

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНО-ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЕПАРИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ МАШИНЫ ДЛЯ УБОРКИ КАРТОФЕЛЯ

Яков Петрович Лобачевский^{1,2}, академик РАН, профессор

Алексей Семенович Дорохов¹, академик РАН, главный научный сотрудник, ORCID ID: 0000-0002-4758-3843

Алексей Викторович Сибирев¹, доктор технических наук, главный научный сотрудник, ORCID ID: 0000-0002-9442-2276

Максим Александрович Мосяков¹, кандидат технических наук

Николай Викторович Сазонов¹, кандидат технических наук

¹ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия

²Российская академия наук, г. Москва, Россия

E-mail: sibirev2011@yandex.ru

Аннотация. В статье описана методика экспериментальных исследований сепарирующей системы с тепловой энергией очистки машины для уборки корнеплодов и картофеля в условиях повышенной влажности почвы до 27%, представленной прутковым элеватором и очистительной звездой. Данной системой оснащен самоходный комбайн VARITRON 470, использована дефлекторная система подачи отработавших газов от силовой установки к прутковому элеватору и очистительной звезде. Полевые исследования проводили в Пензенской области на полях ИП Бодягин В.И. Результаты позволяют утверждать о возможности увеличения поступательной скорости движения пруткового элеватора из-за повышения качества очистки товарной продукции с исключением возможности налипания на колосники механических примесей. Определены основные закономерности изменения показателей качества работы сепарирующей системы, свидетельствующие о достижении полноты сепарации товарной продукции на 95,8% при оптимальных значениях расстояния между прутковым элеватором и дефлектором ($S_d = 160$ мм) и поступательной скорости движения пруткового элеватора ($v_d = 1,6$ м/с).

Ключевые слова: картофелеуборочный комбайн, клубни картофеля, сепарирующая система, методика лабораторно-полевых исследований

RESULTS OF LABORATORY AND FIELD STUDIES OF THE SEPARATING SYSTEM OF A POTATO HARVESTING MACHINE

Ya.P. Lobachevsky^{1,2}, Academician of the RAS, Professor

A.S. Dorokhov¹, Academician of the RAS, Chief Researcher

A.V. Sibirev¹, Grand PhD in Engineering Sciences, Chief Researcher

M.A. Mosyakov¹, PhD in Engineering Sciences

N.V. Sazonov¹, PhD in Engineering Sciences

¹FGBNU "Federal Scientific Agroengineering Center VIM", Moscow, Russia

²Russian Academy of Sciences Moscow, Russia

E-mail: sibirev2011@yandex.ru

Abstract. The article describes a method for experimental studies of a separation system with thermal energy for cleaning a machine for harvesting root crops and potatoes under conditions of increased soil moisture up to 27%, represented by a rod elevator and a cleaning star. The self-propelled combine harvester VARITRON 470 is equipped with this system. When equipping it, a developed deflector system for supplying exhaust gases from the power plant to the rod elevator and cleaning star was used. Field research was carried out in the Penza region in the fields of the IP Bodyagin V.I. The research results allow us to assert the possibility of increasing the forward speed of a rod elevator as a result of improving the quality of cleaning of commercial products, eliminating the possibility of mechanical impurities sticking to the grate bars of a rod elevator. The main patterns of changes in the quality indicators of the developed separating system are determined, indicating that the completeness of separation of commercial products is 95.8% when finding the optimal values of the factors under consideration: the distance between the rod elevator and the deflector $S_d = 160$ mm and the forward speed of the rod elevator $v_d = 1.6$ m/s.

Keywords: potato harvester, potato tubers, separation system with thermal cleaning energy, laboratory and field research methods

Картофель — ценный пищевой продукт, мировой объем его производства устойчиво растет. В картофелепроизводящих странах постоянно ведутся исследования по разнообразному кругу вопросов картофелеводства, в том числе перспективам его развития. Накоплен богатый опыт его производства в различных условиях, в которых применяют соответствующие сорта, технологии и способы посадки, уборки, обработки, хранения и переработки. [6–9] В технологии возделывания картофеля еще используют ручной труд, имеются потери урожая, трудности при реализации. Качество клубней не всегда удовлетворяет требованиям потребителей и

переработчиков. Особое внимание уделяют снижению повреждений картофеля, закладываемого на хранение. При повышении индекса повреждений с 3,65 до 38,8 потери при хранении растут более чем в два раза — с 4,3 до 10,9%. Для снижения повреждений клубней картофеля в процессе уборки необходимо модернизировать существующие сепарирующие рабочие органы картофелеуборочных комбайнов. За последние годы новых решений по этому вопросу не было.

