

supply using an ejector in order to evenly load the sieve by selecting the optimal diameter of the inlet connection pipe of the crusher. The paper considers an urgent issue of assessing the effect of the diameter of the inlet pipe of the DKR-1 grain hammer crusher on its performance and energy consumption. The studies of the DKR-1 crusher were carried out as part of a feed preparation line. Curved blades were additionally installed to study the effect of aerodynamic characteristics on the rotor. The results of conducted experiments have determined that with a sieve hole diameter of 6 mm and a hose diameter less than 70 mm, the crusher collapses, which leads to a sharp decrease in its productivity. Additional experiments with blades mounted on the rotor with a diameter of 420 mm showed that the productivity of the crusher was limited by the diameter of the hose with a diameter of less than 70 mm. When examining the diameters of the suction hoses, the optimal diameter 100 mm was determined for the crusher DKR-1, which allowed to increase the productivity of the crusher to 1650 kg/h. The grading analysis of the crushed grain obtained on sieves with a hole diameter of 8 and 10 mm shows that the feed meets the requirements of National State Standards. When grinding on a sieve with 8 mm holes, the number of whole grains is 2.00 %, 10 mm – 3.54 %.

Key words: pipe diameter, grain, blades, hammer crusher, productivity, whole grains, specific energy consumption.

For citation: Bulatov S. Yu., Nechaev V. N., Sergeev A. G., Shamin A. E., Shlykov A. E. Impact of the inlet pipe diameter on the technological and energy performance of the DKR-1 grain crusher. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2025; 1 (81): 148-155. (In Russ.). https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_1_148-155.

Authors:

S. Y. Bulatov^{1✉}, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0001-9099-0447>;

V. N. Nechaev², Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-7566-6013>;

A. G. Sergeev³, Candidate of Technical Sciences, <https://orcid.org/0000-0003-0466-9003>;

A. E. Shamin⁴, Doctor of Economics, Professor, <https://orcid.org/0000-0002-2382-274X>;

A. E. Shlykov⁵, Senior lecturer, <https://orcid.org/0000-0003-2632-652X>

^{1,2,4,5}Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, 22 Oktyabrskaya St., Knyaginino, Russia, 606340

³DOZA-AGRO, 20 Shosse Zhirkombinata, Nizhny Novgorod, Russia, 603028

¹bulatov_sergey_urevich@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 15.11.2024; одобрена после рецензирования 15.01.2025;

принята к публикации 03.03.2025.

The article was submitted 15.11.2024; approved after reviewing 15.01.2025; accepted for publication 03.03.2025.

Научная статья

УДК 631.362.3:635.21

DOI 10.48012/1817-5457_2025_1_155-162

ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ КЛУБНЕЙ ПО РАБОЧИМ ОРГАНАМ ДИСКОВОГО ВОРОХООЧИСТИТЕЛЯ

Иванов Алексей Генрихович[✉], **Костин Александр Владимирович**,
Арсланов Фанис Рашидович, **Ломаев Александр Андреевич**,
Воронцов Константин Леонидович

Удмуртский ГАУ, Ижевск, Россия

ivalgen@inbox.ru

Аннотация. Возделывание картофеля является сложным многоэтапным процессом, важную роль в котором выполняет доработка картофеля перед закладкой на хранение. Доработка включает в себя приемку вороха, распределение его, очистку от почвенных и растительных примесей. Удаление некондиционных клубней, калибрование на фракции по размерам и размещение товарного картофеля в бункерах на хранение. В работе делается упор на выделение из вороха почвенных примесей. Для этой

цели предложен разработанный авторским коллективом дисковый ворохоочиститель. Он имеет простую и компактную конструкцию, содержащую раму и три вала с дисками, размещенными на валах с зазорами, достаточными для просеивания через них почвы. Представлено описание принципа работы машины. Для обоснования параметров устройства была разработана математическая модель динамики движения сферического клубня по торцам диска. Модель опирается на законы теоретической механики, в частности, на уравнения динамики в естественной форме. Показан подход к получению дифференциальных уравнений движения клубня. Описан способ решения дифференциального уравнения. Путем расчетов было установлено, что устойчивое закатывание клубней по торцам дисков вверх возможно с начального угла $\varphi_0 = 60...65^\circ$, а отрыв клубней происходит при угле 149° . Межосевое расстояние между валами ворохоочистителя следует выбирать как раз из тех условий, поэтому диски частично заходят в пространство между дисками соседнего вала ($a_{w1} < 0,5(d_1+d_2)$, $a_{w2} < 0,5(d_2+d_3)$).

