

Определение физико-механических свойств и закономерностей процессов трения комков почвы и клубней картофеля при их разрушении и отделении

Алексей Семенович Дорохов, Алексей Викторович Сибирёв, Максим Александрович Мосяков, Николай Викторович Сазонов, Мария Михайловна Годяева

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Россия

e-mail: sibirev2011@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований определения закономерностей процессов трения на обрабатываемый упруго-пластичный материал с позиции создания рабочих органов машин для его возделывания и уборки. Описаны методика и применяемое оборудование при проведении исследований. Разработана методика проведения исследований и проведены экспериментальные исследования по определению закономерностей процессов трения на обрабатываемый упруго-пластичный материал и товарную продукцию клубней картофеля при разрушении комков почвы и их отделении. Разработан стенд для определения величины разрушения упруго-пластичного материала, конструкция которого позволяет определить величину отклонения клубня/комка почвы при взаимодействии с материалом сепарирующего устройства, тем самым выполнить фиксацию процесса сцепления исследуемых материалов. Установлено, что разность коэффициента восстановления K_v по средним величинам не превышает 0,066 и учитывая технические трудности ориентации клубня в процессе удара, данным фактором при проектировании и расчете рабочего органа сепарации следует пренебречь, т.е. ориентировать клубень перед ударом нет необходимости.

Ключевые слова: картофель; клубни; размерные характеристики; массовые характеристики; форма поверхности; стенд; почвенный комок

Для цитирования: Дорохов А. С., Сибирёв А. В., Мосяков М. А., Сазонов Н. В., Годяева М. М. Определение физико-механических свойств и закономерностей процессов трения комков почвы и клубней картофеля при их разрушении и отделении // Аграрный научный журнал. 2024. № 1. С. 116–124. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i1pp116-124>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Determination of physical and mechanical properties and patterns of friction processes of soil lumps and potato tubers during their destruction and separation

Alexey S. Dorokhov, Alexey V. Sibirev, Maxim A. Mosyakov, Nikolay V. Sazonov, Maria M. Godyaeva

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

e-mail: sibirev2011@yandex.ru

Abstract. The results of studies of determining the patterns of friction processes on the processed elastic-plastic material from the position of creating working parts of machines for its cultivation and harvesting are presented. The methodology and equipment used during research are described. A research methodology has been developed and experimental studies have been carried out to determine the patterns of friction processes on the processed elastic-plastic material and commercial products of potato tubers during the destruction of soil lumps and their separation. A stand has been developed to determine the amount of destruction of an elastic-plastic material, the design of which allows one to determine the amount of deviation of the tuber/lump of soil when interacting with the material of the separating device, thereby recording the process of adhesion of the materials under study. It has been established that the difference in the recovery coefficient by average values does not exceed 0.066 and given the technical difficulties of orienting the tuber during the impact process, this factor should be neglected when designing and calculating the separation working body, i.e. There is no need to orient the tuber before impact.

Keywords: potato; tubers; dimensional characteristics; mass characteristics; surface shape; stand; soil clod

For citation: Dorokhov A. S., Sibirev A. V., Mosyakov M. A., Sazonov N. V., Godyaeva M. M. Determination of physical and mechanical properties and patterns of friction processes of soil lumps and potato tubers during their destruction and separation. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2024;(1):116–124. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i1pp116-124>.





Введение. Результатами исследований размерно-массовых характеристик исследуемого материала определяются принципиальная конструктивно-технологическая схема сельскохозяйственной машины, а также основные конструктивно-режимные параметры ее рабочих органов [1].

Определяющее влияние физико-механических свойств материала прослеживается при разработке высаживающего (высевающего) аппарата посадочной (посевной) машины, при проектировании корнеизвлекающих и сепарирующих рабочих органов уборочных машин, при этом лимитирующим фактором при определении основных конструктивных параметров рабочих органов технического средства являются размерно-массовые характеристики исследуемого материала и его физико-механические свойства [4].

Исследованием некоторых физико-механических свойств, а также размерно-массовых характеристик клубней картофеля и механических примесей клубненого вороха в разное время занимались многие ученые: Н.П. Ларюшин, Н.П. Мачнева, О.Н. Кухарев, П.А. Емельянов [2, 3, 5, 7].

Увеличение производительности с одновременным повышением качественных показателей уборки картофеля невозможно обеспечить без создания системы функционирующих элементов уборочной машины с определением величины изменяющегося внешнего воздействия X почвенно-климатических условий с целью адаптации функций состояния Z и управляющего воздействия U (изменение режимных и технологических параметров рабочих органов машины для уборки картофеля) к изменяющимся условиям внешней среды для обеспечения оптимального результирующего показателя Y работы уборочной машины [6, 8, 13].

В связи с тем что в настоящее время в конструкции сепарирующих устройств уборочных машин используются полимерные и композиционные материалы различных свойств, необходимо выполнить определение закономерностей взаимодействия клубненого вороха с материалами рабочих органов уборочных машин для обеспечения возможности создания современных устройств очистки товарной продукции от механических примесей [11, 17, 18].

