УДК 631.356.46.02
https://doi.org/10.56619/2078-7138-2026-177-5-9-14

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПОДКАПЫВАНИЯ КАРТОФЕЛЯ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ КАРТОФЕЛЕУБОРОЧНОЙ МАШИНЫ

В.П. Чеботарев,
зав. каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

Г.А. Радишевский,
доцент каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Н.П. Гурнович,
доцент каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Д.А. Яновский,
ст. преподаватель каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ

В статье представлены результаты теоретико-расчетных исследований по обоснованию параметров приемной части картофелеуборочной машины. Предложена конструкция с плоским лемехом и дисковыми боковинами, установленными под углом к направлению движения, обеспечивающая подкапывание клубневого гнезда без потерь. С использованием методов геометрического и силового анализа, а также математического моделирования получены зависимости для определения ширины захвата, радиуса диска и угла его установки. Расчетным путем обоснованы параметры, при которых прогнозируется предотвращение сгруживания почвы, смещения гнезда и потерь клубней.

Ключевые слова: клубни, грядка, клубневое гнездо, лемех, диски.

The article presents the results of theoretical and computational studies on substantiating the parameters of potato harvester intake section. Design featuring a flat share and disc-shaped side elements positioned at an angle to the driving direction is proposed to ensure the digging out the tuber nest without losses. Using geometric and force analysis methods, as well as mathematical modeling, relationships for determining the working width, disc radius, and its installation angle were derived. The parameters predicting soil accumulation prevention, nest displacement, and tuber losses were substantiated by calculation.

Keywords: tubers, bed, tuber nest, share, disks.

Введение

Картофель в Республике Беларусь является одной из основных возделываемых сельскохозяйственных культур, которая используется как в продовольственных, так и в технических целях. Беларусь входит в число ведущих мировых производителей картофеля: в 2025 году его валовой сбор в стране составил 3,047 млн тонн [1].

В настоящее время отрасль картофелеводства в республике развивается в соответствии с государственной программой «АПК будущего» на 2026-2030 годы [2] и другими государственными и научно-техническими программами [3].

Технология возделывания картофеля требует больших затрат в сравнении с технологиями возделывания других сельскохозяйственных культур. Из всех технологических процессов по возделыванию картофеля затраты на уборку составляют около 70 % и наиболее трудоемким является подкапывание клубневого пласта. Поэтому одной из актуальных задач при возделывании картофеля является снижение затрат на уборку за счет уменьшения потерь клубней. Решение этой задачи требует совершенствования конструкций картофелеуборочных машин, в том числе подкапывающих рабочих органов, определяющих работоспособность и качество выполняемого технологического процесса.

Для подкапывания клубневого пласта применяют различные по конструктивному исполнению приемные части картофелеуборочных машин. В Беларуси получили распространение картофелеуборочные машины, в приемной части которых используются плоский лемех и пассивные боковины. Согласно агротехническим требованиям, рабочие органы приемной части должны обеспечить подкапывание клубневого пласта на глубину залегания нижнего клубня без потерь.

Параметры подкапывающих рабочих органов приемной части картофелеуборочных машин зависят от формы картофельной грядки, сформированной при посадке, и последующих обработках по уходу за растениями, формы и размеров клубневого гнезда и смещения его от оси грядки.

Разработке и совершенствованию подкапывающих рабочих органов приемной части картофелеуборочных машин посвящены работы Сорокина А.А., Камалетдинова Р.Р., Успенского И.А., Борычёва С.Н., Liske P., Fischer L., Begans K., Beet M. и других [4-12]. В работах [4-8] обоснованы параметры пассивных лемехов, а работы [9-12] направлены на снижение потерь и совершенствование технологии уборки картофеля, однако они не учитывают смещение клубневого гнезда в процессе предшествующей обработки.

Снижение потерь при уборке картофеля является актуальной задачей для производителей картофеля в Республике Беларусь.