Ключевые слова: ворох, примеси, ворохоочиститель, привод, дисковый вал, вращение, уравнения динамики, трение качения.

Для цитирования: Динамика движения клубней по рабочим органам дискового ворохоочистителя / А. Г. Иванов, А. В. Костин, Ф. Р. Арсланов [и др.] // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 1. (81). С. 155-162. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_1_155-162.

Актуальность. Возделывание картофеля имеет важное значение для народного хозяйства страны, для обеспечения ее продовольственной безопасности. Картофель хорошо хранится, сохраняя свои полезные свойства, однако, требуется соблюдение технологических режимов хранения, обеспечение необходимой температуры и влажности. Для этой цели применяются картофелехранилища с контролируемым микроклиматом. Однако напрямую, «с поля», закладывать картофель на хранение нельзя. После уборки ворох картофеля идет загрязненным почвенными примесями, некондиционными клубнями. Доработка картофеля после уборки, при закладке на хранение и при подготовке к реализации или на семенные цели является важным этапом в цикле возделывания картофеля [2, 5, 7, 9, 11, 12]. Эти операции являются финишными и придают картофелю товарный вид [1, 8, 12, 13-15]. Одной из операций является отделение почвенных и растительных примесей от вороха картофеля [7, 12, 17, 18]. Для отделения почвенных примесей предлагается использовать дисковый ворохоочиститель. Этот тип рабочего органа отличается простотой конструкции, высокой пропускной способностью, бережным обращением с обрабатываемым материалом и хорошими показателями выделения примесей. Но данные рабочие органы в области ворохоочистителей не так широко распространены и нет расчетных моделей для их проектирования. Обоснование его параметров и режимов работы на основе динамики поведения клубней на рабочих органах имеет важное значение. Разработка математической модели позволит создать условия для формализованного проектирования подобных машин или линейки машин разной производительности.

Цель исследований: разработать математическую модель динамики движения клубней

картофеля по рабочим органам дискового ворохоочистителя.

Задачи исследования. Описать предлагаемую конструкцию дискового ворохоочистителя; разработать модель динамики движения клубней по рабочим органам; получить числовые значения параметров устройства.

Методы исследования. Объектом исследования является дисковый ворохоочиститель, предмет исследования – математическая модель движения клубней по рабочим органам дискового ворохоочистителя.

Применялись методы теоретической механики (динамика плоскопараллельного движения твердого тела), методы критического анализа, методы решения дифференциальных уравнений. При решении дифференциальных уравнений применялся Mathcad.

Результаты исследований. Дисковый ворохоочиститель имеет простую конструкцию (рис. 1). Устройство представляет собой рамную конструкцию с тремя дисковыми валами. Диски имеют разные диаметры ($d_1 < d_2 < d_3$).

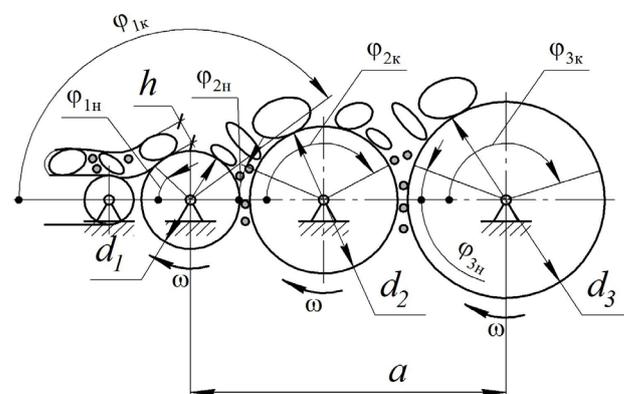


Рисунок 1 – Схема дискового ворохоочистителя

Диски вращаются в одну сторону синхронно, то есть с одинаковыми скоростями, за счет

частотно-регулируемого привода с цепной передачей. Диски установлены на валу с зазором, достаточным для прохождения почвенных примесей, но клубни картофеля не могут пройти между дисками. Увеличение диаметров по ходу движения вороха картофеля позволяет увеличить их окружную скорость.

Принцип работы машины такой. Ворох картофеля с почвенными примесями поступает на рабочие органы. Он огибает первый вал с дисками, и ворох начинает разделяться. За счет взаимодействия со следующим дисковым валом происходит рассредоточение компонентов смеси по длине ворохоочистителя. Почва эффективно отделяется от основного вороха, крошится и просыпается вниз. Аналогичный процесс происходит на следующем дисковом валу.

