УДК 631.356.4

DOI: 10.31563/1684-7628-2018-48-4-128-135

Р.Р. Камалетдинов, Р.Ш. Аблеев

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕПАРАТОРА КОРНЕКЛУБНЕПЛОДОВ С ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ВНУТРЕННЕЙ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В ФОРМЕ УСЕЧЕННОГО КОНУСА

Ключевые слова: картофелеуборочная машина; клубни картофеля; почвенные комки; вращающееся усеченный конус; сепарация; углы схода.

Введение. В планах реализации продовольственной безопасности большинством стран определена номенклатура стратегически важных сельскохозяйственных культур, среди которых картофель неизменно занимает одну из лидирующих позиций. Вместе с тем в России возделывание данной культуры свёрнуто до уровня начального товарного производства в личных подсобных хозяйствах [1, 2]. Необходимость значительных финансовых вложений, прекращение выпуска машин для картофелеводства, отсутствие мощностей по производству безвирусного картофеля и, как следствие, потери при хранении до 50 % выращенного урожая привели к сворачиванию возделывания данной культуры

в промышленных масштабах. Наряду с этим использование даже самых совершенных технологий и способов хранения не может гарантировать сохранность урожая, если качество закладываемой на хранение продукции не будет соответствовать необходимым агротехническим требованиям, среди которых наиболее значимым является наличие в сходовом ворохе поврежденных клубней, что при неблагоприятном агробиологическом фоне неизбежно приводит к потерям значительной части урожая. Повреждения клубней при уборке в большей части обусловлены тем, что основным способом сепарации является разрушение почвенных частиц и их просеивание на прутковых элеваторах. При этом

для разрушения комков используются значительные силовые воздействия на клубненосный пласт, особенно при работе на тяжёлых почвах. Несмотря на многочисленные работы, посвящённые исследованию процесса сепарации картофельного вороха, задача по отделению клубней картофеля от почвенных комков остаётся нерешённой. В связи с этим вопросы поиска технических средств, позволяющих повысить эффективность сепарации и уменьшить воздействие внешних сил на картофельный ворох, не только не снизили свою остроту, но и являются основным сдерживающим фактором развития промышленного картофелеводства в России [3–6].

Цель исследования – разработать конструкцию и обосновать рациональные параметры сепаратора картофельного вороха, оказывающего минимальное механическое воздействие на клубень при работе на тяжёлых переувлажнённых почвах.

Условия, материалы и методы исследования. Анализ физико-механических характеристик компонентов картофельного вороха показывает, что наибольшее различие разделительных признаков наблюдается в углах качения клубней и почвенных комков.

Рисунок 1

Плотность распределения углов качения:
1 – клубни картофеля; 2 – почвенные комки

На рисунке 1 представлены распределения плотности углов качения клубней картофеля для сорта Невский и комков почвы суглинистого типа, показывающих наличие незначительной зоны перекрытия данного признака. Неслучайно

$$\left. \begin{aligned} m(\ddot{\rho} - \rho\dot{\varphi}^2) &= G \sin \beta \cos \varphi - N \cos \alpha - fN\dot{\rho} / \sqrt{v_o^2 + \dot{\rho}^2 / \sin^2 \alpha}; \\ m(\rho\ddot{\varphi} + 2\dot{\rho}\dot{\varphi}) &= -G \sin \beta \sin \varphi - fNv_o / \sqrt{v_o^2 + \dot{\rho}^2 / \sin^2 \alpha}; \\ m\ddot{z} &= m\ddot{\rho} / \operatorname{tg} \alpha = N \sin \alpha - G \cos \beta - fN\dot{\rho} / (\operatorname{tg} \beta \sqrt{v_o^2 + \dot{\rho}^2 / \sin^2 \alpha}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\sqrt{v_o^2 + \dot{\rho}^2 / \sin^2 \alpha}$ – абсолютная скорость компоненты V_k ; v_o – относительная окружная скорость компоненты, равная:

$$v_o = \rho_1(\dot{\varphi} - \omega_0), \quad (2)$$

в настоящее время наиболее перспективным для разделения соизмеримых по размерам клубней картофеля и почвенных частиц являются устройства, работающие по принципу наклонной пальчатой горки. Вместе с тем предлагаемые конструктивные решения, основанные на разделении по данному признаку, имеют ряд недостатков. Во-первых, компоненты вороха движутся при сепарации навстречу друг другу (в противотоке), во-вторых, регулировочные параметры (углы, кинематические режимы работы, эластичность пальцев и т. д.) определяются исходя из средних физико-механических показателей компонентов вороха, что не позволяет на данных устройствах обеспечить полное отделения корнеклубнеплодов от почвенных комков. С учетом этого нами предложена конструкция сепаратора в виде гибкой движущейся бесконечной ленты в форме тела вращения, например, усеченного конуса, расчетная схема которого представлена на рисунке 2. Учитывая форму и кинематику взаимодействующих поверхностей, рассмотрим перемещение компоненты вороха в цилиндрической системе координат ρ, φ, z . Полярный радиус ρ определяет расстояние до центра масс компоненты от оси вращения конуса Oz , при этом точка контакта взаимодействующих поверхностей находится на луче, проходящем перпендикулярно через ось Oz и центр масс компоненты.

Отклонение радиуса ρ от вертикали определяется полярным углом φ . Перемещение вдоль оси вращения конуса оценивается координатой z . Радиальное ускорение центра масс компоненты определяется как $\ddot{\rho} - \rho\dot{\varphi}^2$, тангенциальное ускорение – $\rho\ddot{\varphi} + 2\dot{\rho}\dot{\varphi}$, соответственно скорости и ускорения по оси Oz равны $\dot{z} = \dot{\rho} / \operatorname{tg} \alpha$ и $\ddot{z} = \ddot{\rho} / \operatorname{tg} \alpha$. На компоненту массой m действуют следующие силы: тяжести $G = mg$, нормальная реакция N и сила трения fN , где f – коэффициент трения компоненты о поверхность образующей конуса. После проецирования всех действующих сил на цилиндрические оси координат с учётом инерционной составляющей точечной массы имеем следующую систему дифференциальных уравнений движения компоненты:

где ω_0 – угловая скорость вращения конического барабана; ρ_1 – полярный радиус расположения точки контакта компоненты с внутренней поверхностью усечённого конуса, который с учётом радиуса ρ_k компоненты определяется как сумма:

$$\rho_1 = \rho + \rho_k \cos \alpha. \quad (3)$$

Для исключения из системы уравнений неизвестной нормальной реакции N вычтем из тре-

$$N = m \cos \alpha [\rho \dot{\varphi}^2 + g(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha + \sin \beta \cos \varphi)]. \quad (4)$$

После замены нормальной реакции на (4) система уравнений движения компоненты

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\varphi} &= -\frac{1}{r} \left\{ 2\dot{\rho}\dot{\varphi} + g \sin \beta \sin \varphi + [\rho \dot{\varphi}^2 + g(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha + \sin \beta \cos \varphi)] \frac{f v_0 \sin \alpha \cos \alpha}{\sqrt{v_0^2 \sin^2 \alpha + \dot{\rho}^2}} \right\}; \\ \ddot{\rho} &= \sin \alpha [\rho \dot{\varphi}^2 + g(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha + \sin \beta \cos \varphi)] \left(\sin \alpha - \frac{f \cdot \dot{\rho} \cos \alpha}{\sqrt{v_0^2 \sin^2 \alpha + \dot{\rho}^2}} \right) - g \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Численное решение системы (5) позволяет определять текущие значения угла φ и радиуса ρ для любого времени t или угла поворота конуса $\psi = \omega_0 t$. Начальный радиус $\rho = \rho_0$ соответственно равен

$$\rho_0 = R_{\min} - \rho_k \cos \alpha,$$

где $R_{\min}$ – радиус меньшего основания усечённого конуса. Этот радиус при заданных значениях угла α , радиуса большего основания $R_{\max}$ и высоте h_z усечённого конуса равен:

$$R_{\min} = R_{\max} - h_z \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