Целью данной работы является обоснование параметров приемной части картофелеуборочной машины, состоящей из плоского лемеха и дисковых боковин, установленных под углом к направлению движения, что обеспечит уменьшение потерь клубней за счет увеличения захвата подкапываемого пласта и исключения смещения клубневого гнезда по краям лемеха.

Основная часть

В Республике Беларусь и других странах СНГ ширина междурядий при возделывании картофеля составляет 0,70 м. При рядовом способе посадки картофеля контур профиля поперечного сечения грядки после процесса междурядной обработки может иметь форму трапеции [4]. Однако под воздействием осадков, ветра и других факторов к моменту уборки контура профиля с высокой точностью может быть описан синусоидальной или косинусоидальной зависимостью. При этом его период определяется шириной междурядья, а амплитуда равна половине высоты грядки [5, 6].

В настоящее время в картофелеуборочных машинах широкое распространение получили приемные части, состоящие из плоского лемеха и установленных по краям боковин (рис. 1).

Однако используемые рабочие органы приемных частей картофелеуборочных машин не обеспечивают подкапывание клубневого пласта без перемещения его по сторонам лемеха в поперечном направлении (смещение), что способствует потерям подкопанных клубней (рис. 2). Это связано с тем, что в настоящее время увеличилась урожайность картофеля и соответственно поперечное сечение клубневого гнезда.

Размеры междурядий и зоны залегания клубней (рис. 3) подчиняются закону нормального распределения. Средняя ширина клубневого гнезда составлет 0,36 м, а максимальная – 0,42 м [6]. Для современных сортов этот параметр может быть больше, что требует дальнейшего уточнения. Ширина лемеха в используемых картофелеуборочных машинах составляет 0,50 м, что недостаточно для обеспечения выкапывания клубневого гнезда без потерь клубней из-за перемещения подкопанного пласта по сторонам лемеха в поперечном направлении.

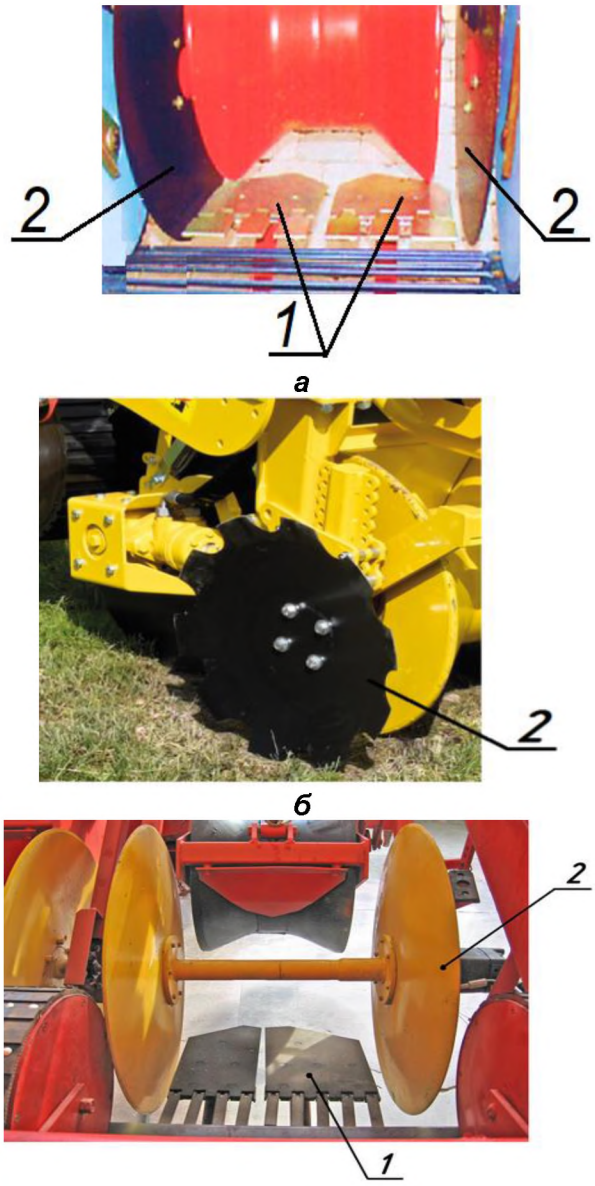

Рисунок 1. Приемные части картофелеуборочных машин: а – SE 140 «GRIMME»; б – Keiler 2 RK 22 «Ropa»; в – ПКК-2-05; 1 – лемех; 2 – боковины