На рисунке 2 показаны 3D-модель дискового ворохоочистителя и его общий вид.

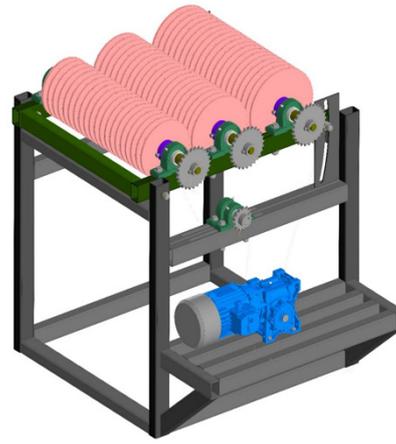
Рассмотрим клубень картофеля, который движется по вращающемуся диску (рис. 3).

Исследованием вопросов качения клубня по цилиндрической поверхности занимались Максимов Л. М., Игнатьев С. П., Иванов А. Г., Костин А. В. [13]. Взаимодействие клубня с поверхностью подающего транспортера является голономной неупругой нестационарной связью. Так как клубень катится вокруг поверхности цилиндрического барабана, набранного из дисков с радиусом d , то удобно использовать естественный способ задания движения [16]. Введем естественную систему координат, связанную с барабаном. Касательную ось $O\tau$ направим по касательной к траектории центра масс клубня, нормальную ось $O\eta$ направим к центру барабана.

Клубень катится по вращающемуся дисковому барабану под действием силы тяжести $m\vec{g}$, силы трения \vec{F} , нормальной реакции \vec{N} . Из-за деформации поверхности клубня на клубень действуют момент трения качения $M = \delta N$ (δ – коэффициент трения качения). Для определения положения центра масс клубня точки O_1 введем угол поворота радиус-вектора φ , что является достаточным для системы с одной степенью свободы. Записываем уравнение движения клубня по вращающемуся барабану в естественной форме:

$$\begin{cases} \sum F_\tau = ma^\tau; m\left(\frac{d_i}{2} + r\right)\ddot{\varphi} = -mg \sin \varphi + F, \\ \sum F_n = ma^n; m\left(\frac{d_i}{2} + r\right)\dot{\varphi}^2 = mg \cos \varphi - N, \end{cases} \quad (1)$$

где d_i – диаметр i -того дискового барабана, м; r – радиус шарообразного клубня, м; φ , $\ddot{\varphi}$ – соответ-



а



б

Рисунок 2 – Дисковый ворохоочиститель: 3D-модель (а) и общий вид (б)

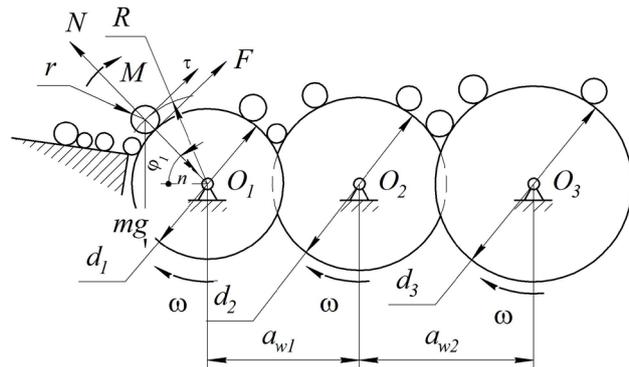


Рисунок 3 – Расчетная схема обкатки сферического клубня по дискам

ственно угловая скорость и угловое ускорение поворота радиус-вектора; m – масса клубня, кг.

Запишем дифференциальное уравнение динамики вращательного движения:

$$I\ddot{\zeta} = Fr - M, \quad (2)$$

где I – момент инерции шарообразного клубня, кг·м²; $\ddot{\zeta}$ – угловое ускорение собственного вращения клубня, рад/с²; ζ – угол поворота собственного вращения клубня, рад.

Кинематическая связь при перекачивании сферического клубня относительно торцов вращающихся дисков имеет вид:

$$\varphi \left(\frac{d_i}{2} + r \right) = \eta \frac{d_i}{2} + \zeta r, \quad (3)$$

где η – угол поворота дискового барабана, рад.