того уравнения системы первое, предварительно разделив его на $\operatorname{tg} \alpha$. Выполнив преобразования, получим:

во вращающемся усечённом конусе принимает вид

Текущая координата z при известном радиусе ρ равна:

$$z = (\rho + \rho_k / \cos \alpha - R_{\min}) / \operatorname{tg} \alpha.$$

На рисунке 3а показано боковое смещение компоненты вороха при движении по внутренней поверхности конуса, вращающегося с угловой скоростью $\omega = 6 \text{ с}^{-1}$, образующая которой равна 1 метру, угол уклона $\alpha = 30^\circ$ и диаметр меньшего основания $R_{\min} = 0.6 \text{ м}$ при различных коэффициентах трения. На рисунке 3б то же самое при коэффициенте трения $f = 0.7$ и различных угловых скоростях вращения барабана.

Рисунок 2

Схема сил, действующих на компоненту картофельного вороха, движущуюся по внутренней поверхности сепаратора, выполненного в виде вращающегося усечённого конуса

Рисунок 3

Боковое смещение траектории компоненты вороха при движении по внутренней поверхности усечённого конуса с углом образующей $\alpha = 30^\circ$: а) при коэффициентах трения: 1 – $f = 0,3$; 2 – $f = 0,5$; 3 – $f = 0,7$ и $f = 0,9$; б) скоростях вращения 1 – $\omega = 3 \text{ с}^{-1}$; 2 – $\omega = 6 \text{ с}^{-1}$; 3 – $\omega = 9 \text{ с}^{-1}$ и 4 – $\omega = 12 \text{ с}^{-1}$

Аналогичные расчёты были проведены для вариантов с наклоном оси вращения в сторону скатывания на 15° . Были определены предельные углы подъёма данных тел (рисунок 4) и режимы стабилизации движения, т. е. качения без проскальзывания, т. к. последнее приводит к сдиранию кожицы клубней.

Таким образом, действие центробежных сил обеспечивает дополнительное расхождение углов

качения клубней картофеля и почвенных комков. Для одиночных клубней и почвенных комков на плоской поверхности разница в углах качения составляет в среднем 11° и имеются зоны перекрытия. Во вращающемся барабане данный показатель может достигать $36\text{--}40^\circ$. Полученные выводы в полной мере согласуются с результатами В.М. Мартынова, исследовавшего аналогичные процессы при уборке кормовой свеклы [7, 8].

Рисунок 4

Предельные углы подъема:

1 – почвенных комков и 2 – клубней картофеля в зависимости от угловой скорости ω при $r = 0,45$ м

Установлено, что переход из статического в кинетический режим и соответственно изменение значений коэффициентов трения требуют определённого времени, т. е. присутствует переходная фаза, влияние которой на траектории движения сепарируемых компонентов никем не рассматривалось. Описание процесса скатывания различных тел вращения по наклонным поверхностям является одной из фундаментальных задач теоретической механики. Разработкой основ решения данной задачи занимались многие другие учёные, однако, несмотря на это, аналитические описания были получены лишь для отдельных упрощённых случаев. Частные решения, близкие к реальным, могут быть получены лишь при компьютерных реализациях численных моделей. Исходя из анализа предложенных на сегодняшний день методов решений подобных задач, считаем, что для нашего случая наиболее эффективным является использование среды виртуального моделирования машин MSC ADAMS [9, 10].