Рисунок 2. Перемещение подкопанного пласта по сторонам лемеха

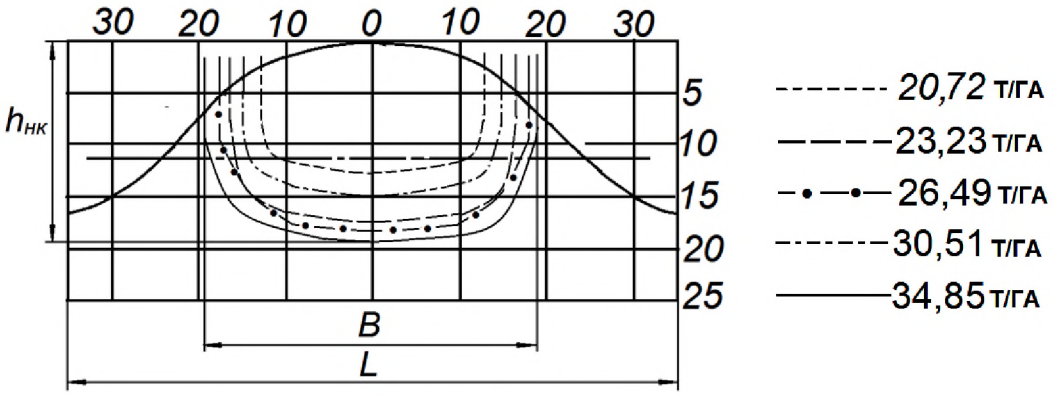

Рисунок 3. Расположение клубневого гнезда

Ширина клубневого гнезда не является достаточным условием для выбора ширины захвата его лемехом. В процессе междурядных обработок картофеля, за счет неточности вождения окучивающих рабочих органов возможно смещение клубневого гнезда от оси грядки. Поэтому при выборе параметров рабочих органов приемной части необходимо учитывать вероятность смещения клубневого гнезда.

Подкапывающие рабочие органы картофелеуборочных машин должны осуществлять подкапывание клубневого гнезда без потерь с интенсификацией процесса разрушения пласта. Кроме того, подкапывающие рабочие органы должны обеспечить передачу подкапываемого пласта почвы на сепарирующие органы картофелеуборочной машины без сгруживания на лемехе, что уменьшит потери клубней.

На потери клубней при подкапывании также оказывает влияние непрямолинейность рядов, однако выдержать прямолинейность рядов при междурядной обработке и подкапывании невозможно. По данным В.П. Буяшова [12], при измерении траектории осевой линии клубневого гнезда (шаг 2 м, длина гона 60 м) среднее отклонение от оси гребня составило $\Delta B = \pm 6{,}82$ см, а среднеквадратическое – $\sigma = 3{,}43$ см.

Наиболее эффективным способом устранения перемещения клубневого пласта перпендикулярно оси лемеха является установка дисков под некоторым углом к направлению движения вместо колеблющихся боковин, которые в процессе подкапывания могут обволакиваться растительными остатками и должны отвечать следующим требованиям:

– рабочий орган должен соответствовать боковому профилю подкапываемого клубневого пласта;

– обеспечивать подачу подкапываемого пласта на сепарирующие органы с предотвращением потерь клубней;

– перерезать растительные остатки во избежание забивания приемной части картофелеуборочной машины, что исключит сгруживание почвы на лемехе.

