

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.935-947>

УДК 631.348



Экспериментальные исследования машины для сбора колорадского жука

© 2021. П. В. Заяц¹✉, П. П. Казакевич²

¹РУ «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства», г. Минск, Республика Беларусь,

²Национальная академия наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Проведено обоснование конструктивно-технологической схемы машины для механического сбора колорадского жука при получении экологически чистого картофеля. Экспериментально обоснованы параметры и режимы роторов с упруго-эластичными лопастями и регуляторами амплитуды их колебаний, обеспечивающие качественное стряхивание и сбор особей колорадского жука с ботвы при минимальном ее повреждении. Представлено описание лабораторной установки, экспериментального образца комбинированного агрегата, изложена методика проведения экспериментов. Исследования проводили в 2004-2008 годах на опытном поле Учреждения образования «Гродненский государственный аграрный университет» (УО «ГГАУ») и на полях Сельскохозяйственного производственного кооператива (СПК) «Занеманский» Мостовского района Гродненской области. Установлено, что с целью снижения энергоемкости процесса целесообразно взаимодействие ротора с ботвой в ее верхушечной части, где имеет место максимальная концентрация особей колорадского жука. Минимальное количество жука на ботве и отсутствие видимого ее повреждения достигаются при диаметре капроновых нитей лопасти 1,2-1,5 мм, а рациональное по условию энергоемкости положение регулятора от оси ротора составляет 0,14-0,18 м. При условии минимальной энергоемкости процесса и без видимого повреждения листьев диапазон окружной скорости ротора должен составлять 3-4 м/с. Получено уравнение регрессии второй степени, определяющее связь остаточного количества особей жука на ботве после прохода машины с окружной скоростью ротора $V_{окр} = 3,7$ м/с, положением регулятора на радиусе ротора $R_p = 0,16$ м и сечением лопасти $S_{лоп} = 1800$ мм².

Ключевые слова: параметры, рабочий орган, лопасти, ротор, картофель.

Благодарности: работа выполнена без финансового обеспечения в рамках инициативной тематики.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Заяц П. В., Казакевич П. П. Экспериментальные исследования машины для сбора колорадского жука. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021;22(6):935-947. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.935-947>

Поступила: 17.08.2021

Принята к публикации: 29.11.2021

Опубликована онлайн: 15.12.2021

Experimental studies of a machine for collecting the Colorado potato beetle

© 2021. Pavel V. Zayats¹✉, Petr P. Kazakevich²

¹Republican Unitary Enterprise "Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization", Minsk, the Republic of Belarus,

²National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, the Republic of Belarus

The substantiation of the design and technological scheme of the machine for the mechanical collection of the Colorado potato beetle in the production of environmentally friendly potato is carried out. The parameters and modes of rotors with flexible-elastic blades and regulators of the amplitude of their oscillations, providing high-quality shaking and collection of Colorado potato beetle individuals from the tops with minimal damage, have been experimentally substantiated. A description of the laboratory installation, an experimental sample of a combined unit is presented, and a methodology for conducting experiments is described. Experimental studies were carried out in 2004-2008 in the experimental field of the Educational institution "Grodno State Agrarian University" (UO "GGAU") and in the fields of the Agricultural production cooperative (SEC) "Zanemansky" of the Mostovsky district of the Grodno region. It was found that in order to reduce the energy intensity of the process, the interaction of the rotor with the tops in its apical part, where the maximum concentration of Colorado potato beetle individuals takes place, is expedient. The minimum amount of beetle on the tops and the absence of visible damage to it are achieved when the diameter of the nylon threads of the blade is 1.2-1.5 mm, and the rational position of the regulator from the rotor axis is 0.14-0.18 m according to the energy intensity condition. Under the condition of minimal energy consumption of the process and without visible damage to the leaves, the circumferential speed range of the rotor should be 3-4 m/s. A regression equation of the second degree is obtained, which determines the relationship of the residual number of beetle individuals on the tops after the passage of the machine with the circumferential speed of the rotor V_{oc} , the position

of the regulator on the radius of the rotor R_r and the cross section of the blade S_{bl} . The optimal values were determined by solving the equation: $V_{oc} = 3.7 \text{ m/s}$, $R_r = 0.16 \text{ m}$, $S_{bl} = 1800 \text{ mm}^2$.

Keywords: parameters, working body, blades, rotor, potato

Acknowledgments: the work was done without financial support within the framework of the initiative topics.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors stated no conflict of interest.

For citation: Zayats P. V., Kazakevich P. P. Experimental studies of a machine for collecting the Colorado potato beetle. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2021;22(6):935-947. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.935-947>

Received: 17.08.2021

Accepted for publication: 29.11.2021

Published online: 15.12.2021

Картофель, который в Беларуси называют вторым хлебом, используется не только на продовольственные цели, но и на технические – для переработки на крахмал, патоку, спирт и другие продукты, также применяется на корм животным.

От колорадского жука (*Leptinotarsa decemlineata*, Say) потери урожая данной культуры могут составлять практически 50 %. Химический метод, наиболее широко применяемый для борьбы с вредителем, непригоден для получения экологически чистого картофеля, о чем свидетельствует ряд публикаций [1, 2, 3, 4]. Получить такой картофель можно, если обеспечить своевременное и качественное удаление жука с ботвы. Исследование, разработка и совершенствование машин и их рабочих органов для механического сбора особей колорадского жука с ботвы является актуальной задачей при выращивании экологически чистого картофеля [5, 6, 7, 8]. Российские и белорусские исследователи большое внимание в своих работах обращают на современные наукоемкие технологии в перспективных способах борьбы с колорадским жуком, тем самым увеличивая урожайность картофеля, вопросы биорегуляции вредителей, достижения в защите посадок картофеля от колорадского жука как химическими, так и механическими способами [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17].

Цель исследования – проверка теоретических предпосылок и расчетов режимов работы роторов с упруго-эластичными лопастями, а также определение конструктивно-режимных параметров рабочих органов машины для сбора колорадского жука, которые невозможно определить теоретическими исследованиями.

