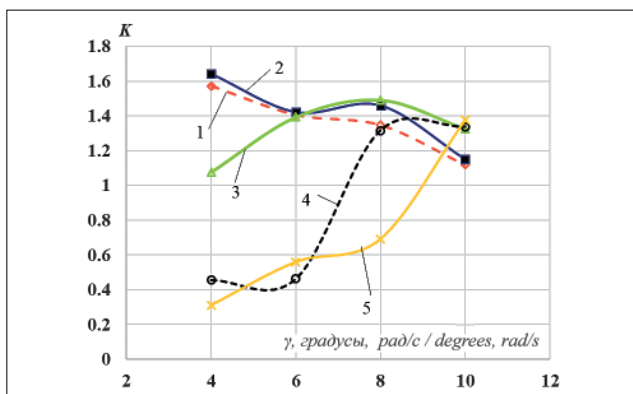


Рис. 5. Зависимость коэффициента эффективности K двухкулисного механизма привода от угла наклона решета γ рад/с: 1 – 13,12; 2 – 14,76; 3 – 16,40; 4 – 18,04; 5 – 19,68

Fig. 5. Dependence of the efficiency coefficient K of the two-stage drive mechanism on the sieve inclination angle γ rad/s: 1 – 13,12; 2 – 14,76; 3 – 16,40; 4 – 18,04; 5 – 19,68

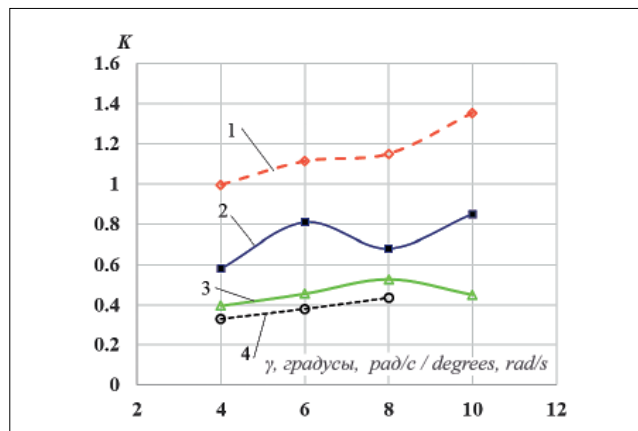


Рис. 6. Зависимость коэффициента эффективности K кривошипного механизма привода от угла наклона решета γ рад/с: 1 – 20,0; 2 – 22,5; 3 – 25,0; 4 – 27,5

Fig. 6. The dependence of the efficiency coefficient K of the crank drive mechanism on the sieve inclination angle γ rad/s: 1 – 20,0; 2 – 22,5; 3 – 25,0; 4 – 27,5

мов привода изобразили графически (рис. 5 и 6).

Угловая скорость кривошипа изменялась в пределах 0,8-1,2 рад/с, с учетом расчетной номинальной угловой скорости ω_n при заданном ходе решета. Углы наклона решета γ имели интервал варьирования 4-10° [15, 20]. Эффективность предлагаемого привода грохота с двухкулисным механизмом выше ($K = 0,3-1,65$) в сравнении с кривошипным ($K = 0,27-1,35$). При этом номинальная угловая скорость ω_n меньше на 34% (16,4

и 25,0 рад/с соответственно), что положительно сказывается на снижении уровня шума и вибраций машины.

Уменьшение угловой скорости приводного вала двухкулисного механизма до 13,12-14,76 рад/с снижает скорость клубней, улучшает условия для их разделения на фракции и, соответственно, повышает эффективность ($K = 1,18-1,65$). Однако, если угол наклона решета превышает 8°, а угловая скорость приводного вала больше расчетной номинальной, то эффективность снижается ($K < 1$). Такие режимы работы приводного механизма не рекомендуются к практическому применению.

Выводы

1. Перспективное направление совершенствования грохотных калибрующих машин – использование колебаний решет с несколькими переменами знака ускорений, приходящихся на один оборот приводного вала. Обеспечить такие алгоритмы может двухкулисный механизм привода решет.

2. Для предлагаемого варианта привода решет следует подбирать угловую скорость приводного вала, равную 13,12-14,76 рад/с, и устанавливать решета под углом 6-8°.