Дважды дифференцируем выражение (3), выражаем $\ddot{\zeta}$, учитывая, что дисковый барабан вращается с постоянной угловой скоростью $\dot{\eta} = \omega = const$, то есть $\ddot{\eta} = 0$.

$$\ddot{\zeta} = \ddot{\varphi} \left(\frac{d_i + 2r}{2r} \right). \quad (4)$$

Подставляем угловое $\ddot{\zeta}$ в уравнение (2), выражаем силу трения:

$$F = I \ddot{\varphi} \left(\frac{d_i + 2r}{2r^2} \right) + \frac{M}{r}.$$

Отношение коэффициента трения к радиусу называется приведенным коэффициентом $f' = \delta/r$, тогда

$$F = I \ddot{\varphi} \left(\frac{d_i + 2r}{2r^2} \right) + f' N. \quad (5)$$

Нормальную реакцию выражаем из второго уравнения системы (1):

$$N = mg \cos \varphi - m \left(\frac{d_i}{2} + r \right) \dot{\varphi}^2. \quad (6)$$

Подставляем выражения (5) и (6) в первое уравнение системы (1):

$$m \left(\frac{d_i}{2} + r \right) \ddot{\varphi} = mg \sin \varphi - I \ddot{\varphi} \left(\frac{d_i + 2r}{2r^2} \right) + f' \left(mg \cos \varphi - m \left(\frac{d_i}{2} + r \right) \dot{\varphi}^2 \right). \quad (7)$$

После преобразования (7) получаем линейное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\ddot{\varphi} + f' \dot{\varphi}^2 \left(\frac{mr^2}{I + mr^2} \right) - g \frac{2(\sin \varphi + f' \cos \varphi)mr^2}{(I + mr^2)(d_i + 2r)}. \quad (8)$$

Уравнение (8) допускает понижение порядка, если ввести новую функцию $P = \dot{\varphi}^2$, получим:

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi} &= \frac{d}{dt} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) = \frac{d\varphi}{dt} \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) = \\ &= \dot{\varphi} \frac{d}{d\varphi} (\dot{\varphi}) = \frac{1}{2} \frac{d}{d\varphi} (\dot{\varphi}^2) = \frac{1}{2} \frac{d}{d\varphi} (P), \\ \frac{1}{2} \frac{dP}{d\varphi} + AP &= B(\sin \varphi + f' \cos \varphi), \end{aligned} \quad (9)$$

$$A = f' \left(\frac{mr^2}{I + mr^2} \right), B = g \frac{2mr^2}{(I + mr^2)(d_i + 2r)},$$

где A – обобщенный коэффициент трения; B – приведенный параметр ускорения свободного падения, с².

Уравнение (9) является линейным неоднородным, решение будем искать в виде суммы общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного уравнения:

$$P = \bar{P} + P^*. \quad (10)$$

Приравняем правую часть уравнения (9) к нулю:

$$\frac{1}{2} \frac{dP}{d\varphi} + AP = 0.$$

Решение однородного уравнения имеет вид:

$$\ln|\bar{P}| = -2A\varphi + C_1,$$

где C_1 – постоянная интегрирования.

После преобразования получим:

$$\bar{P} = P_0 e^{2A(\varphi_0 - \varphi)}, \quad (11)$$

где P_0 – начальное значение функции при начальном угле φ_0 .

Частное решение неоднородного уравнения примет вид:

$$P^* = D \sin \varphi + E \cos \varphi, \quad (12)$$

где D и E – неопределенные коэффициенты, которые определяются путем подстановки частного решения в исходное уравнение, с².

Берем производную $dP^*/d\varphi$ от выражения (12):

$$\frac{dP^*}{d\varphi} = D \cos \varphi - E \sin \varphi. \quad (13)$$

Подставляем (12) и (13) в уравнение (9) и получаем:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(D \cos \varphi - E \sin \varphi) + A(D \sin \varphi + E \cos \varphi) = \\ = B(\sin \varphi + f' \cos \varphi). \end{aligned}$$

Приводим подобные слагаемые и находим коэффициенты D и E:

$$\begin{aligned} \left(AD - \frac{1}{2}E\right) \sin \varphi + \left(AE + \frac{1}{2}D\right) \cos \varphi = \\ = B(\sin \varphi + f' \cos \varphi). \end{aligned}$$

Получаем систему двух линейных уравнений:

$$\begin{cases} AD - \frac{1}{2}E = B, & D = \frac{2B(2A+f')}{4A^2+1}, \\ AE + \frac{1}{2}D = Bf', & E = B\left(\frac{4A^2+4Af'-1}{4A^2+1}\right). \end{cases} \quad (14)$$

Выражение (10) примет вид с учетом (11), (12) и (14):

$$\begin{aligned} P = P_0 e^{2A(\varphi_0-\varphi)} + \frac{2B(2A+f')}{4A^2+1} \sin \varphi + \\ + B\left(\frac{4A^2+4Af'-1}{4A^2+1}\right) \cos \varphi. \end{aligned} \quad (15)$$