Научной новизной исследования является обоснование конструктивно-технологической

схемы машины для механического сбора колорадского жука при получении экологически чистой продукции. Экспериментально обоснованы параметры и режимы роторов с упруго-эластичными лопастями и регуляторами амплитуды их колебаний, обеспечивающие качественное стряхивание и сбор особей колорадского жука с ботвы при минимальном ее повреждении, что подтверждено тремя патентами Республики Беларусь на полезные модели^{1,2,3}.

Материал и методы. Экспериментальные исследования проводили в 2004-2008 годах на опытном поле Учреждения образования «Гродненский государственный аграрный университет» (УО «ГГАУ») и на полях Сельскохозяйственного производственного кооператива (СПК) «Занеманский» Мостовского района Гродненской области.

Программа исследований предусматривала:

- изучение физико-механических свойств ботвы картофеля и особей колорадского жука (силы упругости ботвы, скорости витания и насыпной плотности особей колорадского жука, концентрации особей по ярусам высоты ботвы);
- исследование параметров лопастей активного рабочего органа;
- проведение многофакторного эксперимента по обоснованию параметров активного ротора;
- обработка результатов экспериментов и обоснование рациональных параметров рабочих органов машины для сбора жука.

Для выполнения намеченной программы потребовалось решение следующих задач:

- разработать и изготовить лабораторную установку для экспериментального исследования конструктивно-режимных параметров активного рабочего органа для сбора колорадского жука;

¹Пестис В. К., Ладутько С. Н., Заяц Э. В., Заяц П. В. Комбинированный агрегат для ухода за картофелем: пат. на полезную модель 1961 Республика Беларусь. № u20040469; заявл. 15.10.2004; опубл. 30.06.2005. 6 с.
URL: <http://search.ncip.by/database/index.php?pref=mod&lng=ru&page=3&target=2181>

²Пестис В. К., Ладутько С. Н., Заяц Э. В., Заяц П. В. Комбинированный агрегат для ухода за картофелем: пат. на полезную модель 3874 Республика Беларусь. № u20070170; заявл. 12.03.2007; опубл. 30.10.2007. 3 с.
URL: <http://search.ncip.by/database/index.php?pref=mod&lng=ru&page=3&target=4291>

³Пестис В. К., Ладутько С. Н., Заяц Э. В., Казакевич П. П., Заяц П. В. Тележка для сбора колорадского жука: пат. на полезную модель 4041 Республика Беларусь. № 120070400; заявл. 31.05.2007; опубл. 30.12.2007. 6 с.
URL: <http://search.ncip.by/database/index.php?pref=mod&lng=ru&page=3&target=4521>

– разработать и изготовить экспериментальный образец комбинированного агрегата для сбора колорадского жука и рыхления междурядий;

– выбрать стандартное оборудование для исследований;

– уточнить методику проведения экспериментов и обработки полученных результатов, сравнить их с теоретическими предпосылками.

Физико-механические свойства ботвы картофеля и особей жука определяли согласно общепринятым методикам^{4,5}. Экспериментально устанавливали силу упругости и размеры ботвы

в период сбора жука, размеры, массу 1000 его особей, насыпную плотность и скорость витания особей насекомого, влажность и температуру окружающего воздуха.

Для определения массы особей использовались весы лабораторные ВЛТЭ-500. При измерении линейных размеров, в зависимости от целей и объектов исследования, использовались линейка, рулетка, штангенциркуль.

При получении величины упругости ботвы картофеля и лопастей измеряли усилие их прогиба с помощью лабораторной установки (рис. 1).

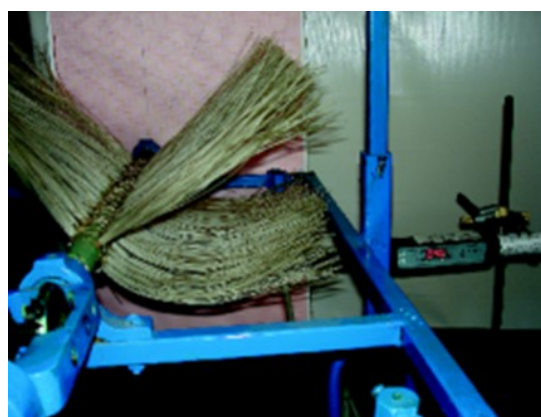
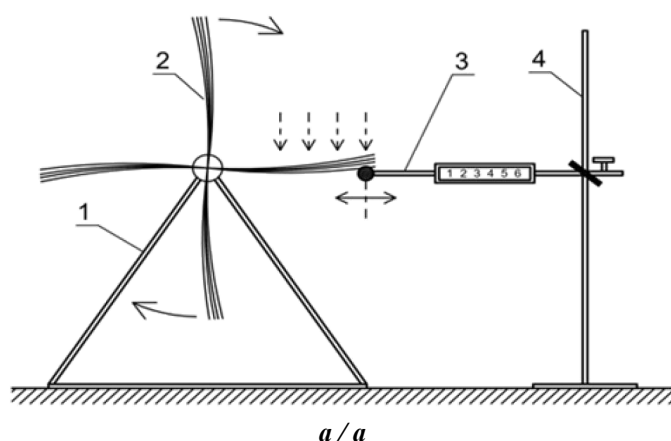


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) лабораторной установки для определения упругости лопастей ротора и процесса работы: 1 – рама; 2 – лопасти; 3 – цифровой динамометрический ключ; 4 – штатив /
Fig. 1. Schematic (a) and general view (b) of a laboratory installation for determining the elasticity of the rotor blades and the operation process: 1 – frame; 2 – blades; 3 – digital torque wrench; 4 – tripod

Для этих целей использовали ключ динамометрический электронный ЭДК. Диапазон измерения ЭДК крутящего момента 20-200 Н·м. Скорость воздушного потока, относительную влажность воздуха и температуру регистрировали термоанемометром-гигрометром ТКА-ПКМ (модель 60). Скорость витания особей определяли в регулируемом по величине вертикальном воздушном потоке (рис. 2).