3. Расчеты показали, что применение в грохоте двухкулисного механизма в сравнении с существующим приводом решет повысит его эффективность на 11-22%, что необходимо проверить экспериментально на разработанной калибрующей машине.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Tikhomirov D., Izmailov A., Lobachevsky Y., Tikhomirov A. Energy consumption optimization in agriculture and development perspectives. *Research anthology on clean energy management and solutions*. 2021. 1505-1525.
- Izmaylov A.Y., Lobachevsky Y.P., Tikhomirov D.A., Tikhomirov A.V. The state, promising directions and strategies for the development of the energy base of agriculture. *Agricultural mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020. Vol. 51. N3. 24-35.
- Dorokhov A., Ponomarev A., Zernov V., et al. The results of laboratory studies of the device for evaluation of suitability of potato tubers for mechanized harvesting. *Applied sciences (Switzerland)*. 2022. Vol. 12. N4.
- Колчин Н.Н. Комплексы машин и оборудования для послеуборочной обработки картофеля и овощей. М.: Машиностроение. 1982. 268 с.
- Петров Г.Д., Бекетов П.В. Механизация возделывания и уборки овощей. М.: Колос. 1983. 287 с.
- Колчин Н.Н. Механизация работ в хранилищах картофеля и овощей. М.: Агропромиздат. 1985. 191 с.
- Останин Р.И., Костин А.В., Лебедев Л.Я. и др. Механизированный комплекс для послеуборочной обработки и хранения картофеля // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. N2(66). С. 56-64.
- Salimzyanov M., Pervushin V., Shakirov R., Kalimullin M. Improvement of technology and machines for growing potatoes in agriculture. *Engineering for rural development*. 2020. 9. 1423-1430.
- Dorokhov A., Aksenov A., Sibirev A., et al. Results of laboratory studies of the automated sorting system for root and onion crops. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. N6. 1257.
- Лебедев Л.Я., Арсланов Ф.Р. Отделитель почвенных примесей для обработки картофеля // *Научное обеспечение инженерно-технической системы АПК: проблемы и перспективы: Материалы национальной науч.-практ. конф., 11-13 декабря 2019 г. Ижевск*. 2020. С. 197-202.
- Khamaletdinov R., Martynov V., Mudarisov S., et al. Substantiation of rational parameters of the root crops separator with a rotating inner separation surface. *Journal of Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 51. N1. 15-20.
- Колчин Н.Н., Петухов С.Н. Исследования процесса сортирования клубней картофеля // *Картофель и овощи*. 2018. N9. С. 22-25.
- 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.
- Дорохов А.С., Мосяков М.А., Сазонов Н.В. Разработка

- автоматизированной линии послеуборочной обработки картофеля для хозяйств населения // *Агроинженерия*. 2020. N2(96). С. 16-22.
15. Иванов А.Г., Максимов П.Л., Максимов Л.М. и др. Применение методов механики к исследованию рабочих процессов калибрующих устройств для картофеля: монография. Ижевск: Цифра. 2021. 260 с.
 16. Ерохин М.Н., Максимов П.Л., Дородов П.В. Повышение конструкционной надежности копателя-сборщика картофеля // *Тракторы и сельхозмашины*. 2015. N2. С. 8-12.
 17. Казанцев С.П., Матвеев В.А., Мельников О.М. Проектирование приводов стационарных сельскохозяйственных машин. М.: Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2018. 140 с.
 18. Измайлов А.Ю., Колчин Н.Н., Лобачевский Я.П., Кынев Н.Г. Современные технологии и специальная техника для картофелеводства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. N2. С. 45-48.
 19. Васильченко М.Ю., Поробова О.Б., Сергеев А.А. Математическая модель движения клубня картофеля по решетке грохота // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2016. N3(48). С. 50-55.
 20. Боровиков Ю.А., Васильченко М.Ю., Иванов А.Г., Поробова О.Б. Использование коэффициента эффективности для оптимизации параметров шарнирно-стержневого механизма грохота // *Вестник Челябинского агроинженерного университета*. 2004. Т. 41. С. 43-49.
 21. Иванов А.Г., Шакиров Р.Р., Марков Д.А. и др. Кинематика транспортерного сортирующего устройства с переменной скоростью вращения рабочего органа // *Сельский механизатор*. 2022. N11. С. 18-22.
 22. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Марченко О.С., Ценч Ю.С. Создание инновационной техники и ресурсосберегающих технологий производства кормов – основа развития животноводства // *Вестник МГАУ им. В.П. Горячкина*. 2017. N82. С. 23-28.
 23. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С., Бейлис В.М. Создание и развитие систем машин и технологий для комплексной механизации технологических процессов в растениеводстве // *История науки и техники*. 2019. N12. С. 46-55.