Кроме того, форма дискового рабочего органа должна соответствовать профилю поперечного сечения клубневого гнезда (с учетом отклонений подкапывающего органа от осевой линии рядков и смещения клубневого гнезда), что обеспечит исключение перемещения почвы по сторонам лемеха.

В большинстве конструкций приемных частей картофелеуборочных машинах используется плоский лемех в сочетании с плоским вертикально установленным диском.

В конструкции приемных частей картофелеуборочных машин фирмы *«GRIMME»* (Германия) используется плоский лемех с установленными по краям вертикальными дисками на ширину захвата подкапываемого пласта $B = 0{,}48$ м (рис. 1а).

По результатам испытаний, проведенных на Белорусской МИС, установлено, что приемная часть картофелеуборочных машин не обеспечивает захват клубневого гнезда без потерь при ширине свыше $B > 0$, 44 м [13]. В отличие от комбайна *SE* 140 «*GRIMME*», где ширина захвата составляет 0,48 м, предлагаемая конструкция обеспечивает 0,60 м, что необходимо для современных широких гнезд.

В конструкции приемной части картофелеуборочных комбайнов типа *Keiler* 2 *RK* 22 производства «*Ropa*» (Германия) используются плоский лемех и установленные по краям сферические диски (сферой внутрь), установленные под углом с наклоном к вертикальной плоскости (рис. 1б) [14]. К достоинству конструкции рабочего органа следует отнести то, что он обеспечивает забор меньшего по объему подкапываемой почвы.

Основным недостатком конструкции приемной части является малое расстояние между дисками по осевой линии поперечного сечения клубневого гнезда, что не обеспечивает полностью его забор. Кроме того, конструкция не учитывает случай отклонения гнезда от средней линии рядка и неточности вождения картофелеуборочного комбайна, которые приводят к потерям. При подкапывании почвенного пласта наклонными дисками на влажных почвах образуются комки и монолиты в результате слипания почвенных частиц между собой.

В большинстве конструкций приемных частей картофелеуборочных комбайнов ПКК-2-05 производства ОАО «Гомсельмаш» используется плоский составной лемех и установленные по краям прямые диски (рис. 1в) [15]. Преимуществом конструкции является использование составного лемеха, который способствует разрушению подкапываемого пласта. Недостатком конструкции приемной части является малое расстояние между дисками по осевой линии поперечного сечения клубневого гнезда, что не обеспечивает полностью забор клубневого гнезда при большой урожайности.

Наиболее целесообразным является использование в приемной части картофелеуборочных машин плоского лемеха в сочетании с дисковыми боковинами, установленными под углом к направлению движения и наклоненными внутрь с целью компенсации смещения клубневого гнезда относительно грядки. Это уменьшит потери клубней и снизит количество почвы, поступающей на последующие рабочие органы, за счет придания дисковому рабочему органу формы бокового профиля грядки. Придание дисковому рабочему органу формы бокового профиля грядки обеспечит силовое воздействие на подкапываемый пласт, направленное на нарушение взаимосвязи между частицами почвы (рис. 4).