При предварительных исследованиях скорость воздушного потока регистрировали чашечным анемометром и жидкостным микроанемометром.

При определении массы особей колорадского жука находили массу 1000 личинок разных возрастов, а также массу взрослых особей. Для измерения их насыпной массы использовали мерную емкость, затем подсчитывали количество особей колорадского жука равномерно каждого возраста, определяли

их вес и объем. Характерные режимы исследуемого процесса и конструктивное исполнение рабочих органов, установок и опытных образцов машин фотографировали.

Кроме того, оценивали степень повреждения ботвы картофеля. После каждого прохода машины для сбора колорадского жука подсчитывали поврежденные кусты и вычисляли количество поврежденных растений в процентах по формуле:

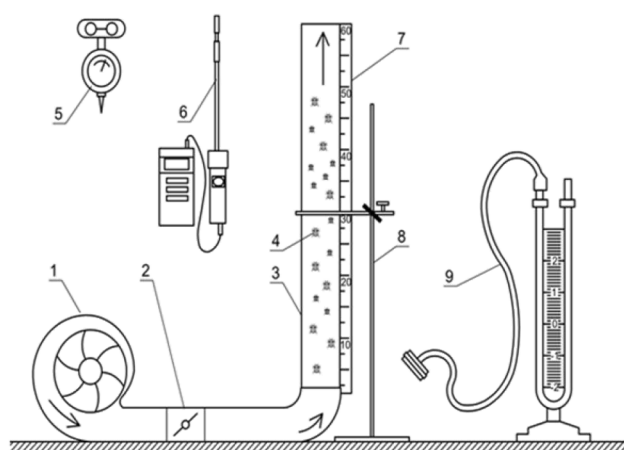
$$K_{\text{кп}} = \frac{n_{\text{кп}}}{n_{\text{общ}}} \cdot 100\%, \text{ где} \quad (1)$$

$n_{\text{кп}}$ – количество поврежденных кустов, шт./10 м²;
 $n_{\text{общ}}$ – общее количество кустов, шт./10 м².

В качестве контроля подсчитывали количество оторванных и травмированных листьев, максимальное число которых не должно превышать 20 % от их общего количества на длине рядка 14,3 м.

⁴Физико-механические свойства растений, почв и удобрений. Тр. ВИСХОМ, 1970. 423 с.

⁵Ковалев Н. Г. Сельскохозяйственные материалы (виды, состав, свойства). М.: Родник, 1998. 208 с.



a / a



б / b

Рис. 2. Схема (а) и общий вид (б) лабораторной установки для определения скорости витания особей колорадского жука: 1 – пылесос (нагнетающий вентилятор); 2 – дроссельная заслонка; 3 – стеклянная колба; 4 – колорадский жук; 5 – анемометр; 6 – термоанемометр-гигрометр; 7 – линейка; 8 – штатив; 9 – жидкостный микроманометр /

Fig. 2. Schematic (a) and general view (b) of a laboratory setup to determine the hovering speed of Colorado beetle individuals: 1 – vacuum cleaner (blower); 2 – throttle valve; 3 – glass flask; 4 – Colorado beetle; 5 – anemometer; 6 – thermoanemometer-hygrometer; 7 – ruler; 8 – tripod; 9 – liquid micromanometer

При нахождении силы упругости ботвы, в зависимости от точки приложения усилия по ее высоте, подбирали кусты, состоящие из шести стеблей высотой 0,45 м. Металлический стержень, связанный с динамометрическим ключом, перемещали горизонтально и фиксировали максимальное усилие прогиба ботвы в разных точках по ее высоте.

При проведении однофакторного эксперимента по определению остаточного количества особей колорадского жука на ботве, в зависимости от диаметра нитей лопастей ротора, подсчитывали количество особей колорадского жука до и после взаимодействия кустов картофеля с лопастями ротора на площади 10 м². Окружная линейная скорость составляла 1 м/с, а положение регулятора от оси вращения ротора – 0,14 м.

Все однофакторные опыты проводили в трехкратной повторности. Промахи результатов опытов оценивали с помощью критерия Стьюдента. Полученные математические модели проверяли на адекватность по F-критерию Фишера и однородность дисперсий по критерию Кохрена.

Для адекватной квадратичной модели проводили проверку значимости коэффициентов полученных уравнений регрессии, для чего рассчитывали доверительный интервал. Поскольку был принят ортогональный план опытов, то коэффициенты регрессии не пересчитывались.

Для проведения лабораторных исследований по определению параметров активного ротора была изготовлена ручная установка с одним ротором с упругими элементами, аналогичными элементам машины. На рисунке 3 приведена кинематическая схема и общий вид установки исследования параметров ротора.

Установка позволяет изменять частоту вращения рабочего органа, положение регулятора амплитуды колебаний лопастей рабочего органа в горизонтальной и вертикальной плоскостях, упругость лопастей и положение рабочего органа по высоте.

На основании результатов исследований разработана и изготовлена машина, создан экспериментальный агрегат для сбора колорадского жука и окучивания картофеля, состоящий из трактора Беларусь 82.1, машины для сбора колорадского жука и культиватора-окучника КНО-2,8, навешенных соответственно на переднее и заднее навесные устройства трактора (рис. 4).

Оценка эффективности применения рабочих органов для сбора особей колорадского жука делалась на основе сопоставления результатов подсчета насекомых на кустах картофеля до и после сбора. Основными показателями, по которым можно судить об обилии особей колорадского жука на картофеле, являются их численность на одном кусте растений картофеля и единице площади посадок. Условно

численность особей колорадского жука на 1 га площади посадок картофеля можно определить, подсчитав число особей на площади 10 м² (на длине рядка 14,3 или 11,1 м при ширине междурядий соответственно 0,7 или 0,9 м).

Тогда, $n_{га} = 1000 \cdot n_{10}$, (2)
где $n_{га}$ – количество особей колорадского жука на площади 1 га; n_{10} – количество особей жука на длине рядка 14,3 м или 11,1 м при ширине междурядий соответственно 0,7 или 0,9 м.