REFERENCES

1. Tikhomirov D., Izmailov A., Lobachevsky Y., Tikhomirov A. Energy consumption optimization in agriculture and development perspectives. *Research anthology on clean energy management and solutions*. 2021. 1505-1525 (In English).
2. Izmaylov A.Y., Lobachevsky Y.P., Tikhomirov D.A., Tikhomirov A.V. The state, promising directions and strategies for the development of the energy base of agriculture. *Agricultural mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020. Vol. 51. N3. 24-35 (In English).
3. Dorokhov A., Ponomarev A., Zernov V., et al. The results of laboratory studies of the device for evaluation of suitability of potato tubers for mechanized harvesting. *Applied sciences* (Switzerland). 2022. Vol. 12. N4 (In English).
4. Kolchin N.N. Kompleksy mashin i oborudovaniya dlya posleuborochnoy obrabotki kartofelya i ovoshchey [Machines complexes and equipment for post-harvest processing of potatoes and vegetables]. Moscow: Mashinostroenie. 1982. 268 (In Russian).
5. Petrov G.D., Beketov P.V. Mekhanizatsiya vozdeyviyaniya i uborki ovoshchey [Mechanization of vegetable cultivation and harvesting]. Moscow: Kolos. 1983. 287 (In Russian).
6. Kolchin N.N. Mekhanizatsiya rabot v khranilishchakh kartofelya i ovoshchey [Mechanization of work in the potato and vegetable storage]. Moscow: Agropromizdat, 1985. 191 (In Russian).
7. Ostanin R.I., Kostin A.V., Lebedev L.Ya., et al. Mekhanizirovanny kompleks dlya posleuborochnoy obrabotki i khraneniya kartofelya [Mechanized complex for postharvesting processing and storage of potatoes]. *Vestnik Izhevskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2021. N2(66). 56-64 (In Russian).
8. Salimzyanov M., Pervushin V., Shakirov R., Kalimullin M. Improvement of technology and machines for growing potatoes in agriculture. *Engineering for rural development*. 2020. 9. 1423-1430 (In English).
9. Dorokhov A., Aksenov A., Sibirev A., et al. Results of laboratory studies of the automated sorting system for root and onion crops. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. N6. 1257 (In English).
10. Lebedev L.Ya., Arslanov F.R. Otdelitel' pochvennykh primsey dlya obrabotki kartofelya [Potato soil separator]. *Nauchnoe obespechenie inzhenerno-tekhnicheskoy sistemy APK: problemy i perspektivy: Materialy natsional'noy nauch.-prakt. konf., 11-13 dekabrya 2019. Izhevsk*. 2020. 197-202 (In Russian).
11. Khamaletdinov R., Martynov V., Mudarisov S., et al. Substantiation of rational parameters of the root crops separator with a rotating inner separation surface. *Journal of Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 51. N1. 15-20 (In English).
12. Kolchin N.N., Petukhov S.N. Issledovaniya protsessa sortirovaniya klubney kartofelya [Researches of potato tubers sorting process]. *Kartofel' i ovoshchi*. 2018. N9. 22-25 (In Russian).
13. Dorokhov A.S., Mosyakov M.A., Sazonov N.V. Avtomatizirovannaya liniya dlya posleuborochnoy obrabotki korneplodov i kartofelya [Automated line for post-harvest processing of root crops and potatoes]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N1. 22-26 (In Russian).
14. Dorokhov A.S., Mosyakov M.A., Sazonov N.V. Razrabotka avtomatizirovannoy linii posleuborochnoy obrabotki kartofelya dlya khozyaystv naseleniya [Designing an automated line for post-harvest potato processing to be used in private farm smallholdings]. *Agroinzheneriya*. 2020. N2(96). 16-22 (In Russian).
15. Ivanov A.G., Maksimov P.L., Maksimov L.M., et al. Prime-nenie metodov mekhaniki k issledovaniyu rabochikh protsessov kalibruyushchikh ustroystv dlya kartofelya: mono-