Цель исследований – эмпирическое определение закономерностей процессов трения комков почвы и клубней картофеля при их разрушении и отделении.

Материалы и методы. В связи с тем что в настоящее время рабочая поверхность сепарирующих устройств уборочной машины с целью исключения повреждений товарной продукции имеет покрытие из полимерно-композиционных материалов, необходимо определить значение липкости различных видов почвы на рабочей поверхности современных сепарирующих устройств картофелеуборочных машин.

Данное обстоятельство обусловлено тем, что проведенные ранее исследования А.А. Сорокина, Н.А. Качинского, Б.А. Кина направлены на определение липкости почвы по отношению к металлической пластине ввиду того, что в конструкции очистительных устройств первичной сепарации уборочной машины образцов 20-го века использовались в качестве рабочей поверхности прутковых элеваторов – металлические прутки [12–14].

В связи с тем что размеры и форма клубней являются значимыми факторами при проектировании устройств сепарации [16, 17], к числу которых следует отнести длину (L_k), высоту (H_k) и толщину (T_k) клубня (рис. 1) выполнены исследования размерно-массовой характеристики клубней картофеля и комков почвы.

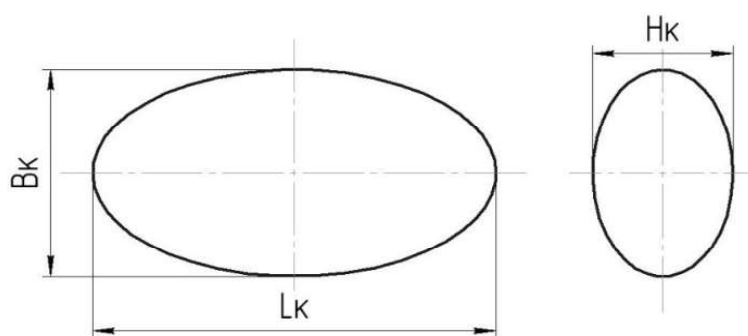


Рис. 1. Размерные характеристики клубня картофеля
Fig. 1. Dimensional characteristics of a potato tuber



В качестве объекта исследований для определения закономерностей процессов трения при взаимодействии материала сепарирующего устройства выбраны комки почвы и клубни картофеля, в качестве материала сепарирующего устройства – пластина резиновая марки ТМКШ и полимерный материал: поливинилхлорид (табл. 1, 2, рис. 2, 3).

Таблица 1. Техническая характеристика пластины резиновой марки ТМКШ

Table 1. Technical characteristics of the TMKShch rubber plate

Параметр	Единица измерения	Значение
Плотность единицы Шора	ед.	35–50
Прочность при растяжении	МПа	4
Удлинение при разрыве	%	300

Таблица 2. Техническая характеристика поливинилхлорида

Table 2. Technical characteristics of polyvinyl chloride

Параметр	Единица измерения	Значение
Молекулярная масса	моль	40 000–145 000
Плотность	г/см ³	1,34–1,34
Насыпная плотность	г/см ³	0,4–0,7
Температура разложения	–С	100–140
Температура стеклования	°С	70–80

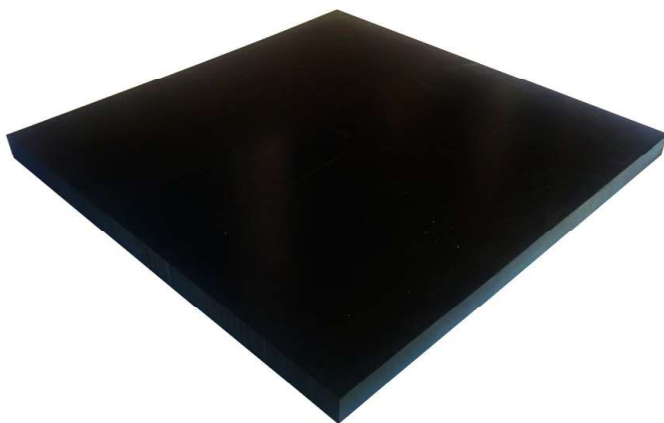


Рис. 2. Общий вид пластины резиновой марки ТМКШ

Fig. 2. General view of the TMKShch rubber plate



Рис. 3. Общий вид пластины поливинилхлорида

Fig. 3. General view of the PVC plates

Размеры комков почвы/клубней картофеля определяли штангенциркулем (рис. 4), который обеспечивает точность измерения, равную 0,02 мм.

Для проведения данных исследований выполняли подготовку образцов почвы (чернозем, супесь и легкий суглинок), соответствующую ее влажности (от 10 до 30 %) при уборке и формировании монолитного почвенного пласта с соответствующими размерами: длина ($L_k = 5$ см), высота ($H_k = 5$ см), толщина ($T_k = 5$ см).