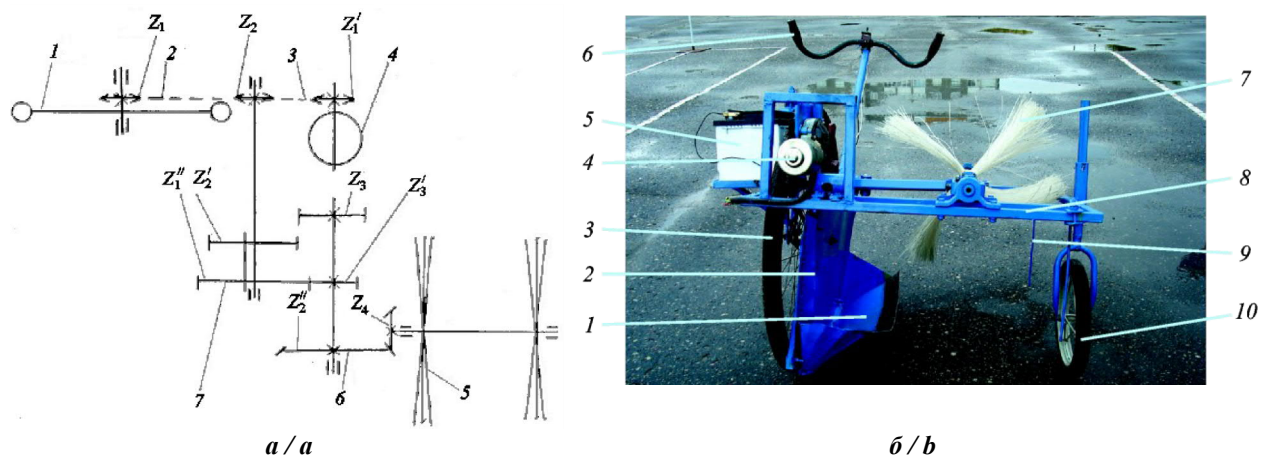


Рис. 3. Кинематическая схема (а): 1 – опорно-приводное колесо; 2, 3 – цепные передачи; 4 – электродвигатель с изменяемой частотой вращения; 5 – ротор; 6 – коническая передача; 7 – редуктор с изменяемым передаточным числом зубьев; z_1 – ведущая звездочка от опорного колеса; z_2 – ведомая звездочка от электродвигателя; z_3 – ведомая звездочка вторичной передачи; z_4 – ведомая звездочка конической передачи; z_1' – ведущая звездочка от электродвигателя; z_2' – ведущая звездочка вторичной передачи; z_3' – ведомая звездочка первичной передачи; z_4' – ведущая звездочка первичной передачи; z_1'' – ведущая звездочка конической передачи; общий вид (б) установки для исследования параметров ротора: 1 – емкость для сбора колорадского жука; 2 – экран; 3 – опорно-приводное колесо; 4 – электродвигатель с регулируемой частотой вращения; 5 – аккумуляторная батарея; 6 – кронштейн с ручками; 7 – ротор; 8 – рама; 9 – регулятор амплитуды колебаний лопастей ротора; 10 – опорное колесо /

Fig. 3. Installation kinematic diagram (a): 1 – bearing-driven wheel; 2, 3 – chain gears; 4 – electric motor with variable speed; 5 – rotor; 6 – bevel gear; 7 – reducer with variable number of teeth; z_1 – drive sprocket from the bearing wheel; z_2 – driven sprocket from the electric motor; z_3 – driven sprocket of the secondary gear; z_4 – bevel drive sprocket; z_1' – motor drive sprocket; z_2' – secondary drive sprocket; z_3' – primary drive sprocket; z_4' – primary drive sprocket; z_1'' – bevel drive sprocket; general view (b) for research of rotor parameters: 1 – a container for collecting a Colorado potato beetle; 2 – a screen; 3 – a support-drive wheel; 4 – an electric motor with an adjustable speed; 5 – a battery; 6 – a bracket with handles; 7 – a rotor; 8 – a frame; 9 – a regulator of the amplitude of the rotor blades; 10 – a support wheel



Рис.4. Комбинированный агрегат для сбора колорадского жука и окучивания картофеля в работе /

Fig. 4. Combined unit for collecting Colorado potato beetle and potato hoeing in operation

При проведении многофакторных исследований ротора с упруго-эластичными лопастями и регулятором амплитуды их колебаний проведена серия опытов с целью выявления

влияния конструктивно-режимных параметров рабочего органа и состояния ботвы на качественные показатели сбора колорадского жука. Теоретическими исследованиями установлены

влияющие на оценочные параметры факторы: диаметр ротора, количество и ширина лопастей, параметры и взаимное расположение

лотка и ротора, положение регулятора амплитуды колебания лопасти по высоте куста и радиусу ротора (табл. 1).

Таблица 1 – Основные факторы, влияющие на качественные показатели сбора колорадского жука / Table 1 – The main factors affecting the quality indicators of the collection of the Colorado potato beetle

Фактор / Factor	Уровни регулирования / Levels of regulation	
	нижний / lower	верхний / upper
Окружная скорость ротора, м/с / Circumferential speed of the rotor, m/s	3,0	4,0
Положение регулятора по радиусу ротора, см / The position of the regulator along the radius of the rotor, cm	10	30
Площадь поперечного сечения лопасти, мм ² / The cross-sectional area of the blade, mm ²	1 400	1 900
Положение регулятора амплитуды колебаний лопасти по высоте куста, см / The position of the regulator of the amplitude of vibrations of the blade along the height of the bush, cm	-15	+5
Диаметр капроновых нитей, мм / Diameter of nylon threads, mm	1,0	1,6
Амплитуда колебаний лопасти, м / The amplitude of the blade vibrations, m	0,05	0,15
Диаметр ротора, м / The diameter of the rotor, m	0,50	0,60
Количество лопастей ротора, шт. / The number of rotor blades, pcs.	2	8
Ширина лотка, м / The width of the tray, m	0,25	0,50
Ширина лопастей, м / The width of the blades, m	0,1	0,8
Упругость или изгибающий момент ботвы, Н·м / The elasticity or bending moment of the tops, N·m	0,2	6,0
Влажность ботвы, % / Humidity of the tops, %	70	90
Высота ботвы, м / Height of the tops, m	0,30	0,45

После проведения отсеивающих экспериментов и ранжирования факторов по значимости определены основные детерминирующие факторы, влияющие на качество сбора колорадского жука: окружная скорость ротора, удельная сила упругости лопасти или связанная с ней площадь поперечного сечения лопасти, амплитуда колебания лопасти или положение регулятора по радиусу ротора (расстояние от регулятора амплитуды колебания лопасти до оси ротора).