Из начального условия, что при угле $\varphi = \varphi_0$ скорость центра масс клубня равна v , находим согласно (15):

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_0 = \frac{2v}{d_i + 2r} \Rightarrow P|_{\varphi=\varphi_0} = \dot{\varphi}_0^2 = \left(\frac{2v}{d_i + 2r}\right)^2, \\ \left(\frac{2v}{d_i + 2r}\right)^2 = P_0 + B\left(\frac{4A^2+4Af'-1}{4A^2+1}\right), \\ P_0 = \left(\frac{2v}{d_i + 2r}\right)^2 - B\left(\frac{4A^2+4Af'-1}{4A^2+1}\right). \end{aligned} \quad (16)$$

Скорость центра масс:

$$\begin{aligned} V_C = \dot{\varphi} \left(\frac{d_i}{2} + r\right), \\ \dot{\varphi} = \left(P_0 e^{2A(\varphi_0-\varphi)} + \frac{2B(2A+f')}{4A^2+1} \sin \varphi + \right. \\ \left. + B\left(\frac{4A^2+4Af'-1}{4A^2+1}\right) \cos \varphi\right)^{0.5}. \end{aligned} \quad (17)$$

Расчет по формуле (17) с учетом (16) ведем до тех пор, пока не произойдет отрыв клубня от барабана (нормальная реакция по формуле

(6) станет равной или меньшей нуля) или клубень перейдет на следующий барабан. Указанная модель позволяет провести анализ и выявить влияние параметров дискового ворохоочистителя на скорости движения клубней картофеля по торцам вращающихся дисков. Для расчетов по перемещению центра масс клубня требуется проинтегрировать выражение (17). Интеграл будет не берущийся и его можно решить численными методами с использованием Mathcad. Установлено, что при различных сочетаниях диаметров дисков и размеров сферических клубней имеются общие закономерности. Движение клубней исследовалось при диаметрах дисков 150...500 мм. Не было выявлено наличия экстремумов на выбранном диапазоне изменения диаметров. Поэтому при изготовлении были назначены диаметры из конструктивных соображений и при соблюдении наименьших возможных размеров для снижения затрат на изготовление машины ($d_1 = 200$ мм, $d_2 = 230$ мм, $d_3 = 260$ мм). Устойчивый подъем дисков происходит при угле расположения радиус-вектора центра масс клубня $\varphi_i = 60...65^\circ$ по отношению к горизонту. Эти данные хорошо согласуются с результатами других авторов, перечисленных в статье [9, 11, 13]. При переходе через верхнюю точку происходит смена направления собственного вращения клубня и затем скатывание его до момента отрыва от торцов диска. В момент отрыва нормальная реакция N становится равной нулю. Это происходит при угле расположения радиус-вектора центра масс клубня $\varphi_i = 149^\circ$. Необходимо предусмотреть, чтобы переход на следующий дисковый вал происходил до момента отрыва или чтобы скорость в момент отрыва не превышала безопасную с точки зрения повреждаемости клубней [2, 4, 7].

Выводы. Разработана математическая модель динамики сферического клубня на рабочих органах дискового ворохоочистителя. Ее анализ позволяет проверить условия для качения клубней по торцам дисков в различных условиях. При изготовлении были назначены диаметры дисков из конструктивных соображений: $d_1 = 200$ мм, $d_2 = 230$ мм, $d_3 = 260$ мм.

Путем расчетов было установлено, что устойчивое закатывание клубней по торцам дисков вверх возможно при угле расположения радиус-вектора центра масс клубня $\varphi_i = 60...65^\circ$ по отношению к горизонту, а отрыв клубней происходит при угле $\varphi_i = 149^\circ$. В момент отрыва следует обеспечить переход клубня на следующий дисковый вал, поэтому межосевое расстояние меж-

ду валами ворохоочистителя следует выбирать из этого условия при наиболее характерных размерах клубня ($a_{w1} < 0,5(d_1 + d_2)$, $a_{w2} < 0,5(d_2 + d_3)$).

Список источников

1. Боровиков Ю. А., Васильченко М. Ю., Иванов А. Г. Сравнительный анализ законов движения решета грохотной калибрующей машины по критерию оптимизации // Актуальные проблемы механизации сельского хозяйства: межрег. сборник статей науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию факультета механизации сельского хозяйства. Ижевск: ИжГСХА, 2005. С. 166-170.