Анализ и обсуждение результатов. В результате проведенных машинных экспериментов с генерацией по нормальному закону фрикционных свойств компонентов разделяемого вороха и на различных частотах вращения барабана выявлено, что траектория движения компонентов вороха носит волновой характер (рису-

нок 5). При этом изменение частоты вращения барабана на траекторию перемещения картофеля влияет незначительно, в отличие от почвенных комков, которые совершают колебания, подъем и скатывание с более высокой частотой и амплитудой. При условии схода компоненты с сепарирующей поверхности в первой четверти колебания можно избежать пересечения траекторий, а разницу углов подъема почвенных комков и клубней можно использовать как раздельный признак и рассмотреть возможность отделения клубней от почвенных комков в одноподвижных потоках. Проведённый анализ позволил сделать вывод о необходимости поиска конструктивно-кинематических параметров, при которых траектории перемещения компонентов вороха не пересекаются, а разница отклонений по оси X при сходе была бы максимальной.

На рисунке 6 представлен фрагмент анализа траектории перемещения клубней картофеля и почвенных комков в форме идеального шара, эллипса и «блина» в виртуальной модели конического барабана с углом образующей $\alpha = 30^\circ$, иллюстрирующий возможность получения существенной разности точек схода клубней картофеля и почвенных комков. В рассмотренной нами виртуальной модели максимальное отличие углов схода при $\omega = 12,5$ с⁻¹ было достигнуто практически в момент схода клубней картофеля

и почвенных комков с сепарирующей поверхности. Для получения максимальной разности достаточно незначительно увеличить угол наклона оси вращения β .

Правомерность результатов, полученных на виртуальных моделях, была проверена на экспериментальной установке, схема которого приведена на рисунке 7.

Рисунок 5

Фрагмент анализа траекторий перемещения идеальных почвенных комков (— · —) и клубней картофеля (—) в горизонтальной плоскости при движении по внутренней поверхности вращающегося резинового усеченного конуса при $\omega = 12,56 \text{ с}^{-1}$, $\alpha = 15^\circ$ и $\beta = 85^\circ$

Рисунок 6

Фрагмент анализа траекторий (а) и графики углов подъёма (б) клубней картофеля и почвенных комков в форме идеального шара, эллипса и «блина»

Рисунок 7

Барабанный сепаратор картофельного вороха в форме усеченного конуса (нумерация в тексте)

Предложенное устройство содержит сепарирующую поверхность, выполненную в виде гибкой бесконечной ленты в форме тела вращения, например, усечённого конусного барабана 1, внутренняя сторона которого снабжена эластичными пальцами 2. Меньшее основание конусного барабана 1 закреплено на цилиндрическом ободе 3, вращающемся на направляющих роликах 4 посредством привода 5. Вдоль боковой поверхности барабана 1 на раме 6 установлены поддерживающие ролики 7. В нижней части рамы 6 размещён деформирующий валик 8, способный перемещаться в продольном и поперечном направлениях и изменять угол наклона и обеспечивающий создание на внутренней стороне сепарирующей поверхности по ходу вращения выпуклость переменной высоты, увеличивающуюся к нижнему основанию барабана 1. Рама 6 выполнена с возможностью изменения угла наклона относительно горизонта. Подача вороха осуществляется транспортёром-питателем 9.

Выводы. Предложенное устройство обеспечивает возможность отделения близких по размерным характеристикам почвенных комков от клубней картофеля в однонаправленном потоке по комплексу физико-механических показателей,