Уборка урожая — одна из трудоемких и ответственных работ при возделывании корнеплодов. На его сбор и транспортировку приходится от 30 до 50% всех тру-

довых затрат. Не все этапы уборки механизированы. Агротехнические требования – очистить корнеплоды от земли и не допустить их механические повреждения более 5% всей убранной массы. [5, 10]

Требования к качеству выполнения технологической операции уборки клубней картофеля: потери – не более 3%; количество с механическими повреждениями – не более 10; наличие земли и примесей – не более 20%; рабочая скорость – до 7 км/ч. [3]

Для выполнения агротехнических требований в машинах для уборки картофеля сепарация материала осуществляется на рабочих органах, разделяющих компоненты. Наибольшее распространение получили прутковые транспортеры, качающиеся и гирационные грохоты с плоскими решетками, пайлеры, барабанные грохоты.

Механические повреждения сопровождаются нарушением целостности тканей в виде царапин, уколов, порезов, трещин, ушибов, деформаций на клубнях, чаще всего из-за неудовлетворительной работы сепарирующих рабочих органов на почвах с повышенной влажностью. [4] К механическим повреждениям добавляется большое количество трудноотделимых почвенных примесей, что негативно сказывается на сроках хранения готовой продукции.

Требования к качеству продукции изложены в государственных стандартах и должны строго соблюдаться при продаже, покупке, закладке на хранение.

Цель работы – определение режимных параметров системы очистки с теплотой отработавших газов силовой установки самоходного картофелеуборочного комбайна.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полевые исследования сепарирующей системы с тепловой энергией очистки машины для уборки картофеля проводили при повышенной влажности почвы (27%) в Пензенской области на полях ИП Бодягин В.И. при оснащении комбайна VARITRON 470 разработанной системой очистки (рис. 1). Основная конструктивная особенность машины – оригинальная компоновка функционирующих элементов сепарирующих поверхностей, которая обеспечивает плавный (без перепадов) подъем, очистку клубненосного вороха на второй ярус уборочной машины и далее в бункер.

Высокая производительность комбайна и других машин данного типа обусловлена многоярусностью подкапывающих рабочих органов.

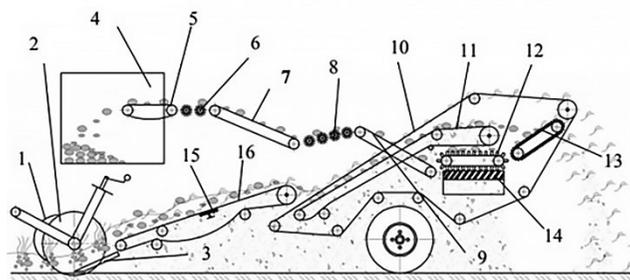


Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема самоходного комбайна VARITRON 470 для уборки картофеля:

- 1 – катки; 2 – дисковые ножи; 3 – лемех; 4 – бункер;
- 5 – выгрузной транспортер; 6, 8 – отрывной валик;
- 7 – переборочный стол; 9 – подъемный транспортер;
- 10 – редкопрутковый транспортер; 11 – каскадный транспортер;
- 12 – щеточный сепаратор; 13 – горка; 14 – очесывающий валик;
- 15 – встряхиватель; 16 – основной транспортер.

Конструктивная схема разработанной сепарирующей системы представлена на рисунке 2 при варьировании исследуемых параметров: межсоевое расстояние – S_d между дефлекторами, м; междефлекторное – $V_{дл}$, м; межтранспортерное – $V_{дэл}$, м.

Лабораторные исследования экспериментальной сепарирующей системы выполняли согласно методике проведения испытаний СТО АИСТ 8.5 – 2010.