Для определения качества очистки товарной продукции при взаимодействии с сепарирующим устройством уборочной машины необходимо исследовать закономерности процессов очистки и трения, возникающие при взаимодействии упруго-пластичного материала (комков почвы) с материалом изготовленного очистительного устройства [18, 19].

В связи с этим разработана конструктивно-технологическая схема прибора (рис. 5), конструкция которого позволяет определить величину отклонения клубня/комка почвы при взаимодействии с материалом сепарирующего устройства, тем самым выполнить фиксацию процесса сцепления исследуемых материалов.

Общий вид лабораторного стенда представлен на рис. 6.

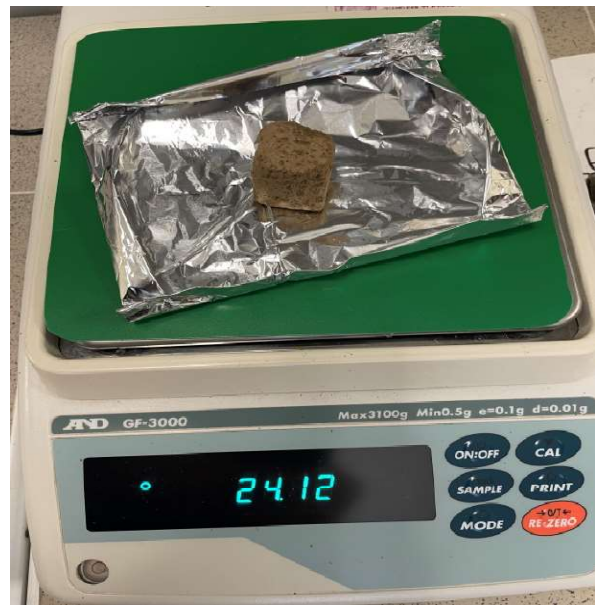


Рис. 4. Определение размерно-массовых характеристик клубней картофеля и комков почвы
Fig. 4. Determination of size and mass characteristics of potato tubers and soil lumps

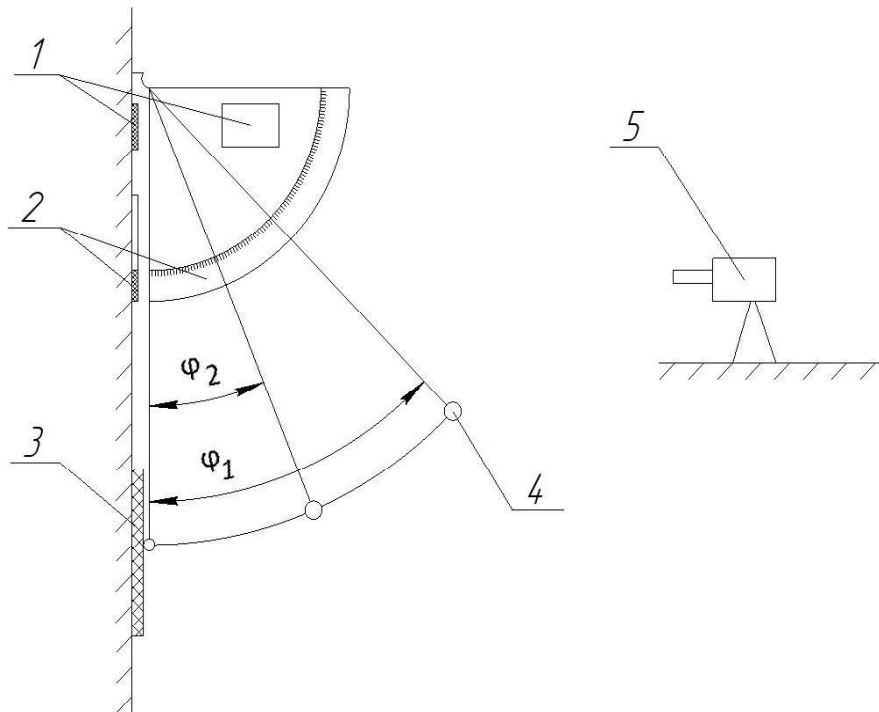


Рис. 5. Схема стенда для определения величины разрушения упруго-пластичного материала:
1 – транспортир; 2 – шкала транспортира; 3 – пластина исследуемого материала очистительного устройства; 4 – маятник эластичный; 5 – элемент видео-фиксации
Fig. 5. Scheme of a stand for determining the magnitude of destruction of an elastic-plastic material:
1 – protractor; 2 – protractor scale; 3 – plate of the tested material of the cleaning device; 4 – elastic pendulum;
5 – video recording element

Методика проведения исследований заключается в следующем.

Исследуемый материал – комок почвы или клубень картофеля закреплялся посредством резинового хомута 5 на эластичном маятнике 4 и включалась видео-фиксация. На площадке 6 устройства закреплялась посредством винтового соединения с потайной головкой пластина 3 с исследуемым материалом размером 300×300 мм и толщиной 10 мм. Данная конструкция крепления исследуемого материала сепарирующего рабочего органа обеспечивает жесткую поверхность соударения большой массы.