преобладающими среди которых является плотность и трение качения. Использование программного комплекса визуально-динамического моделирования «MSC ADAMS» в сочетании с имитационным позволяет выбрать и оптимизировать параметры проектируемых устройств в диалоговом режиме. Проведённые теоретические расчёты, эксперименты на виртуальной модели и в лабораторно-полевых условиях позволяют рекомендовать следующие технологические и конструктивные параметры: угол наклона сепарирующей поверхности к горизонту $28...35^\circ$; максимальная скорость подачи клубней на вход устройства – не более 0,5 м/с; допустимая скорость схода клубней не должна превышать 1,5 м/с; входной диаметр барабана, исходя из урожайности 250 ц/га и обеспечения требуемой производительности при уборке одного ряда, должен быть не менее 0,6 м, длина боковой поверхности барабана – не более 1,2 м; обороты барабана должны иметь плавный диапазон регулирования от 6 до 10с^{-1} , исходя из условий необходимости подбора оптимального кинематического режима. Установка предложенного сепаратора на картофелеуборочный комбайн обеспечит не менее чем двукратное уменьшение содержания почвенных частиц в сходовом ворохе.

Библиографический список

1. Картофелеводство в регионах России [Текст] / Отв. за вып. Б.В. Анисимов, Г.И. Филиппова // Актуальные проблемы науки и практики. ВНИИКС. М., 2006. 246 с.
2. Бежанова, О. Второй хлеб [Электронный ресурс] / О. Бежанова, Н. Кабирова // Экономические известия № 45 (215) от 14.11.2011. Режим доступа: <http://statuspress.com.ua>.
3. Колчин, Н.Н. Комплексы машин и оборудования для послеуборочной обработки картофеля и овощей [Текст] / Н.Н. Колчин. М.: Машиностроение, 1982. С. 268.
4. Зубков, В.А. Развитие технической модернизации АПК и сельхозмашиностроения [Текст] / В.А. Зубков // Тракторы и сельхозмашины. 2010. № 8. С. 3.
5. Камалетдинов, Р.Р. Рекомендации по совершенствованию рабочих органов картофелеуборочных машин [Текст] / Р.Р. Камалетдинов; 2-е изд. Уфа: Башкирский ГАУ, 2014. 44 с.
6. Камалетдинов, Р.Р. Для комбайновой уборки картофеля требуется специализированная технология возделывания [Текст] / Р.Р. Ка-

малетдинов, Ф.Н. Галлямов // Картофель и овощи. 2006. № 6. С. 5–6.

7. Мартынов, В.М. Математическое моделирование движения компонентов вороха корнеплодов в приемно-выкапывающем устройстве [Текст] / В.М. Мартынов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2009. № 1. С. 12–13.

8. Мартынов, В. М. Проектирование рабочих органов и машин для уборки корнеплодов [Текст] / В.М. Мартынов. Уфа: Башкирский ГАУ, 2011. 250 с.

9. Сабирзянов, И.Р. Разработка конструкции и оптимизация параметров устройства для сепарации корнеклубнеплодов [Текст] / И.Р. Сабирзянов, Р.Р. Камалетдинов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2014. № 6. С. 72–74.

10. Иванов, А.А. MSC.ADAMS: теория и элементы виртуального конструирования и моделирования [Текст]: учебное пособие / А.А. Иванов. М.: Московское представительство MSC.Software GmbH, 2003. 97 с.

Сведения об авторах

1. **Камалетдинов Рим Рашитович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительно-дорожных, коммунальных и сельскохозяйственных машин, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, e-mail: krr53@mail.ru.

2. **Аблеев Рим Шагитович**, кандидат технических наук, ст. преподаватель кафедры автомобилей и машинно-тракторных комплексов, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, e-mail: shagitovich.RA@mail.ru.

В работе представлены результаты исследований по обоснованию рациональных параметров и разработке сепаратора картофельного вороха, оказывающих минимальное механическое воздействие на клубень при работе на тяжелых переувлажненных почвах. На основании анализа работ, посвящённых сепарации сельскохозяйственных культур на наклонных поверхностях, и выполненных нами аналитических модельных построениях получен вывод, что центробежные силы и коэффициенты трения оказывают значительное влияние на траекторию скатывания картофельного вороха по наклонным поверхностям, что подтвердило возможность создания устройства для отделения клубней картофеля от почвенных комков в форме вращающегося усечённого конуса с внутренней сепарирующей поверхностью. При обосновании конструктивно-технологических параметров использованы методы виртуального моделирования в среде MSC ADAMS. Выявлено, что траектория движения компонентов вороха носит волновой характер. При условии схода компоненты с сепарирующей поверхностью в первой четверти колебания можно избежать пересечения