Результаты предварительных опытов показали, что при сборе жука первые 2-4 ч после дождя происходит повреждение ботвы в виде обрыва отдельных листьев, что нарушает технологический процесс. При сборе колорадского жука в сухую погоду (при относительно меньшей влажности растения) повреждения ботвы практически не происходит.

Одним из вопросов, возникающих при использовании ротора с упруго-эластичными лопастями, является обоснование эластичности лопастей. При ее снижении лопасть будет приобретать свойства упругого рабочего органа

и для ее прогиба потребуется значительное усилие. При работе упругой лопасти может наблюдаться повреждение ботвы. При значительном уменьшении упругости (увеличении эластичности) следует ожидать снижения качества сбора особой колорадского жука с ботвы.

Упругость, как мера податливости тела деформации $X_{\text{лоп}}$, определяется при изгибе бруса по формуле:

$$F_{y1} = E_{\text{лоп}} \cdot J_{\text{лоп}}, \quad (3)$$

где $E_{\text{лоп}}$ – модуль упругости лопасти, кг·м²;

$J_{\text{лоп}}$ – осевой момент поперечного сечения лопасти, м⁴.

Осевой момент для лопасти можно найти с учетом ее прямоугольного поперечного сечения по формуле $J_{\text{лоп}} = \frac{B_{\text{лоп}} \cdot b_{\text{лоп}}^3}{12}$.

Осевой момент для стебля картофеля можно определить как для круглого стержня диаметром D_c по формуле $I_k = \frac{\pi \cdot D_c^4}{64}$.

Осевой момент для куста, состоящего из n_c стеблей, по формуле:

$$I_k = \sum \frac{\pi \cdot D_c^4}{64} \approx \frac{\pi \cdot D_c^4 \cdot n_c}{64}.$$

Тогда, для лопасти прямоугольного поперечного сечения упругость определяется по формуле:

$$F_{y1} = \frac{E_{\text{лоп}} \cdot B_{\text{лоп}} \cdot b_{\text{лоп}}^3}{12}, \quad (4)$$

для стебля круглого сечения:

$$F_{y1c} = \frac{E_c \cdot \pi \cdot R_c^4}{4} = \frac{E_c \cdot \pi \cdot D_c^4}{64}, \quad (5)$$

для куста, состоящего из n_c стеблей:

$$F_{y1k} \approx \frac{E_c \cdot \pi \cdot D_c^4 \cdot n_c}{64}. \quad (6)$$

Из приведенных формул видно, что для нахождения упругости лопасти и стеблей картофеля требуется определение экспериментальным путем модулей их упругости. Так как лопасть состоит из собранных тонких кусков капроновых нитей одинакового диаметра в пучки, закрепленные практически на оси ротора в отверстиях круглого сечения, то упругость такой лопасти при предварительных расчетах можно определить по формуле:

$$F_{y1} = E \cdot \left(\sum \frac{\pi \cdot D_{\text{нк}}^4}{64} \right) = E \cdot \left(\sum \frac{\pi \cdot R_{\text{нк}}^4}{4} \right) \approx \frac{E_{\text{лоп}} \cdot \pi \cdot D_{\text{нк}}^4 \cdot n_n}{64}, \quad (7)$$

где $E_{\text{лоп}}$ – модуль упругости для капроновых нитей; $D_{\text{нк}}$ и $R_{\text{нк}}$ – соответственно диаметр и радиус капроновых нитей, м; n_n – количество капроновых нитей.

Поскольку упруго-эластичные лопасти ротора собраны из одного материала и составляют единое целое, то в расчетах вместо упругости можно воспользоваться функционально зависимой с ней площадью поперечного сечения лопасти.

Результаты и их обсуждение. При исследовании свойств особей колорадского жука определялись насыпная плотность и масса 1000 особей, а также скорость витания особей колорадского жука в период личиночной стадии. Результаты исследований представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты определения некоторых свойств особей колорадского жука /
Table 2 – Results of determining some properties of individuals of the Colorado potato beetle

Показатель / Indicator	Среднее значение / Average value
Масса 1000 взрослых особей колорадского жука, кг / Weight of 1000 adult individuals of the Colorado potato beetle, kg	1,6-1,7
Насыпная плотность особей колорадского жука (в период личиночной стадии), кг/м ³ / Bulk density of Colorado potato beetle individuals (during the larval stage), kg/m ³	600-900
Скорость витания особей колорадского жука (в период личиночной стадии), м/с / Soaring speed of Colorado potato beetle individuals (during the larval stage), m/s	8,0-10,2

Наблюдения показали, что личинки колорадского жука в ясную солнечную погоду обычно располагаются на верхней части листьев, причем, как правило, в верхней зоне кустов картофеля. Первые личинки обычно появляются в середине июня. Высота ботвы в это время равна 0,25-0,40 м.

Оценка сцепления личинок различных возрастов с листьями растения при воздействии на данное растение лопастей ротора показала, что более прочно удерживаются на ботве личинки младших возрастов, и особенно первого, менее прочно – личинки старших возрастов и взрослые особи колорадского жука.

Согласно результатам определения массы 1000 особей и насыпной плотности особей колорадского жука в период сбора, т. е. в период личиночной стадии, имеет место рост этих значений с увеличением их возраста. Однако с практической точки зрения для расчета объема накопительных емкостей чаще

приходится пользоваться усредненной насыпной плотностью особей взрослых жуков вместе с личинками, которая во время проведения опытов составляла 600-900 кг/м³.