Далее выполнялся отвод эластичного маятника 4 по вертикали на расстояние от 5 до 30 см с фиксацией данного параметра по шкале перемещения на транспорте 1, закрепленного на площадке 2.



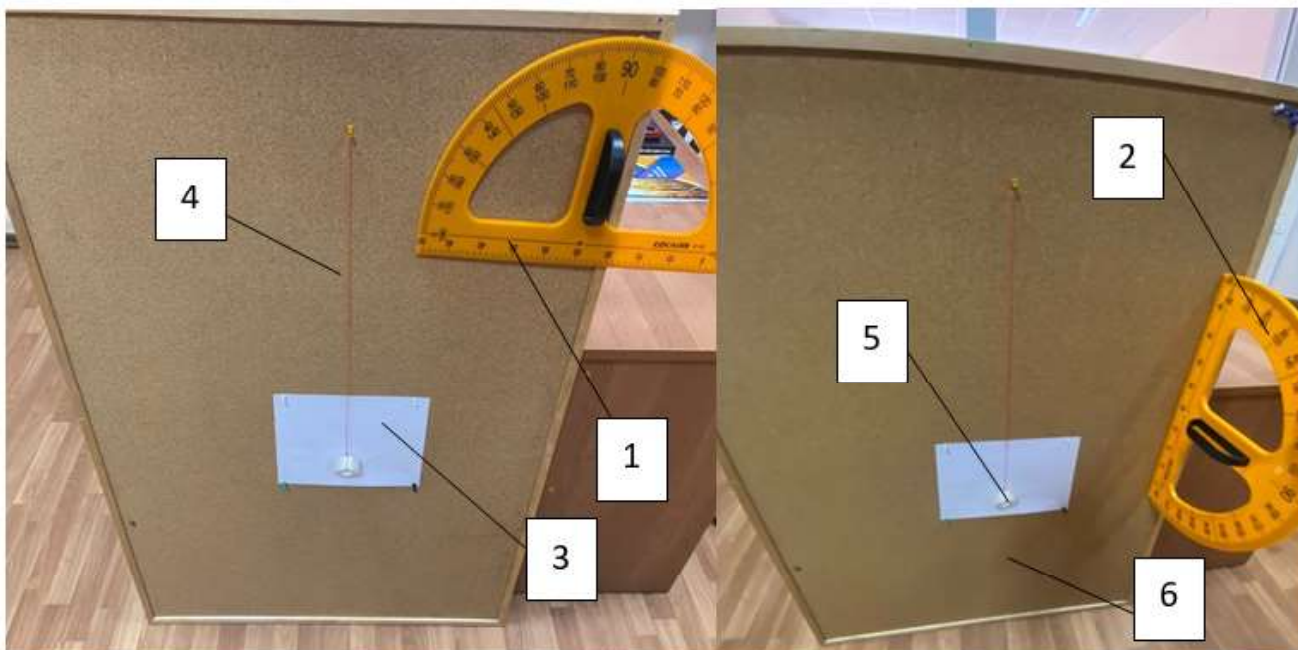


Рис. 6. Общий вид стенда для определения величины разрушения упруго-пластичного материала: 1 – транспортир; 2 – шкала транспортира; 3 – пластина исследуемого материала очистительного устройства; 4 – маятник эластичный; 5 – хомут резиновый; 6 – площадка опорная
Fig. 6. General view of the stand for determining the magnitude of destruction of an elastic-plastic material: 1 – protractor; 2 – protractor scale; 3 – plate of the tested material of the cleaning device; 4 – elastic pendulum; 5 – rubber clamp; 6 – support platform

Выбор максимального расстояния отвода клубня обусловлен предельно допустимой высотой падения картофеля на твердую поверхность, величина которого обоснована в диссертационных исследованиях В.А. Хвостовым и Э.С. Рейнгартом. Для оценки взаимодействия клубней клубненоносного вороха с исследуемым материалом была проведена скоростная съемка процесса взаимодействия с помощью камеры со скоростью 200 кадров в секунду с использованием мультикадровой съемки.

Результаты исследований. Для обработки полученного материала производился покадровый анализ на фоне масштабной сетки.

Для анализа траектории движения компонентов выбирались типичные траектории средних по размеру клубней, полученные результаты исследований обрабатывались методами математической статистики [20].

После удара о материал сепарирующего устройства исследуемый объект отскакивает и образует с вертикалью угол φ_2 . Коэффициент восстановления определяется по формуле

$$K_B = \frac{V_2}{V_1} = \frac{\sin \varphi_2 / 2}{\sin \varphi_1 / 2}, \quad (1)$$

где V_1 – скорость движения исследуемого объекта до взаимодействия с материалом сепарирующего устройства, м/с; V_2 скорость движения исследуемого объекта после взаимодействия с материалом сепарирующего устройства, м/с.

Опыты проводили с клубнями произвольной формы, но при этом следили, чтобы падение и отражение выполнялось в одной плоскости. Если клубень отражался не в плоскости падения, то опыт не учитывался. Углы отклонения эластичного маятника и движение в одной плоскости отмечались транспортиром.