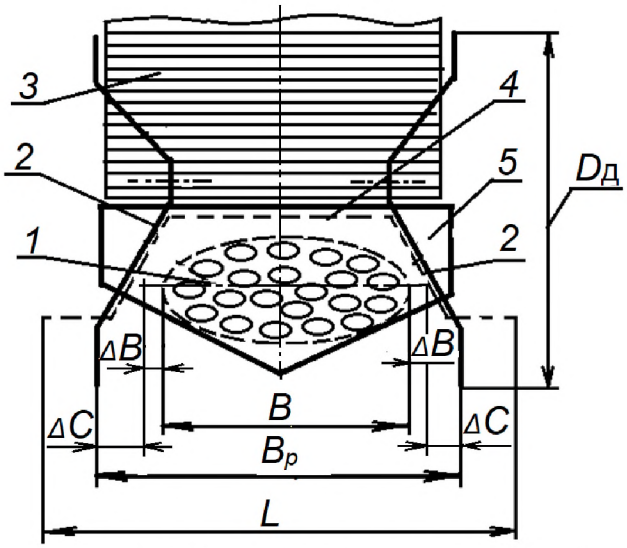

Рисунок 4. Предлагаемая конструкция приемной части картофелеуборочной машины: Dд – диаметр диска; B – ширина клубневого гнезда; Bр – ширина захвата приемной части; L – ширина междурядий; ΔC – смещение клубневого гнезда при междурядной обработке; 1 – клубневое гнездо; 2 – дисковый рабочий орган; 3 – орган сепарирующий; 4 – профиль грядки; 5 – лемех

В предлагаемой конструкции ширина захвата приемной части подкапываемой грядки [11]

$$B_р = B + 2\Delta B + 2\Delta C, \quad (1)$$

где Bр – расчетная ширина расположения дисков, м;

B – ширина клубневого гнезда, B = 0,42 м [9];

ΔB – смещение клубневого гнезда от оси грядки в сторону, где больше питательных веществ (миграция), м. Согласно экспериментальным данным, приведенным в работе [11], на дерново-подзолистых почвах среднее биологическое смещение клубневого гнезда в сторону локального внесения удобрений составляет 0,03 м. Данное значение принято для дальнейших расчетов ΔB = 0,03 м [11];

ΔC – смещение клубневого гнезда при междурядной обработке, ΔC = 0,06 м [11].

$$B_р = 0,42 + 2\cdot0,03 + 2\cdot0,06 = 0,60 \text{ м}.$$

Установка дисков по краям лемеха с расстоянием между ними $B_р$ = 0,60 м обеспечит забор клубневого гнезда при максимальной ширине клубневого гнезда B = 0,42 м без потерь с учетом неточности вождения и миграции гнезда по ширине рядка.

Радиус диска в зависимости от глубины подкапывания, угла установки диска к направлению движения и коэффициентов трения почвы и растений о диск [5]:

$$R \geq \frac{h\left[\left(f_1 + f_2\right)^2 \cos^2\alpha + 1 + \cos\alpha\sqrt{1 + \left(f_1 + f_2\right)^2}\right]}{\left(f_1 + f_2\right)^2 \cos\alpha}, \quad (2)$$

где h – глубина подкапывания, h = 0,16 м [5];

f_1 – коэффициент трения растительных остатков между режущей кромкой диска и растением, f = = 0,49…0,55 [5];

f_2 – коэффициент трения растительных остатков о почву, f = 0,78…0,90 [11];

α – угол установки диска к направлению перемещения картофелеуборочной машины, град.

Угол установки диска к направлению движения не должен препятствовать скольжению пласта по поверхности диска

$\alpha < \varphi$,

где φ – угол трения рыхлой почвы по стали, φ = = 10…12° [8]. Угол установки дисков к направлению движения картофелеуборочной машины с учетом обеспечения перемещения почвы без сгруживания должен быть α < 11°.

$$R \geq \left\{0,16\left[\left(0,55+0,90\right)^2 \cos^2 11^\circ + 1 + \right.\right.$$
$$\left.\left. + \cos 11^0 \sqrt{1 + \left(0,55+0,90\right)^2}\right]\right\} \times$$
$$\times \left[\left(0,55+0,90\right)^2 \cos 11^0\right]^{-1} \geq 0,37 \text{м}.$$

Для перемещения подкопанного пласта без задержки с растительными остатками на лемехе необходимо, чтобы дисковые рабочие органы, выполняющие функцию боковин, обеспечили перерезание растительных остатков.