Определение силы упругости ботвы, в зависимости от точки приложения усилия по высоте, установлено, что по мере снижения точки приложения усилия и приближения ее к основанию стеблей сила упругости увеличивается, причем наиболее существенное ее увеличение происходит в нижней части стеблей – вблизи основания. На рисунке 5 приведена графическая зависимость силы упругости ботвы куста высотой 0,45 м, состоящего из шести стеблей, от точки приложения усилия для средних условий в период сбора особей колорадского жука, что соответствует фазе «смыкание ботвы» (до начала фазы «бутонизация»). Из графика видно, что при снижении точки приложения усилия к ботве по высоте с 0,30 до 0,20 м сила упругости ботвы увеличивается в 2 раза.

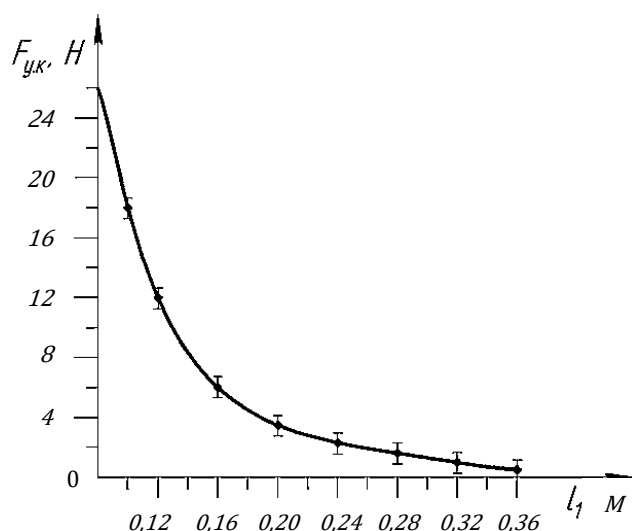


Рис. 5. Сила упругости ($F_{ук}$) ботвы куста из шести стеблей высотой 0,45 м в зависимости от точки приложения усилия на высоте ботвы от основания (l_1) /

Fig. 5. The elastic force ($F_{ук}$) of the tops of a bush of six stems with a height of 0.45 m, depending on the point of application of the force at the height of the tops from the base (l_1)

Тогда, согласно уравнению

$$P_{в^2} = \frac{3 \cdot E_{бот} \cdot l_{бот} \cdot A_{бот}}{l_{бот}^3}, \quad \text{дополнительная}$$

мощность на привод активного ротора также увеличится примерно в 2 раза. Следовательно, взаимодействие ротора с ботвой картофеля целесообразно обеспечить в верхней части стеблей. В этом случае уменьшается сила упругости стеблей, что в итоге приводит к снижению энергоемкости технологического процесса стряхивания особей колорадского

жука с ботвы картофеля, усиливает колебание ботвы и увеличивает эффект сбора особей.

Определение остаточного количества особей колорадского жука ($n_{ж}$) на 10 м² посадок картофеля в зависимости от диаметра капроновых нитей ($d_{нк}$) лопасти показало, что более высокое качество их сброса достигается при толщине нитей 1,2; 1,3 и 1,5 мм (рис. 6). При этом окружная скорость рабочего органа составляла 1 м/с, положение регулятора амплитуды колебания лопастей от оси ротора 0,14 м.

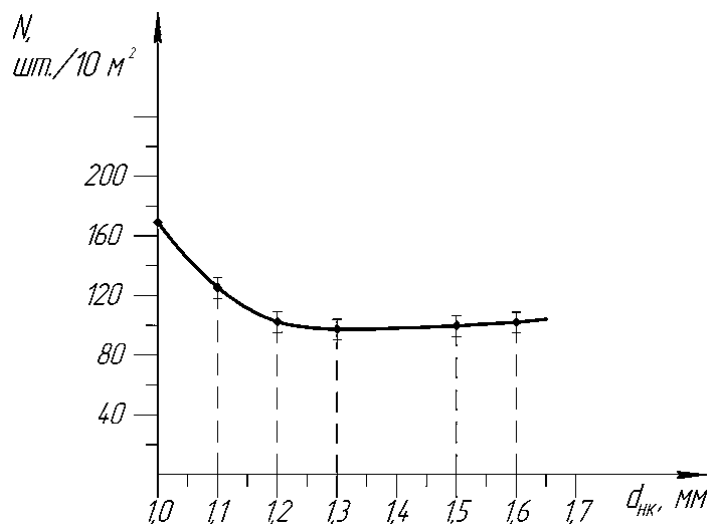


Рис. 6. Зависимость остаточного количества особей колорадского жука (N) от диаметра нитей лопастей ротора ($d_{нк}$) /

Fig. 6. Dependence of the residual number of individuals of the Colorado potato beetle (N) on the diameter of the threads of the rotor blades ($d_{нк}$)

Анализ кривой, представленной на рисунке 6, показывает, что при уменьшении диаметра нитей до 1 мм остаточное количество особей существенно увеличивалось, что можно объяснить относительно небольшой силой упругости лопастей по сравнению с силой упругости ботвы. Увеличение диаметра капроновых нитей более 1,6 мм также нерационально, так как при этом сила их упругости увеличивается настолько, что при окружных скоростях рабочего органа более

4 м/с травмируются листья ботвы картофеля, отдельные из них отрываются.

Результаты определения зависимости силы упругости лопасти ротора от положения регулятора амплитуды колебаний (рис. 7, а) подтверждают, что по мере приближения регулятора к оси ротора сила упругости возрастает. То есть с целью снижения энергоемкости процесса следует работать при большем удалении регулятора от оси ротора. Однако при этом можно ожидать уменьшения

количества сброшенных с ботвы особей колорадского жука, так как амплитуда колебания лопасти уменьшается.