2. Валиев И. И., Калимуллин М. Н., Абдрахманов Р. К. Агротехнические основы заготовки корнеклубнеплодов // Научное сопровождение технологий агропромышленного комплекса: теория, практика, инновации: научные труды I Международной научно-практической конференции. 2020. С. 278-282.

3. Васильченко М. Ю., Поробова О. Б., Сергеев А. А. Математическая модель движения клубня картофеля по решету грохота // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 3(48). С. 50-55. EDN: WMGNSN

4. Взаимодействие модели клубня картофеля с рабочими органами сортирующих машин / А. Г. Иванов, Р. Р. Шакиров, М. М. Киселев [и др.] // Сельский механизатор. 2022. № 4. С. 12-14. EDN VEZFRP.

5. Дорохов А. С., Мосяков М. А., Сазонов Н. В. Автоматизированная линия для послеуборочной обработки корнеплодов и картофеля // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14. № 1. С. 22-26.

6. Колчин Н. Н., Петухов С. Н. Исследования процесса сортирования клубней картофеля // Картофель и овощи. 2018. № 9. С. 22-25.

7. Колчин Н. Н. Комплексы машин и оборудования для послеуборочной обработки картофеля и овощей. Москва: Машиностроение, 1982. 268 с.

8. 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.

9. Максимов Л. М., Максимов П. Л., Максимов Л. Л. Полезные реализованные изобретения по устройствам для уборки корнеклубнеплодов: монография. Ижевск: КнигоГрад, 2009. 136 с.

10. Марков Д. А., Шакиров Р. Р., Иванов А. Г. Виды устройств для сортировки картофеля // Научное обеспечение инженерно-технической системы АПК: проблемы и перспективы: материалы нац. науч.-практ. конф. Ижевская ГСХА, 2020. С. 202-207.

11. Механизированный комплекс для послеуборочной обработки и хранения картофеля / Р. И. Останин, А. В. Костин, Л. Я. Лебедев [и др.] // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 2(66). С. 56-64.

12. Петров Г. Д., Бекетов П. В. Механизация возделывания и уборки овощей. Москва: Колос, 1983. 287 с.

13. Применение методов механики к исследованию рабочих процессов калибрующих устройств для картофеля: моногр. / А. Г. Иванов [и др.]; под общ. ред. А. Г. Иванова. Ижевск: Цифра, 2021. 260 с.

14. Саврасова Н. Р. Анализ контактного динамического взаимодействия клубня картофеля с поверхностью // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2010. Т. 12. №1(2). С. 493-498.

15. Современные технологии и специальная техника для картофелеводства / А. Ю. Измайлов, Н. Н. Колчин, Я. П. Лобачевский, Н. Г. Кынев // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2015. № 2. С. 45-48. EDN TOCCQL.

16. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики: учеб. для вузов. 12-е изд., стер. Москва: Высшая школа, 2002. 416 с.

17. Improvement of technology and machines for growing potatoes in agriculture / M. Salimzyanov, V. Pervushin, R. Shakirov, M. Kalimullin // Engineering for Rural Development. 9. Sep. "19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, Proceedings", 2020. С. 1423-1430.

18. Khamaletdinov R., Martynov V., Mudarisov S. [and oth.] Substantiation of rational parameters of the root crops separator with a rotating inner separation surface. Journal of Agricultural Engineering. 2020; 51(1): 15-20.

References

1. Borovikov Yu. A., Vasil'chenko M. Yu., Ivanov A. G. Sravnitel'ny'j analiz zakonov dvizheniya resheta groxotnoj kalibruyushhej mashiny' po kriteriyu optimizacii // Aktual'ny'e problemy' mexanizacii sel'skogo xozyajstva: mezhreg. sbornik statej nauch.-prakt. konf., posvyashh. 50-letiyu fakul'teta mexanizacii sel'skogo xozyajstva. Izhevsk: IzhGSXA, 2005. S. 166-170.

2. Valiev I. I., Kalimullin M. N., Abdraxmanov R. K. Agrotexnicheskie osnovy` zagotovki korneklubneplodov // Nauchnoe soprovozhdenie texnologij agropromy'shennogo kompleksa: teoriya, praktika, innovacii: nauchny'e trudy` I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2020. S. 278-282.