Перерезание растительных остатков без скольжения будет происходить при выполнении условия (рис. 5)

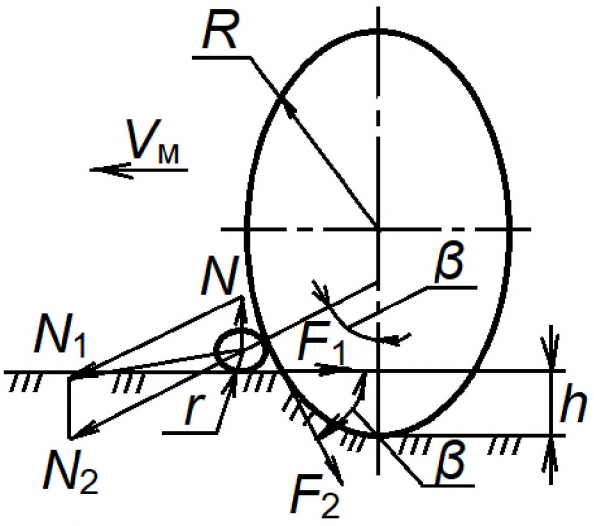

Рисунок 5. Схема к обоснованию радиуса диска: R – радиус диска; r – радиус растения; β – угол защемления; h – глубина хода диска; N_1, N_2 – силы, действующие на стебель со стороны почвы и диска; F_1 – сила трения, возникающая между стеблем и почвой; F_2 – сила трения, возникающая между стеблем и диском; Vм – поступательная скорость машины

$$\overline{N} \le \overline{F}_1 + \overline{F}_2, \quad (3)$$

где $\overline{N}$ – сила действующая на стебель в момент защемления, H;

$\overline{F}_1$ – сила трения, возникающая между стеблем и почвой, H;

$\overline{F}_2$ – сила трения, возникающая между стеблем и диском, H.

В точке контакта стебля с режущей кромкой диска возникают силы трения $F_1 = f_1 \cdot N_1$ и $F_2 = f_2 \cdot N_2$. Усилие на стебле N зависит от радиуса растения r.

Условие перерезания растительных остатков без скольжения их вдоль режущей кромки [5]

$$\beta < \varphi_1 + \varphi_2, \quad (4)$$

где β – угол между силой нормальной (N_2) к режущей кромке диска в точке контакта стебля и направлением перемещения рабочего органа, град;.

φ_1 – угол трения растительных остатков между режущей кромкой диска и растением, $\varphi_1 = 26°…29°$ [5];

φ_2 – угол трения растительных остатков о почву, $\varphi_2 = 38°…42°$ [11].

Или с учетом радиуса диска [5]

$$\operatorname{tg}\beta < \frac{\sqrt{R^2 - (R-h)^2}}{2 \cdot R - h}. \quad (5)$$

$$\beta < \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{0,37^2 - (0,37 - 0,16)^2}}{2 \cdot 0,37 - 0,16} \right) < 28°.$$

Заключение

1. Для традиционного возделывания картофеля с междурядьями 0, 70 м и глубиной подкапывания h = = 0,16 м расчетным путем обоснованы геометрические параметры дисковых боковин приемной части картофелеуборочной машины:

– ширина захвата $B_р$ = 0,60 м;

– радиус диска $R \ge 0,37$ м;

– угол установки $\alpha < 11°$.

Данные параметры обеспечивают подрезание краев клубневого гнезда без сгруживания почвы и его смещения.

2. В отличие от серийных машин («*GRIMME*» с шириной захвата 0,48 м и ПКК-2-05) предложенная конструкция имеет увеличенную ширину захвата – 0,60 м, что соответствует сечению клубневого гнезда. Дисковые боковины перерезают растительные остатки и снижают вероятность забивания приемной части, а их наклон внутрь по профилю грядки создает дополнительное силовое воздействие на пласт, улучшая его разрушение и последующую сепарацию. Угол установки $\alpha < 11°$ принят из условия исключения забивания рабочего органа растительными остатками.

3. Дисковые боковины устанавливаются вместо пассивных или вертикальных боковин, а для тяжелых и каменистых почв целесообразно предусмотреть упругую подвеску или предохранительные элементы. Ожидаемый эффект – снижение потерь клубней при уборке.