Оценивали физико-механический состав товарной продукции и ее характеристики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Отличительная особенность усовершенствованного картофелеуборочного комбайна от базовой модели в использовании дефлекторов системы отработавших газов силовой установки самоходного комбайна VARITRON 470 при увеличении поступательной скорости движения пруткового элеватора с исключением возможности налипания на колосники механических примесей.

Межсоевое расстояние S_d между дефлекторами определяется необходимостью обеспечения равномерного обдува сепарирующей поверхности с постоянным температурным полем $T = const$ пруткового полотна, то есть требуется выполнение условия перекрытия тепловых потоков по всей длине $L_{эл}$ сепарирующей поверхности (рис. 3).

При центральном вводе (по оси аппарата) выхлопного газа за счет кинетической энергии входящей струи он движется преимущественно в центральной части аппарата, постепенно заполняя все сечение. При боковом – входящая газовая струя направляется к противоположной стенке и, ударяясь об нее, идет вверх.

Используют различные типы насадок – дефлектор с диффузором, цилиндрический «грибок» Волпера, Н-образный коллектор из труб, колпак – флюгер, турбодефлектор. Рассмотрим дефлектор с диффузором, его выбор обусловлен увеличением площади распределения тепловых потоков (рис. 4). Для предотвращения воздействия тепловых потоков отработавших газов на сепарируемый материал и рабочую поверхность элеватора необходимо обеспечить выполнение условия:

$$S_d \leq B_{об}, \quad (1)$$

где $B_{об}$ – ширина обдува дефлектором рабочей поверхности пруткового элеватора, м.

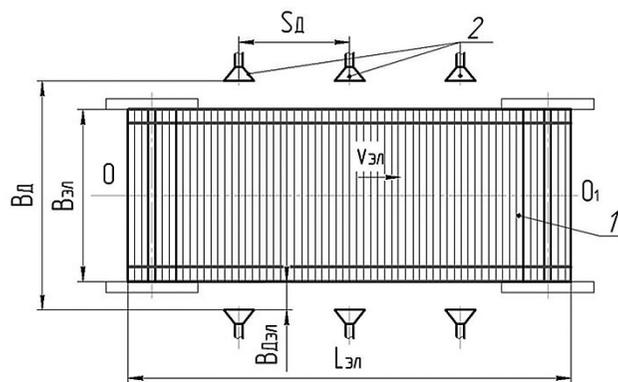


Рис. 2. Конструктивная схема сепарирующей системы с теплотой отработавших газов:

- 1 – прутковый элеватор; 2 – дефлектор отработавших газов.

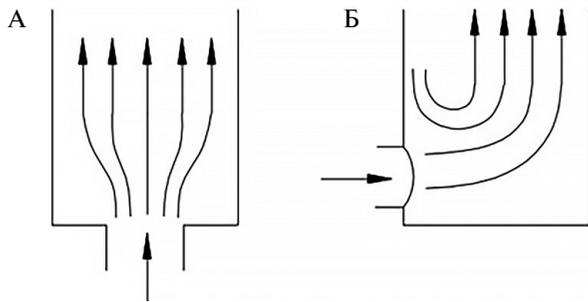


Рис. 3. Распределение газовой струи:
А – при центральном вводе газа; Б – боковом.

Приставка диффузора к соплу приводит к снижению давления в узком месте насадка, увеличению скорости и расхода отработавших газов. $V_{об}$ зависит от конструктивных параметров диффлектора и, прежде всего, диаметра выходного участка B_d , так как он влияет на расход выхлопного газа согласно уравнению Бернулли:

$$Q_G = \mu S_B \sqrt{2gH_d}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент расхода; S_B – площадь отверстия, m^2 ; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; H_d – напор выхлопного газа насадка, m .

Площадь отверстия S_B :

$$S_B = \pi B_d^2, \quad (3)$$

где B_d – диаметр насадка, m .

$$\mu = \varepsilon \varphi, \quad (4)$$

где ε – коэффициент сжатия; φ – коэффициент скорости.

$$\varepsilon = \frac{S_B}{2H_d}. \quad (5)$$

Так как длина сопла и диффузора невелики, а скорость течения среды в них достаточно высокая, то теплообмен между стенками канала и средой при малом времени их контакта настолько незначителен, что в большинстве случаев им можно пренебречь и считать процесс истечения адиабатным.