В качестве объекта исследований для определения закономерностей процессов трения при взаимодействии материала сепарирующего устройства выбраны комки почвы и клубни картофеля, в качестве материала сепарирующего устройства – пластина резиновая марки ТМКЩ и полимерный материал: поливинилхлорид.



После обработки полученных экспериментальных исследований получены эмпирические закономерности изменения коэффициента восстановления K_v от скорости V_k соударения клубня, массы клубня $m_{кл}$ и камня m_k , а также влажности почвы W_p :

$$K_{Bv} = K_0 + aV_k, \quad (2)$$

где K_0 – коэффициент упругости клубня; a – длина клубня, мм.

$$K_{Bm} = \frac{(m_{кл} + m_k)}{c \cdot (m_{кл} + m_k) + b \cdot (m_{кл} + m_k) + a}, \quad (3)$$

где b – ширина клубня, мм; c – толщина клубня, мм.

$$K_{Bw} = cW^2 + bW + a. \quad (4)$$

Значения коэффициентов a , b , c и K_0 определены методом наименьших квадратов и указаны в табл. 3.

Таблица 3. Значения коэффициентов восстановления клубней картофеля

Table 3. Values of recovery factors for potato tubers

Рисунок	График	Значения коэффициентов				Материал
		a	b	c	K_0	
7, а	1	–0,037	–	–	0,783	ТМКЩ
7, а	2	–0,018	–	–	0,754	ТМКЩ
7, а	3	–0,032	–	–	0,697	ПВХ
7, а	4	5,245	1,354	0,00028	–	ТМКЩ
7, а	5	2,485	1,458	0,00025	–	ТМКЩ
7, а	6	20,6	1,472	0,00087	–	ПВХ
7, б	1	3,4	1,451	–	–	ТМКЩ
7, б	2	0,87	1,464	–0,0004	–	ТМКЩ
7, б	3	0,784	–0,006	–0,000301	–	ТМКЩ

Эксперименты проведены в октябре 2023 г. на урожай картофеля, убранного механизированным способом в сентябре 2023 г. Масса исследуемых образцов клубней картофеля варьировала от 90 до 100 г.

Для определения зависимостей 1, 2 и 3 (см. рис. 7) была принята скорость удара 1,6 м/с.

Анализ рис. 7 свидетельствует об изменении коэффициента восстановления свежевыкопанного клубня картофеля (см. рис. 7, б) и камня (см. рис. 7, а) от массы и искусственно созданного комка почвы от влажности (см. рис. 7, в).

Как видно, графические зависимости рис. 7 (а, б) практически сливаются, т.е. коэффициент восстановления камня и свежесобранных клубней по сепарируемому материалу типа ТМКЩ одинаков.

Следовательно, клубни от камней отделяться не будут. Кривая рис. 7 (в) в начале своего восхождения пересекается с кривыми а и б, а затем с увеличением влажности почвы повышается. Поэтому можно считать, что клубни не будут отделяться от почвенных комков при влажности почвы меньше 12 %.

Однако при влажности почвы 15–20% и выше разница в коэффициентах восстановления клубня картофеля и комка почвы достигает значительной величины и в исследуемом диапазоне можно ожидать устойчивого отделения клубней картофеля от почвы.

После обработки экспериментальных исследований определения коэффициентов восстановления клубней картофеля при надежности данных 0,9 получили следующие значения коэффи-