При установке регулятора на расстоянии 0,15 м от оси вращения четырехлопастного ротора изгибаемая лопасть касается следующей лопасти. При дальнейшем приближении регулятора к оси ротора приращение силы упругости лопасти, определяемой как разница между данным и

предыдущим значениями, увеличивается более существенно (рис. 7, б). Повышение вызвано сопротивлением деформации последующей лопасти. Наиболее существенно сила упругости возрастает при $R_p < 0,14$ м. Поэтому работать в этом диапазоне, с точки зрения энергоемкости процесса, нецелесообразно. При удалении регулятора на расстояние 0,18 м и более усилие прогиба остается практически постоянным.

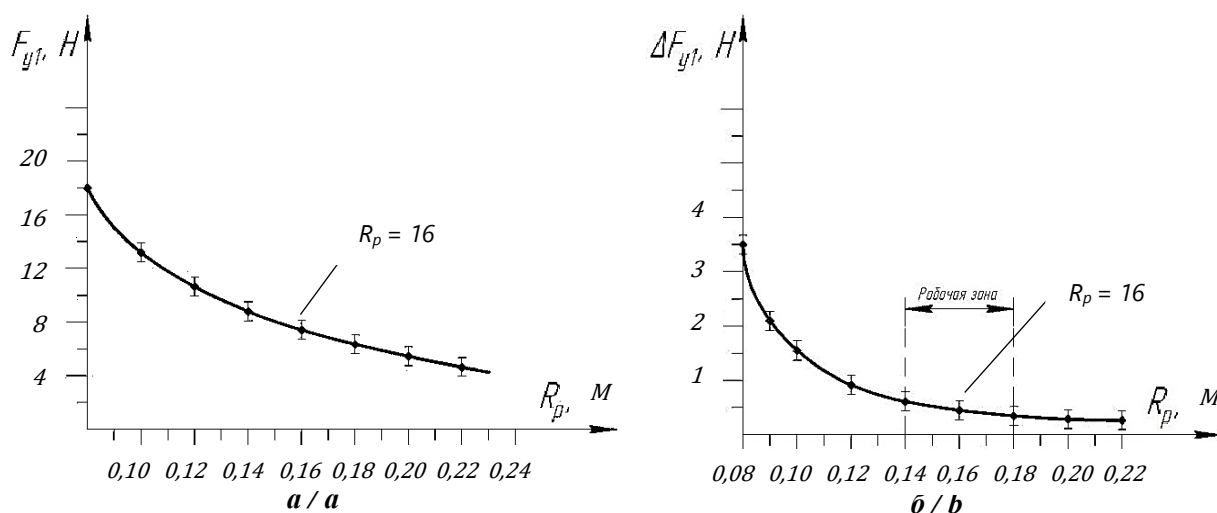


Рис. 7. Зависимости: а – силы упругости лопасти (F_{y1}); б – приращения силы упругости лопасти (ΔF_{y1}) от положения регулятора амплитуды колебаний (R_p) /

Fig. 7. The dependence: а – of the elastic force of the blade (F_{y1}); б – of the increment of the elastic force of the blade (ΔF_{y1}) on the position of the oscillation amplitude regulator (R_p)

Результаты дальнейших исследований подтвердили, что качество очистки ботвы картофеля от особей колорадского жука (причем во время опытов на кустах преобладали личинки первого и второго возрастов) в зависимости от положения регулятора амплитуды колебаний упруго-эластичных лопастей (рис. 8, а) при $R_p > 0,18$ см значительно ухудшается.

Анализ экспериментальных зависимостей (см. рис. 7, 8) позволяет определить, что рабочими положениями регулятора амплитуды колебаний лопастей ротора является диапазон значений $R_p = 0,14-0,18$ м.

Результаты исследования качества очистки кустов картофеля от особей колорадского жука в зависимости от окружной скорости рабочего органа (рис. 8, б) показали, что при увеличении окружной скорости от 1,5 до 3,0 м/с остаточное количество особей на кустах значительно уменьшается (от 80 до 37 шт./10 м²). При дальнейшем увеличении окружной скорости до 6,0 м/с остаточное

количество особей изменяется несущественно (от 21 до 18 шт./10 м²).

Таким образом, с учетом энергоемкости процесса и без значимого повреждения листьев ботвы картофеля целесообразна работа в диапазоне окружных скоростей лопастей ротора 3-4 м/с.

Результаты многофакторного эксперимента. В соответствии с целью исследований определяли влияние взаимодействия факторов (окружной скорости ротора $V_{окр}$, положения регулятора по радиусу ротора R_p и площади поперечного сечения лопасти $S_{лоп}$) на остаточное количество особей жука на ботве после прохода машины. При планировании многофакторного эксперимента были использованы различные методики⁶.

Результаты опытных данных обрабатывали на персональном компьютере с использованием электронных таблиц MS Excel. Матрица плана, интервалы и уровни варьирования факторов приведены в таблице 3.

⁶Бохан Н. И., Дмитриев А. М., Нагорский И. С. Планирование эксперимента в исследованиях по механизации и автоматизации сельскохозяйственного производства. Горки, 1986. 79 с.; Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М., 1979. 416 с.