Массовый расход выхлопного газа M_G через сопло ($кг/с$) определяется соотношением:

$$M_G = \frac{S_B \cdot c_{2r}}{V_2}, \quad (6)$$

где c_{2r} – скорость выхлопного газа на выходе, m/c ; V_2 – объем выхлопного газа на выходе, m^3 .

$$S_d = \left(\frac{L_d}{B_d} \right) + \frac{B_d}{2}. \quad (7)$$

Междифлекторное расстояние B_d сепарирующей системы с тепловой системой очистки находится, исходя из максимально возможной скорости c_{2max} движения теплового потока отработавших газов при падении напора H_d выхлопного газа через сопло на осевой линии пруткового элеватора OO_1 . Должно соблюдаться условие:

$$H_d \geq B_{эл}. \quad (8)$$

Так как почвенный слой движется по поверхности пруткового элеватора со скоростью $v_{эл}$, а диффлекторы расположены на расстоянии S_d при перекрытии

тепловых потоков Q_G по длине полотна элеватора $L_{эл}$, то температурное поле T изменяется только по ширине элеватора $B_{эл}$, по длине и его периметру остается неизменным.

Основные закономерности изменения показателей качества работы сепарирующей системы картофеля устанавливали в полевых условиях. Взаимодействие систем очистки базовой уборочной машины с разработанной осуществляли при адаптации основных функционирующих элементов с теплотой отработавших газов силовой установки при монтаже диффлекторов на коллектор двигателя.

Определение показателей качества уборки картофеля самоходным комбайном, при его оснащении разработанной сепарирующей системой, выполняли в диапазоне режимных и технологических параметров, полученных при проведении лабораторных исследований в 2022 году. [1, 2]

Показатели качества работы сепарирующей системы свидетельствуют о достижении полноты сепарации товарной продукции 95,8% при нахождении оптимальных значений поступательной скорости движения пруткового элеватора $v_d = 1,6 m/c$ и расстояния между ним и диффлектором $S_d = 160 mm$ (рис. 5).

Закономерность изменения полноты сепарации клубней картофеля в условиях уборки при повышенной влажности почвы определяется выражением:

$$v_k = 109,39 - 0,23 \cdot S_d + 0,75 \cdot S_d^2. \quad (9)$$

Установили параметры оценки: дисперсия ошибки опыта, $S_y^2 = 7$; стандартная ошибка, $S_{bk} = 1,12$; дисперсия ошибки, $S_{bk}^2 = 1,23$; дисперсия воспроизводимости, $S_{воспр}^2 = 14,48$; дисперсия неадекватности, $S_{неадекв}^2 = 1,232$.

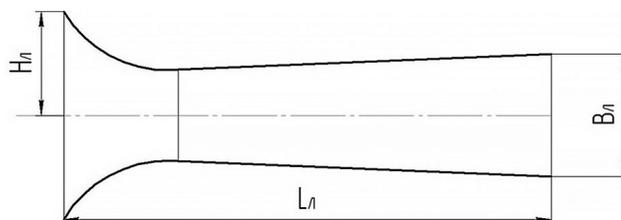


Рис. 4. Конструктивная схема диффлектора.

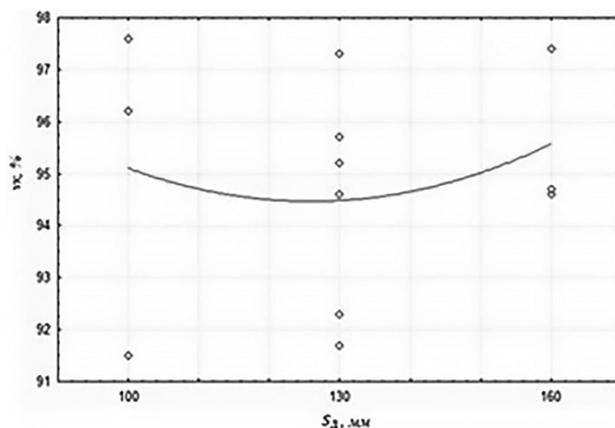


Рис. 5. Зависимость полноты сепарации v_k , % клубней картофеля от расстояния S_d между прутковым элеватором и диффлектором, $v_d = 1,6 m/c$.