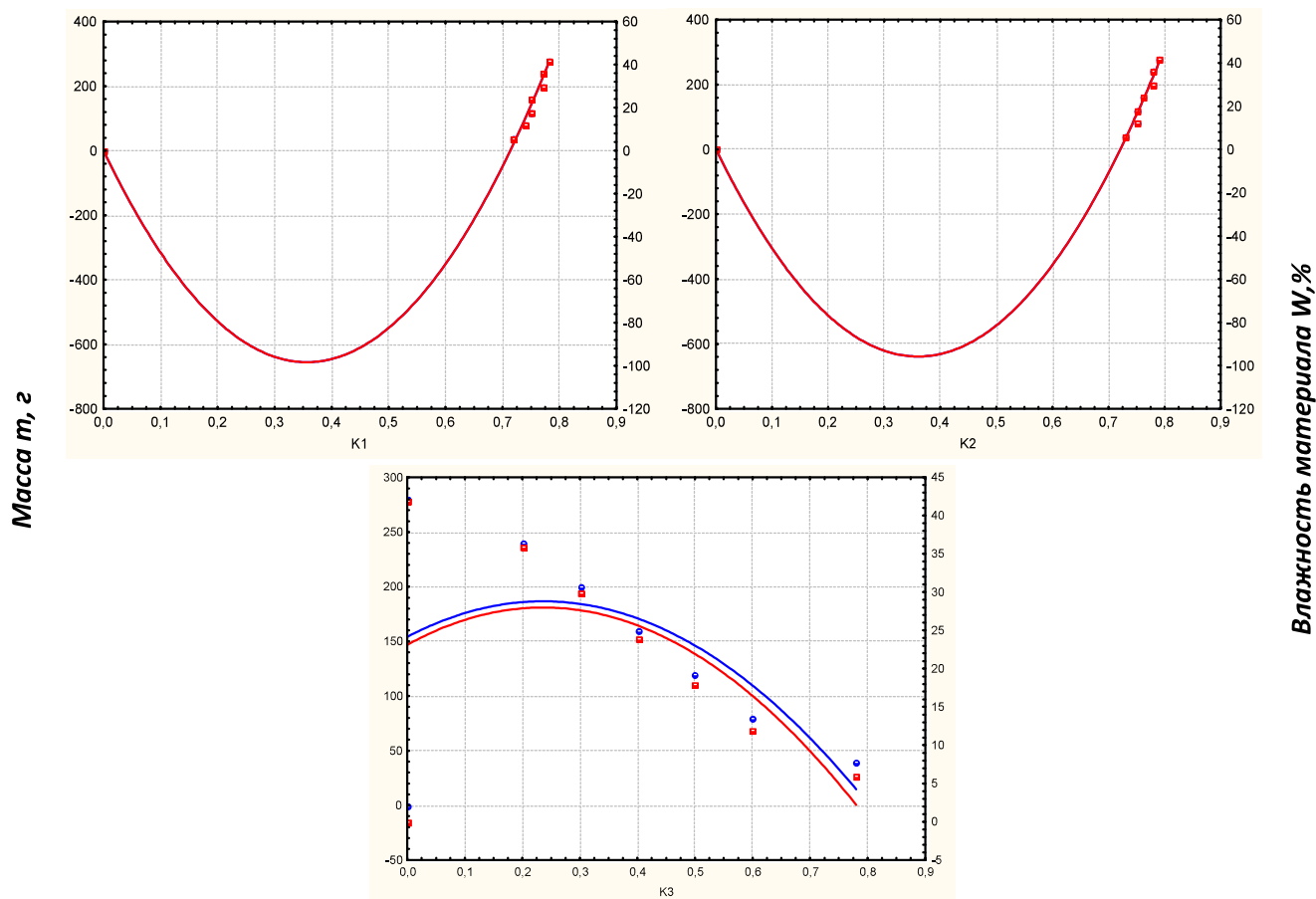


Рис. 7. Зависимость изменения коэффициента восстановления комков почвы, клубней картофеля и искусственных почвенных комков от веса и влажности: а – камень; б – клубень картофеля сорта Ред Скарлет; в – почвенный шарик

Fig. 7. Dependence of changes in the recovery coefficient of soil lumps, potato tubers and artificial soil lumps on weight and humidity: a – stone; b – potato tuber of Red Scarlet variety; c – soil ball

коэффициента восстановления K_v : ориентация по оси а: $0,682 \pm 0,04$; ориентация по оси б: $0,66 \pm 0,04$; ориентация по оси с: $0,616 \pm 0,043$.

Закключение. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что коэффициент восстановления K_v клубня картофеля и почвенного комка зависит от ряда внешних факторов: материала соударяющейся поверхности, скорости удара, массы, точки удара и влажности исследуемого упруго-пластичного материала.

Отделение клубней картофеля от почвенных комков исследуемым способом, основанным на упруго-пластичных свойствах не обеспечивает требуемое качество сепарации, так как их коэффициенты восстановления взаимно перекрываются.

При разработке сепарирующих устройств уборочной машины, принцип работы которых основан на разделении товарной продукции от механических примесей по разности коэффициентов восстановления не будут качественно выполнять процесс очистки, но при влажности почвы от 15–20 % и выше разница в коэффициенте восстановления клубня картофеля и почвы достигает значительной величины и процесс сепарации должен быть устойчивым.

Работа выполнена при государственной поддержке РНФ конкурса 2022 года «Проведение исследований научными группами под руководством молодых ученых» Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными, в том числе молодыми учеными No 22-76-10002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жевора С. В., Ружьев В. А., Теплинский И. З. Современное лабораторное оборудование и сельскохозяйственная техника для селекции и семеноводства картофеля. М., 2019. 80 с