Поскольку опытный образец не изготавливался и полевые испытания не проводились, указанные эффекты являются расчетными прогнозами и требуют дальнейшего экспериментального подтверждения.

Полученные результаты исследования могут быть использованы при модернизации парка картофелеуборочных машин (ПКК-2-05, «GRIMME» SE 140/150/260, «ROPA» Keiler 2 RK 22) и их аналогов, работающих на междурядьях 70…75 см, а также в учебном процессе Белорусского государственного аграрного технического университета.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беларусь в цифрах – 2025. Статистический ежегодник. – URL: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public_compilation/index_164239. (дата обращения: 01.05.2026).

2. Об утверждении Государственной программы «АПК будущего» на 2026-2030 годы: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 31 декабря 2025 г. № 814 / Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL:

https://pravo/by/document/?quid=12551&po=C22500814 (дата обращения: 01.05.2026).

3. Каталог машин и оборудования для реализации эффективных технологий производства и первичной переработки основных видов продукции растениеводства и животноводства на 2021-2025 годы и на период до 2030 года / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – URL: https://belagromech.by/research/machines/ sistema-mashin/ (дата обращения: 01.05.2026).

4. Liske, H. Baugruhhenzur Verminderungder Kartoffellbelastungeninder Annahmtsrtekebeischwierigen Eunsatzbeligungen. Agrartechnik / H. Liske . – 1987. – Bd. 37. – Jg. 8. – S. 352-353.

5. Петров, Г.Д. Картофелеуборочные машины. – 2-е изд., перераб. и доп. / Г.Д. Петров. – М.: Машиностроение, 1984. – 320 с.

6. Успенский, И.А. Критерии оценки подкапывающих рабочих органов / И.А. Успенский, С.А. Коноплёв //Современные энерго- и ресурсосберегающие, экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства: сб. тр. – Рязань, 2000. – Вып. 4, ч. 2. – С. 24-26.

7. Камалетдинов, Р.Р. Рекомендации по совершенствованию рабочих органов машин для уборки картофеля / Р.Р. Камалетдинов. – Уфа: Башкирский государственный аграрный университет, 2012. – 44 с.

8. Сорокин, А.А. Оптимальный угол установки лемеха картофелеуборочной машины / А.А. Сорокин //Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1984. – № 2. – С. 19-24.

9. Успенский, И.А. Проблемы при уборке корнеклубнеплодов / И.А. Успенский, С.Н. Борычёв, С.С. Рогов // Энергосберегающие технологии использования и ремонта машинно-тракторного парка: сб. тр. науч.-практ. конф., посвященной 50-летию кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка и технологии материалов и ремонта машин инженерного факультета. – Рязань, 2004. – С. 25-31.

10. Badenn, K. Bodendichtemossu in Kartoffelbestand / K .Badenn. – Dt. Fgrartechnir, 1969. – S. 348-349.

11. Повышение эффективности работы приемной части картофелеуборочных машин [Текст] / Г.А. Радишевский [и др.] // Агропанорама. – 2014. – № 2. – С. 2-4.

12. Буяшов, В.П. Автоматическое вождение картофелеуборочных машин: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.20.01/ Буяшов Валерий Петрович; Украинская сельскохозяйственная академия. – Киев, 1985. – 17 с.

13. Государственные испытания картофелеуборочного комбайна *SE 140 «GRIMME»:* протокол 7-132-96 (14132510). – Белорусская МИС, п. Привольный. – 1996. – 122 с.

14. Руководство по эксплуатации картофелеуборочного комбайна Keiler 2 RK 22 / ROPA Fahrzeug- und Maschinenbau GmbH. – Бавария, 2023. – 477 с.

15. Руководство по эксплуатации картофелеуборочного комбайна ПКК-2-05 / ОАО «Гомсельмаш». – Гомель, 2023. – 109 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 12.10.2026

“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).
Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842.
Стоимость подписки на 2-е полугодие 2026 года: для индивидуальных подписчиков - 70,38 руб., ведомственная подписка - 72,39 руб.