Исследование зависимости полноты сепарации клубней картофеля при значении расстояния между прутковым элеватором и дефлектором $S_d = 160$ мм выполняли исходя из предположения о возможности отслаивания подсохшего слоя почвенных примесей с поверхности колосниковых элементов полотна транспортера при их взаимодействии с интенсификаторами сепарации.

Увеличение поступательной скорости движения от 1,6 до 1,8 м/с повышает сепарирующую способность полотна от 94,8 до 95,9% в соответствии с эмпирической зависимостью (рис. 6):

$$v_k = 176,53 - 102,64 \cdot v_d + 32,02 \cdot v_d^2 \quad (10)$$

График на рисунке 7 отображает корреляционную зависимость качественных показателей (v_k) уборки клубней картофеля от исследуемых технологических параметров сепарирующей системы S_d и v_d , которая выражается уравнением параболических функций:

$$\begin{cases} v_d = -47,81 + 1,04 \cdot v_k - 0,15 \cdot v_k^2, \\ S_d = 18550,56 + 394,54 \cdot v_k - 2,08 \cdot v_k^2. \end{cases} \quad (11)$$

В результате дисперсионного анализа зависимости полноты сепарации клубней картофеля от расстояния между прутковым элеватором и дефлектором, а также поступательной скорости движения пруткового элеватора установлены основные статистические характеристики: дисперсия ошибки опыта, $S_y^2 = 6$; стандартная ошибка, $S_{bk} = 1,08$; дисперсия ошибки, $S_{bk}^2 = 1,19$;

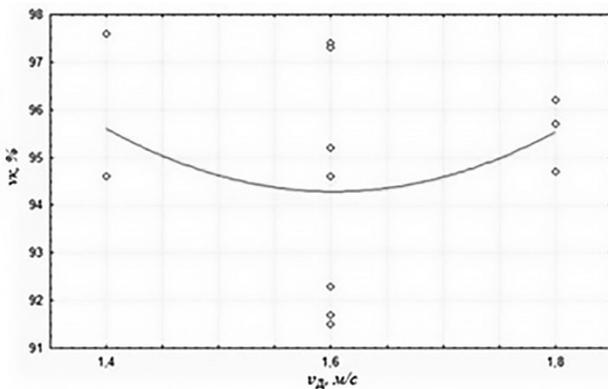


Рис. 6. Зависимость полноты сепарации v_k , % корнеплодов сахарной свеклы от поступательной скорости движения пруткового элеватора v_d , при $S_d = 130$ мм.

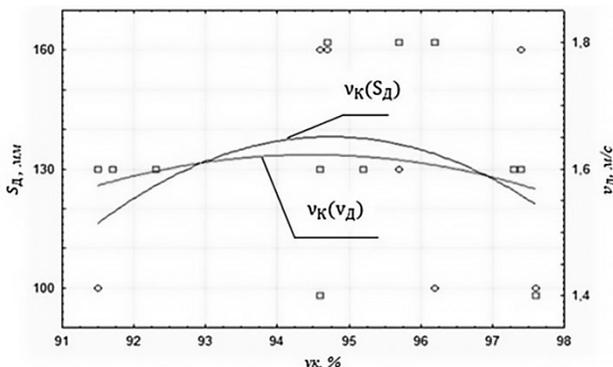


Рис. 7. Зависимость полноты сепарации v_k , % клубней картофеля от расстояния S_d между прутковым элеватором и дефлектором и поступательной скорости движения пруткового элеватора v_d .

дисперсия воспроизводимости, $S_{воспр}^2 = 12,33$; дисперсия неадекватности, $S_{неадекв}^2 = 1,184$.

Экспериментальные исследования картофелеуборочного комбайна в производственных условиях, оснащенного системой сепарации с использованием теплоты отработавших газов позволяют сделать вывод о том, что максимальная полнота сепарации – 93,0...97,0% обеспечивается при оптимальных значениях поступательной скорости движения пруткового элеватора ($v_d = 1,6$ м/с) и расстояния между прутковым элеватором и дефлектором ($S_d = 130...140$ мм).