3. Vasil'chenko M. Yu., Porobova O. B., Sergeev A. A. Matematicheskaya model` dvizheniya klubnya kartofelya po reshetu groxota // Vestnik Izhevskoj gosudarstvennoj sel'skoxozyajstvennoj akademii. 2016. № 3(48). S. 50-55. EDN: WMGNSN

4. Vzaimodejstvie modeli klubnya kartofelya s rabochimi organami sortiryushhix mashin / A. G. Ivanov, R. R. Shakirov, M. M. Kiselev [i dr.] // Sel'skij mexanizator. 2022. № 4. S. 12-14. EDN VEZFRP.

5. Doroxov A. S., Mosyakov M. A., Sazonov N. V. Avtomatizirovannaya liniya dlya posleuborochnoj obrabotki korneplodov i kartofelya // Sel'skoxozyajstvenny'e mashiny` i texnologii. 2020. T. 14. № 1. S. 22-26.

6. Kolchin N. N., Petuxov S. N. Issledovaniya processa sortirovaniya klubnej kartofelya // Kartofel' i ovoshhi. 2018. № 9. S. 22–25.
7. Kolchin N. N. Kompleksy mashin i oborudovaniya dlya posleuborochnoj obrabotki kartofelya i ovoshhej. Moskva: Mashinostroenie, 1982. 268 s.
8. Lebedev L. Ya., Arslanov F. R. Otdelitel' pochvennyx primesej dlya obrabotki kartofelya // Nauchnoe obespechenie inzhenerno-texnicheskoj sistemy APK: problemy i perspektivy: materialy nacional'noj nauch.-prakt. konf., 11-13 dekabrya 2019 g. Izhevsk, 2020. S. 197-202.
9. Maksimov L. M., Maksimov P. L., Maksimov L. L. Poleznye realizovannye izobreteniya po ustrojstvam dlya uborki kornklubneplodov: monografiya. Izhevsk: KnigoGrad, 2009. 136 s.
10. Markov D. A., Shakirov R. R., Ivanov A. G. Vidy ustrojstv dlya sortirovki kartofelya // Nauchnoe obespechenie inzhenerno-texnicheskoj sistemy APK: problemy i perspektivy: materialy nacz. nauch.-prakt. konf. Izhevskaya GSXA, 2020. S. 202-207.
11. Mexanizirovannyj kompleks dlya posleuborochnoj obrabotki i xraneniya kartofelya / R. I. Ostanin, A. V. Kostin, L. Ya. Lebedev [i dr.] // Vestnik Izhevskoj gosudarstvennoj sel'skoxozyajstvennoj akademii. 2021. № 2(66). S. 56-64.
12. Petrov G. D., Beketov P. V. Mexanizaciya vozdelevaniya i uborki ovoshhej. Moskva: Kolos, 1983. 287 s.
13. Primenenie metodov mexaniki k issledovaniyu rabochix processov kalibrnyx ustrojstv dlya kartofelya: monogr. / A. G. Ivanov [i dr.]; pod obshh. red. A. G. Ivanova. Izhevsk: Cifra, 2021. 260 s.
14. Savrasova N. R. Analiz kontaktного динамического взаимодействия клубня картофеля с поверхностью // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk, 2010. T. 12. №1(2). S. 493–498.
15. Sovremennye tehnologii i special'naya texnika dlya kartofelevodstva / A. Yu. Izmajlov, N. N. Kolchin, Ya. P. Lobachevskij, N. G. Ky'nev // Sel'skoxozyajstvenny'e mashiny i tehnologii. 2015. № 2. S. 45-48. EDN TOCCQL.
16. Targ S. M. Kratkij kurs teoreticheskoy mexaniki: ucheb. dlya vuzov. 12-e izd., ster. Moskva: Vysshaya shkola, 2002. 416 s.
17. Improvement of technology and machines for growing potatoes in agriculture / M. Salimzyanov, V. Pervushin, R. Shakirov, M. Kalimullin // Engineering for Rural Development. 9. Ser. "19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, Proceedings", 2020. S. 1423-1430.
18. Khamaletdinov R., Martynov V., Mudarisov S. [and oth.] Substantiation of rational parameters of the root crops separator with a rotating inner separation surface. Journal of Agricultural Engineering. 2020; 51(1): 15-20.