2. Зернов В. Н., Пономарев А. Г., Колчин Н. Н., Петухов С. Н. Развитие механизированной посадки картофеля в селекционных и семеноводческих питомниках // *Картофель и овощи*. 2017. № 12. С. 23–25.
3. Зернов В. Н., Колчин Н. Н., Петухов С. Н., Сибирев А. В., Еремченко В. И., Шогенова М. М. Техничко-экономические изыскания технических средств, определяющих критические машинные технологии на разных этапах селекции и семеноводства картофеля // *Картофелеводство* Материалы научно-практической конференции. М., 2017. С. 98–106.
4. Калинин А. Б. Мировые тенденции и современные технические системы для возделывания картофеля – Учебное пособие для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия». СПб., 2016. 160 с.
5. Костенко М. Ю., Рембалович Г. К., Жбанов В. С., Новиков Н. Н., Тетерн В. С., Мельгичук Д. С. Влияние элементов сепарирующего элеватора картофелеуборочных машин на его надежность // *Техника и оборудование для села*. 2020. № 7 (277). С. 34–37.
6. Лобачевский Я. П., Бейлис В. М., Ценч Ю. С. Аспекты цифровизации системы технологий и машин. *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019; (36): 40–45. Режим доступа: <https://vestnik.viesh.ru/journal/vypusk-3-36-2019/>.
7. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021;15(4):6–10.
8. Лачуга Ю. Ф., Измайлов А. Ю., Лобачевский Я. П., Шогенов Ю. Х. Интенсивные машинные технологии, роботизированная техника и цифровые системы для производства основных групп сельскохозяйственной продукции. *Техника и оборудование для села*. 2018; (7):2–7.
9. Сорокин А. А., Пономарев А. Г. Производство картофеля и овощей в фермерских хозяйствах // *Ресурсосберегающие технологии и техническое обеспечение производства зерна: сб. науч. докладов Междунар. науч.-техн. конф.* М., 2010. С. 134–138.
10. El-Rahman Abd. Development and performance evaluation of a simple grading machine suitable for onion sets / Abd. El-Rahman; M. Magda // *Soil. Sci. and Agric. Eng. Mansoura Univ*. 2014. No. 2. P. 213–226. Available online: https://www.researchgate.net/publication/339175331_Performance_Evaluation_of_Onion_Grader. DOI:10.29322/IJSRP.10.01.2020. p 9768(accessed on 01 June 2021).
11. Akdemir B. Mechanized panting and harvesting of onion / B. Akdemir, P. Ulger, S. Arin // *Agric. Mech. Asia*. 1993. No. 24.P. 23–26.
12. Shanmugam C. J., Senthilkumar G. Indigenous development of low cost harvesting machine// *ARPN J. Eng. Appl. Sci*. 2017. No. 12. P. 4489–4490. Available online: https://www.researchgate.net/publication/319313238_Indigenous_development_of_low_cost_harvesting_machine.htm. ISSN 1819-6608(accessed on 01 June 2021).
13. Pasaman B. The determination of the parameters of a ploughshare-rotor potato digger / B. Pasaman, V. Zakharchuk // *Econtechmod. Int. Q. J*. 2012. No. 1. P. 43–47. Available online: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Determination-of-the-Parameters-of-a-Potato-Pasamanakharchuk/794ce17b18271036b572f10b309522bb1f8be335/content>. ISSN 2084–5715(accessed on 01 June 2021).
14. Massah J., Lotf A., Arabhosseini A. Effect of Blade Angle and Speed of Onion Harvester on Mechanical Damage of Onion Bulbs // *Agricultural mechanization in Asia, Africa, and Latin America*. 2012. Vol. 43 (3). P. 60–63.
15. Mohamed K. Edrris, Khalid A. Al-Gaadi, Abdalhaleem A. Hassaballa, ElKamil Tola, Khalid A. M. Ahme. Impact of soil compaction on the engineering properties of potato tubers // *Int J Agric & Biol Eng*. 2020. Vol. 13(2). P. 163–167.
16. Nappe Mordi N. Al-Dosary (2016), Potato harvester performance on tubers damage at the eastern of Saudi Arabia, *CIGR Journal*, Issue number 18(2):32–42.
17. Silva C. S., Seider W. D., Lior N. Exergy efficiency of plant photosynthesis // *Chemical engineering science*. 2015. Vol. 130. P. 151–171.
18. Sun D. X, Zhang A. M, Gong J. X. (2016). Design and experiment on 1SZL-250A type subsoiling rotary tillage fertilizer combined soil working machine, *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, Issue number 37(4):1–6.
19. Dorokhov A. S., Aksenov A. G., Sibirev A. V., Sazonov N. V., Mosyakov M. A., Godyaeva M. Results of laboratory studies of the automated sorting system for root and onion crops // *Agronomy*. 2021. Vol. 11. No. 6. P. 1257.
20. Ценч Ю. С., Годлевская Е. В. Математическое моделирование как инструмент проектирования сельскохозяйственных машин и агрегатов (применительно к истории развития научной школы Южного Урала). *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023;17(2):4–12.