Построим статистический ряд, расположив информацию о полноте сепарации (v , %) клубней картофеля в порядке возрастания:

$$X = \begin{pmatrix} X_0 = 93,8 \\ X_1 = 93,9 \\ X_2 = 94,0 \\ X_3 = 94,1 \\ X_4 = 94,2 \\ X_5 = 94,3 \\ X_6 = 94,4 \\ X_7 = 94,5 \\ X_8 = 94,6 \\ X_9 = 94,7 \\ X_{10} = 94,8 \\ X_{11} = 94,9 \\ X_{12} = 95,1 \\ X_{13} = 95,2 \\ X_{14} = 95,3 \\ X_{15} = 95,4 \\ X_{16} = 95,5 \\ X_{17} = 95,6 \\ X_{18} = 95,7 \\ X_{19} = 95,8 \end{pmatrix}.$$

Среднее значение полноты сепарации (v , %):

$$X_{CP} = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} X_j}{N} = 94,6\%.$$

Среднеквадратическое отклонение (v , %):

$$Stdev(x) = \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^{N-1} (X_{CP} - X_j)^2}{N-1}} = 1,54.$$

Коэффициент вариации (v , %):

$$v = \frac{Stdev(x)}{X_{CP} - X_{CM}} = \frac{1,54}{95,4 - 94,6} = 0,234.$$

Математическое ожидание $M(X)$ нормального закона распределения сепарации клубней картофеля:

$$M(X) = 0,3$$

Величина математического ожидания свидетельствует о конкретном значении полученного закона распределения сепарации клубней картофеля разработанной сепарирующей системой с теплотой отработавших газов в приближительных расчетах или оценки процесса очистки.

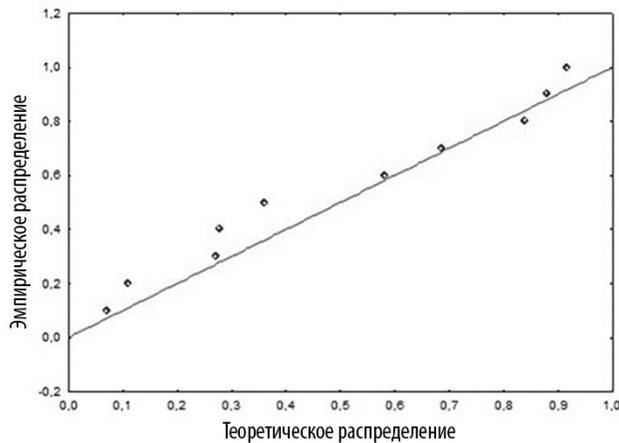


Рис. 8. График зависимости значений от ожидаемых частот распределения.

Квантиль распределения Стьюдента:

$$T = qt\left(1 - \frac{\alpha}{2}, \nu\right) = 2,023.$$

Сравним графически наблюдаемые и ожидаемые частоты построением графика рассеяния (рис. 8).

Выводы. По результатам экспериментальных исследований картофелеуборочного комбайна в производственных условиях, оснащенного системой сепарации с использованием теплоты отработавших газов, можно сделать вывод, что максимальная полнота сепарации в диапазоне 93,0...97,0% обеспечивается при оптимальных значениях поступательной скорости движения пруткового элеватора 1,6 м/с и расстоянии между ним и дефлектором 130...140 мм.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дорохов А.С., Аксенов А.Г., Сибирёв А.В. и др. Результаты лабораторных исследований сепарирующей системы с использованием теплоты отработавших газов машины для уборки картофеля // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17. № 1 (65). С. 45–49.
2. Дорохов А.С., Сибирёв А.В., Аксенов А.Г. и др. Результаты лабораторных исследований сепарирующей системы с тепловой энергией очистки машины для уборки корнеплодов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. № 1. С. 19–26.
3. Елизаров В.П., Бурченко П.Н., Спирин А.П. и др. Исходные требования на базовые машинные технологические операции в растениеводстве. М., 2005. 270 с.
4. Кияшко Н.В. Стандартизация и сертификация сельскохозяйственной продукции. ФГБОУ ВО Приморская ГСХА; сост. Н.В. Кияшко. 2-е изд., перераб. и доп. Уссурийск, 2015. 200 с.
5. Курдюмов В.И., Зыкин Е.С. Технология и средства механизации гребневого возделывания пропашных культур. Ульяновск, 2017. 320 с.
6. Лобачевский Я.П., Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Аспекты цифровизации системы технологий и машин // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. № 36. С. 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). С. 6–10.