- grafiya [Applying the mechanics methods to the study of the working processes of potatoes calibration devices: monograph]. Izhevsk: Tsifra. 2021. 260 (In Russian).
16. Erokhin M.N., Maksimov P.L., Dorodov P.V. Povyshenie konstruktsionnoy nadezhnosti kopatelya-sborshchika kartofelya [Improving the structural reliability of a potato harvester]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2015. N2. 8-12 (In Russian).
 17. Kazantsev S.P., Matveev V.A., Mel'nikov O.M. Proektirovanie privodov statsionarnykh sel'skokhozyaystvennykh mashin [Designing drives for stationary agricultural machinery]. Moscow: Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva. 2018. 140 (In Russian).
 18. Izmaylov A.Yu., Kolchin N.N., Lobachevskiy Ya.P., Kynev N.G. Sovremennye tekhnologii i spetsial'naya tekhnika dlya kartofelevodstva [Modern technologies and special equipment for potato production]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2015. N2. 45-48 (In Russian).
 19. Vasil'chenko M.Yu., Porobova O.B., Sergeev A.A. Matematicheskaya model' dvizheniya klubnya kartofelya po reshetu grokhota [Mathematical model of potato tubers moving through the potato-sorter rotating sieve]. *Vestnik Izhevskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2016. N3(48). 50-55 (In Russian).
 20. Borovikov Yu.A., Vasil'chenko M.Yu., Ivanov A.G., Porobova O.B. Ispol'zovanie koeffitsienta effektivnosti dlya optimizatsii parametrov sharnirno-sterzhnevo mekhanizma grokhota [Using the efficiency coefficient to optimize the parameters of the hinged-rod mechanism of the screen]. *Vestnik Chelyabinskogo agroinzhenernoy universiteta*. 2004. Vol. 41. 43-49 (In Russian).
 21. Ivanov A.G., Shakirov R.R., Markov D.A., et al. Kinematika transportnogo sortiruyushchego ustroystva s peremennoy skorost'yu vrashcheniya rabocheho organa [Kinematics of a conveyor sorting device with a variable speed of rotation of the working body]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2022. N11. 18-22 (In Russian).
 22. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Marchenko O.S., Tsench Yu.S. Sozdanie innovatsionnoy tekhniki i resursosberegayushchikh tekhnologiy proizvodstva kormov – osnova razvitiya zhivotnovodstva [Creation of innovative equipment and resource-saving technologies of feed production-the basis of livestock development]. *Vestnik MGAU im. V.P. Goryachkina*. 2017. N82. 23-28 (In Russian).
 23. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S., Beylis V.M. Sozdanie i razvitie sistem mashin i tekhnologiy dlya kompleksnoy mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov v rastenievodstve [Creation and development of machine systems and technologies for complex mechanization of technological processes in crop production]. *Istoriya nauki i tekhniki*. 2019. N12. 46-55 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Иванов А.Г. – постановка задачи, определение методологии исследования, разработка теоретических предпосылок;
 Ерохин М.Н. – научное руководство, подготовка статьи, доработка решения, формирование общих выводов;
 Казанцев С.П. – сбор и анализ материалов по теме исследования, формирование общих выводов, критический анализ и доработка решения;
 Дородов П.В. – анализ научных источников по теме исследования, формирование и доработка текста;
 Хузяхметов И.И. – кинематический анализ, проведение расчетов и подготовка графического материала;
 Хакимов И.Т. – литературный анализ и подготовка начального варианта статьи.
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Ivanov A.G. – problem statement, specifying research methodology, developing theoretical prerequisites;
 Erokhin M.N. – scientific guidance, preparation of the manuscript, revision of the solution, formation of general conclusions;
 Kazantsev S.P. – collection and analysis of the material on the research topic, formation of general conclusions, critical analysis and revision of the solution;
 Dorodov P.V. – literature review on the research topic, proofreading and revision of the manuscript;
 Khuzyakhmetov I.I. – kinematic analysis, calculations and preparing the graphic material;
 Khakimov I.T. – literature review and preparing the manuscript draft.
 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

03.04.2023
 25.05.2023