1. Zhevora S. V., Ruzhiev V. A., Teplinsky I. Z. Modern laboratory equipment and agricultural machinery for potato selection and seed production. Moscow, 2019. 80 p. (In Russ.).
2. Zernov V. N., Ponomarev A. G., Kolchin N. N., Petukhov S.N. Development of mechanized planting of potatoes in breeding and seed nurseries. *Potatoes and Vegetables*. 2017;12:23–25. (In Russ.).
3. Zernov V. N., Kolchin N. N., Petukhov S. N., Sibirev A. V., Eremchenko V. I., Shogenova M. M. Technical and economic research of technical means that determine critical machine technologies at different stages of potato selection and seed production. *Potato Growing*. Moscow, 2017:98–106. (In Russ.).
4. Kalinin A. B. World trends and modern technical systems for the cultivation of potatoes. St. Petersburg, 2016. 160 p. (In Russ.).
5. Kostenko M. Yu., Rembalovich G. K., Zhbanov V. S., Novikov N. N., Tetern V. S., Melgichuk D. S. Influence of elements of the separating elevator of potato harvesters on its reliability // *Machinery and equipment for the village*. 2020. No. 7 (277). pp. 34–37. (In Russ.).
6. Lobachevsky Ya. P., Beilis V. M., Tsench Yu. S. Aspects of digitalization of the system of technologies and machines. *Electrical technologies and electrical equipment in agriculture*. 2019; (36):40–45. Access mode: <https://vestnik.viesh.ru/journal/vypusk-3-36-2019/>. (In Russ.).
7. Lobachevsky Ya. P., Dorokhov A. S. Digital technologies and robotic technical means for agriculture. *Agricultural machines and technologies*. 2021;15(4):6–10. (In Russ.).
8. Lachuga Yu. F., Izmailov A. Yu., Lobachevsky Ya. P., Shogenov Yu. Kh. Intensive machine technologies, robotic equipment and digital systems for the production of the main groups of agricultural products. *Machinery and equipment for the village*. 2018; (7):2–7. (In Russ.).
9. Sorokin A. A., Ponomarev A. G. Production of potatoes and vegetables in farms // *Resource-saving technologies and technical support of grain production: collection of scientific reports of the International Scientific and Technical conf. M., 2010*. pp. 134–138. (In Russ.).
10. El-Rahman Abd. Development and performance evaluation of a simple grading machine suitable for onion sets / Abd. El-Rahman; M. Magda // *Soil. Sci. and Agric. Eng. Mansoura Univ*. 2014. No. 2. P. 213–226. Available online: https://www.researchgate.net/publication/339175331_Performance_Evaluation_of_Onion_Grader. DOI:10.29322/IJSRP.10.01.2020. p 9768(accessed on 01 June 2021).
11. Akdemir B. Mechanized panting and harvesting of onion / B. Akdemir, P. Ulger, S. Arin // *Agric. Mech. Asia*. 1993. No. 24.P. 23–26.
12. Shanmugam C. J., Senthilkumar G. Indigenous development of low cost harvesting machine// *ARPN J. Eng. Appl. Sci*. 2017. No. 12. P. 4489–4490. Available online: https://www.researchgate.net/publication/319313238_Indigenous_development_of_low_cost_harvesting_machine.htm. ISSN 1819-6608(accessed on 01 June 2021).
13. Pasaman B. The determination of the parameters of a ploughshare-rotor potato digger / B. Pasaman, V. Zakharchuk // *Econtechmod. Int. Q. J.* 2012. No. 1. P. 43–47. Available online: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Determination-of-the-Parameters-of-a-Potato-Pasamanakharchuk/794ce17b18271036b572f10b309522bb1f8be335/content>. ISSN 2084–5715(accessed on 01 June 2021).
14. Massah J., Lotf A., Arabhosseini A. Effect of Blade Angle and Speed of Onion Harvester on Mechanical Damage of Onion Bulbs // *Agricultural mechanization in Asia, Africa, and Latin America*. 2012. Vol. 43 (3). P. 60–63.
15. Mohamed K. Edris, Khalid A. Al-Gaadi, Abdalhaleem A. Hassaballa, ElKamil Tola, Khalid A. M. Ahme. Impact of soil compaction on the engineering properties of potato tubers // *Int J Agric & Biol Eng*. 2020. Vol. 13(2). P. 163–167.
16. Nappe Mordi N. Al-Dosary (2016), Potato harvester performance on tubers damage at the eastern of Saudi Arabia, *CIGR Journal*, Issue number 18(2):32–42.
17. Silva C. S., Seider W. D., Lior N. Exergy efficiency of plant photosynthesis // *Chemical engineering science*. 2015. Vol. 130. P. 151–171.
18. Sun D. X., Zhang A. M., Gong J. X. (2016). Design and experiment on 1SZL-250A type subsoiling rotary tillage fertilizer combined soil working machine, *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, Issue number 37(4):1–6.
19. Dorokhov A. S., Aksenov A. G., Sibirev A. V., Sazonov N. V., Mosyakov M. A., Godyaeva M. Results of laboratory studies of the automated sorting system for root and onion crops // *Agronomy*. 2021. Vol. 11. No. 6. P. 1257.
20. Tsench Yu. S., Godlevskaya E. V. Mathematical modeling as a tool for designing agricultural machines and aggregates (in relation to the history of the development of the scientific school of the Southern Urals). *Agricultural machinery and technology*. 2023;17(2):4–12. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 17.09.2023; одобрена после рецензирования 26.10.2023; принята к публикации 03.11.2023.

The article was submitted 17.09.2023; approved after reviewing 26.10.2023; accepted for publication 03.11.2023.