<https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>

8. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. № 16 (4). С. 4–12. EDN: IDJFYV. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12>.
9. Indrāja D., Ajkhilesh, J., Vishal, P. Review paper based on Design and Development of An Onion Harvesting Machine. J. Inf. Comput. Sci. 2019. № 9. P. 333–337. Available online: <https://www.researchgate.net/publication/339201506> (accessed on).
10. Pasaman B., Zakharchuk V. The determination of the parameters of a ploughshare-rotor potato digger. Econtechmod. Int. Q.J. 2012. P. 43–47. Available online: <http://www.journals.pan.pl/dlibra/publication/98931/edition/85237/content> (accessed on)

REFERENCES

1. Dorohov A.S., Aksenov A.G., Sibiryov A.V. i dr. Rezul'taty laboratornykh issledovaniy separiruyushchej sistemy s ispol'zovaniem teploty otrabotavshih gazov mashiny dlya uborki kartofelya // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022. T. 17. № 1 (65). S. 45–49.
2. Dorohov A.S., Sibiryov A.V., Aksenov A.G. i dr. Rezul'taty laboratornykh issledovaniy separiruyushchej sistemy s teplovoj energiej ochistki mashiny dlya uborki korneplodov // Sel'skohozyajstvennyye mashiny i tekhnologii. 2022. № 1. S. 19–26.
3. Elizarov V.P., Burchenko P.N., Spirin A.P. i dr. Iskhodnye trebovaniya na bazovye mashinnye tekhnologicheskie operacii v rastenievodstve. M., 2005. 270 s.
4. Kiyashko N.V. Standartizatsiya i sertifikatsiya sel'skohozyajstvennoj produkcii. FGBOU VO Primorskaya GSXA; sost. N.V. Kiyashko. 2-e izd., pererab. i dop. Ussurijsk, 2015. 200 s.
5. Kurdyumov V.I., Zykin E.S. Tekhnologiya i sredstva mekhanizatsii grebnevoogo vozdelevaniya propashnykh kul'tur. Ul'yanovsk, 2017. 320 s.
6. Lobachevskij Ya.P., Bejlis V.M., Cench Yu.S. Aspekty cifrovizatsii sistemy tekhnologij i mashin // Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK. 2019. № 36. S. 40-45. Rezhim dostupa: <https://vestnik.viesh.ru/journal/vypusk-3-36-2019/>
7. Lobachevskij Ya.P., Dorohov A.S. Cifrovye tekhnologii i robotizirovannye tekhnicheskie sredstva dlya sel'skogo hozyajstva // Sel'skohozyajstvennyye mashiny i tekhnologii. 2021. № 15 (4). S. 6–10. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
8. Lobachevskij Ya.P., Cench Yu.S. Principy formirovaniya sistem mashin i tekhnologij dlya kompleksnoj mekhanizatsii i avtomatizatsii tekhnologicheskikh processov // Sel'skohozyajstvennyye mashiny i tekhnologii. 2022. № 16 (4). P. 4–12. EDN: IDJFYV. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12>.
9. Indrāja D., Ajkhilesh, J., Vishal, P. Review paper based on Design and Development of An Onion Harvesting Machine. J. Inf. Comput. Sci. 2019. № 9. P. 333–337. Available online: <https://www.researchgate.net/publication/339201506> (accessed on).
10. Pasaman B., Zakharchuk V. The determination of the parameters of a ploughshare-rotor potato digger. Econtechmod. Int. Q. J. 2012. P. 43–47. Available online: <http://www.journals.pan.pl/dlibra/publication/98931/edition/85237/content> (accessed on)

Поступила в редакцию 11.03.2024
Принята к публикации 25.03.2024