Сведения об авторах:

А. Г. Иванов , кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-7111-7642>;

А. В. Костин, кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-0589-3448>;

Ф. Р. Арсланов, кандидат технических наук, доцент;

А. А. Ломаев, аспирант;

К. Л. Воронцов, аспирант

Удмуртский ГАУ, ул. Студенческая, 9, Ижевск, Россия, 426069

ivalgen@inbox.ru

Original article

DYNAMICS OF TUBER MOVEMENT ALONG THE WORKING ORGANS OF THE DISC WASTE CLEANER

Alexey G. Ivanov , **Alexander V. Kostin**, **Fanis R. Arslanov**, **Alexander A. Lomaev**, **Konstantin L. Vorontsov**

Udmurt State Agricultural University, Izhevsk, Russia

ivalgen@inbox.ru

Abstract. *Potato cultivation is a complex multi-stage process, in which an important role is played by refining potatoes before storing them. The refinement includes the acceptance of the pile, its distribution, and purification from soil and plant impurities. Removal of substandard tubers, calibration into size fractions and placement of marketable potatoes in storage bins. The work focuses on the separation of soil impurities from the pile. A disc pile cleaner developed by the author's team is proposed for this purpose. It has a simple and compact structure containing a frame and three shafts with discs placed on shafts with gaps sufficient to sift soil through them. The description of the operating principle of the machine is presented. To substantiate the parameters of the device, a mathematical model of the dynamics of the movement of a spherical tuber along the ends of the disks was developed. The model is based on the laws of theoretical mechanics, in particular on the equations of dynamics*

in natural form. An approach to obtaining differential equations of tuber motion is shown. A method for solving a differential equation is described. By calculations, it was found that stable rolling of tubers along the ends of the discs upward is possible from an initial angle of $\varphi_0 = 60 \dots 65^\circ$, and the separation of tubers occurs at an angle of 149° . The axial distance between the shafts of the pile cleaner should be chosen from just the right conditions, so the discs partially fit into the space between the discs of the neighboring shaft ($a_{w1} < 0.5(d_1 + d_2)$, $a_{w2} < 0.5(d_2 + d_3)$).

Key words: thrashed heap, impurities, waste cleaner, drive, disc shaft, rotation, dynamic equations, rolling friction.

For citation: Ivanov A. G., Kostin A. V., Arslanov F. R., Lomaev A. A., Vorontsov K. L. Dynamics of tuber movement along the working organs of the disc waste cleaner. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2025; 1 (81): 155-162. (In Russ.). https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_1_155-162.

Authors:

A. G. Ivanov [✉], Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0001-7111-7642>;

A. V. Kostin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-0589-3448>;

F. R. Arslanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

A. A. Lomaev, Postgraduate student;

A. A. Kudryavtsev, Postgraduate student

Udmurt State Agricultural University, 9 Studencheskaya St., Izhevsk, Russia, 426069

ivalgen@inbox.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 01.07.2024; одобрена после рецензирования 27.01.2025; принята к публикации 03.03.2025.

The article was submitted 01.07.2024; approved after reviewing 27.01.2025; accepted for publication 03.03.2025.

Научная статья

УДК 620.178

DOI 10.48012/1817-5457_2025_1_162-167

ЭФФЕКТ БЕЗЫЗНОСНОСТИ В ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯХ, ЛЕГИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ

Ипатов Алексей Геннадьевич^{1✉}, Харанжевский Евгений Викторович²

¹Удмуртский ГАУ, Ижевск, Россия

²УдГУ, Ижевск, Россия

¹ipatow.al@yandex.ru

Аннотация. Работа посвящена анализу эффекта безызносности в условиях пластической деформации контактирующих поверхностей, подверженных поверхностному легированию металлическим висмутом. Легирование поверхности стали висмутом реализовано с применением инновационной технологии короткоимпульсного лазерного переплава поверхностного слоя. Трибологические исследования выполнены в сопряжении с алюминиевым сплавом АЖ-1. Анализ трибологических показателей осуществлен при различных кинематических и динамических нагрузках, в режиме граничного трения с использованием современного лабораторного и исследовательского оборудования. В условиях граничной смазки легированная висмутом стальная поверхность в паре с анализируемым сплавом АЖ-1 характеризуется стабильно низкой величиной коэффициента трения. Во всем диапазоне кинематических и динамических нагрузок коэффициент трения варьирует в диапазоне от 0,04 до 0,08. В условиях высоких знакопеременных нагрузок у алюминиевого сплава наблюдается высокая усталостная прочность, что предупреждает поверхность от преждевременного разрушения. Трибологические и оптические исследования выявили, что контактирующие поверхности обладают эффективной прирабатываемостью без следов механического и молекулярного взаимодействия. Отсутствие механического и молекулярного изнашивания в зоне контакта определяет эффект безызносности, что подтверждается анализом износов контактирующих тел – на всем протяжении износных испытаний наблюдается нулевой износ. При этом температурный фон