траекторий, а разницу углов подъёма почвенных комков и клубней использовать как раздельный признак и рассмотреть возможность отделения клубней от почвенных комков в однонаправленных потоках. В результате проведённых исследований предложена конструкция сепаратора картофельного вороха в виде вращающегося барабана в форме усечённого конуса с разделительным валиком, имеющего следующие технологические и конструктивные параметры: угол при вершине конуса 60° , необходимый диапазон наклона оси вращения $0...15^\circ$; максимальная скорость подачи клубней на вход устройства не более 0,5 м/с; длина образующей 1,2 м ограничена допустимой скоростью схода клубней 1,5 м/с; входной диаметр барабана, исходя из урожайности 250 ц/га не менее 0,6 м; обороты конуса должны иметь плавный диапазон от 6 до 12 с^{-1} , исходя из условий необходимости подбора оптимального кинематического режима. Лабораторно-полевые испытания показали, что при использовании демпфирующего валика обеспечивается отделение до 80 % соизмеримых с клубнем картофеля почвенных примесей.

R. Kamaletdinov, R. Ableev

REASONING RATIONAL PARAMETERS FOR A ROOT CROP SEPARATOR WITH A ROTATING FRUSTO-CONED INNER SEPARATION SURFACE

Key words: *potato harvester; potato tubers; soil clods; rotating frustrum of cone; separation; ramp angles.*

Authors' personal details

1. **Kamaletdinov Rim**, Doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Road Construction, Municipal and Farm Machinery department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», Ufa, 50-letiya Otyabrya St., 34, e-mail: krr53@mail.ru.

2. **Ableev Rim**, Candidate of technical sciences, senior lecturer of the Cars and Machine-and-Tractor aggregates department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», Ufa, 50-letiya Otyabrya St., 34, e-mail: shagitovich.RA@mail.ru.

The paper presents the results of studies on the substantiation of rational parameters and the development of a potato heap separator with a minimal

mechanical effect on the tuber when working on heavy wet soil. Based on the analysis of papers devoted to the studies of farm crop separation on in-

clined surfaces and the analytical model solutions conducted by the authors, it was found that centrifugal forces and friction coefficients have a significant impact on the rolling path of the potato pile components on inclined surfaces, that proved the possibility of creating a device with a rotating frusto-coned internal separating surface for separating potato tubers from soil clods. When constructive and technological parameters were reasoned, virtual modeling in the MSC ADAMS environment was used. The movement trajectory of pile components were found to be of a wave nature. If the components leave the separating surface in the first quarter of the oscillation, it is possible to avoid trajectory intersection. The difference in soil clod and tuber elevation angles can be used as a separating feature. It can be studied for possible separation of tubers

from soil clods in unidirectional flows. As the research result, the design of a potato pile separator in the form of a frusto-coned rotating drum with a separating roller characterized by the following technological and design parameters is proposed: the cone angle 60° ; the required inclination rate of the rotation axis is $0...15^\circ$; the maximum feed rate of tubers to the entrance of the device is not more than $0,5 \text{ m/s}$; the length of the generatrix being $1,2 \text{ m}$ is limited by the permissible speed of tubers – $1,5 \text{ m/s}$; the input diameter of the drum, based on the yield of 250 kg/ha is not less than $0,6 \text{ m}$; the speed of the cone should have a smooth range from 6 to 12 s^{-1} based on the conditions necessary to select the optimal kinematic mode. Laboratory field tests have shown that using a damping roller up to 80% of soil impurities are separated from potato tubers.

© Камалетдинов Р.Р., Аблеев Р.Ш.