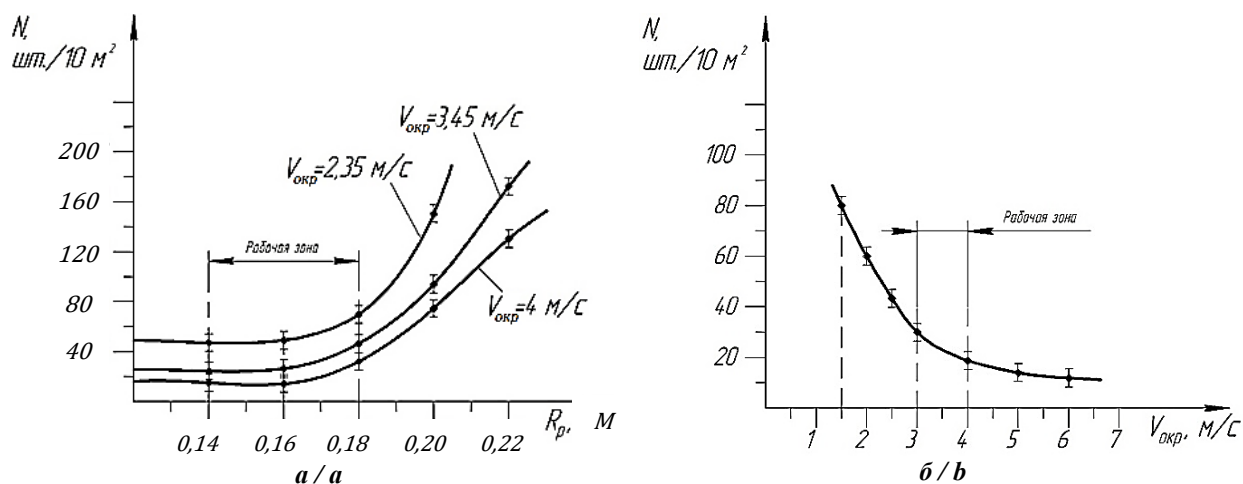


Рис. 8. Зависимости остаточного количества особей колорадского жука (N) на ботве картофеля от: а) положения регулятора амплитуды колебаний (R_p) и скорости ($V_{окр}$); б) окружной скорости ($V_{окр}$) ротора.

Fig. 8. Dependence of the residual number of individuals of the Colorado potato beetle (N) on the potato tops on: а) the position of the oscillation amplitude controller (R_p); б) the circumferential speed ($V_{окр}$) of the rotor

Таблица 3 – Матрица плана, интервалы и уровни варьирования факторов /
Table 3 – The matrix of the plan, intervals and levels of variation of factors

Уровни варьирования факторов и план опытов / Levels of variation of factors and the plan of experiments	Окружная скорость ротора, $V_{окр}$, м/с / Circumferential speed of the rotor, V_{oc} , m/s	Положение регулятора по радиусу ротора, R_p , см / Position of the regulator along the radius of the rotor, R_r , cm	Площадь поперечного сечения лопасти, $S_{лоп}$, мм ² / Cross-sectional area of the blade, S_{bl} , mm ²	Остаточное количество особей жука, шт. (по повторностям опыта и среднее значение) / Residual number of beetle individuals, pcs. (according to the repetitions of the experiment and the average value)			
	x_1	x_2	x_3	N_1	N_2	N_3	$N_{ср}$
-1	3,0	10	1400				
0	3,5	20	1650				
+1	4,0	30	1900				
1	1	1	0	54	60	81	65
2	1	-1	0	30	32	43	35
3	-1	1	0	100	115	115	110
4	-1	-1	0	52	62	66	60
5	0	0	0	12	17	28	19
6	1	0	1	14	15	37	22
7	1	0	-1	60	68	82	70
8	-1	0	1	70	65	45	60
9	-1	0	-1	98	130	132	120
10	0	0	0	5	23	32	20
11	0	1	1	51	46	23	40
12	0	1	-1	128	136	96	120
13	0	-1	1	15	21	39	25
14	0	-1	-1	69	78	93	80
15	0	0	0	16	24	23	21

В результате обработки опытных данных получена адекватная модель регрессионного анализа остаточного количества особей жука в кодированном виде:

$$Y_p = 20,00 - 19,75 \cdot x_1 + 16,88 \cdot x_2 - 30,38 \cdot x_3 + 24,63 \cdot x_1^2 + 22,88 \cdot x_2^2 + 23,88 \cdot x_3^2. \quad (8)$$

Анализ математической модели (8) позволил установить оптимальные значения параметров, обеспечивающие минимум целевой функции $N = 3,1$:

- окружная скорость ротора $V_{окр} = 3,7$ м/с;
- положение регулятора по радиусу ротора $R_p = 16$ см;
- площадь поперечного сечения лопасти $S_{лоп} = 1800$ мм².

Выводы. 1. Экспериментальными исследованиями и математической обработкой их результатов установлено, что теоретические расчёты согласуются с экспериментальными данными.

2. Исследованием зависимости точки приложения стряхивающего усилия по высоте ботвы картофеля в зависимости от силы ее упругости установлено, что с целью снижения энергоёмкости процесса целесообразно взаимодействие ротора с ботвой в ее верхушечной части, где имеет место максимальная концентрация особей колорадского жука.

3. Минимальное остаточное количество особей колорадского жука на ботве и отсутствие видимого ее повреждения достигаются при диаметре капроновых нитей лопасти 1,2-1,5 мм.

4. Установлены экспериментальные зависимости силы упругости лопастей и остаточного количества особей жука от положения регуляторов амплитуды колебаний лопастей, которые позволили определить, что рациональное по условию энергоёмкости положение регулятора от оси ротора составляет $R_p = 0,14-0,18$ м.

5. Определена экспериментальная зависимость остаточного количества особей колорадского жука от окружной скорости ротора. При условии минимальной энергоёмкости процесса и без видимого повреждения листьев ботвы диапазон окружной скорости ротора должен составлять $V_{окр} = 3-4$ м/с.

6. Получено уравнение регрессии второй степени, устанавливающее связь остаточного количества особей жука на ботве картофеля после прохода машины с параметрами и режимами работы рабочего органа: окружной скоростью ротора $V_{окр}$, положением регулятора на радиусе ротора R_p и сечением лопасти $S_{лоп}$. Решением уравнения установлены оптимальные значения $V_{окр} = 3,7$ м/с, $R_p = 0,16$ м, $S_{лоп} = 1800$ мм².

Список литературы

1. Сонкина Е. В., Быховец С. Л. Мероприятия по ограничению вредоносности колорадского жука в посадках картофеля: аналитический обзор. Белорусский научный институт внедрения новых форм хозяйствования в АПК. Минск, 2003. 36 с.
2. Иванюк В. Г., Банадысев С. А., Журомский Г. К. Защита картофеля от болезней, вредителей и сорняков. Минск: Белпринт, 2005. 696 с.
3. Скурят А. Т. Влияние химических обработок против колорадского жука на энтомофауну картофельного поля в условиях БССР. Защита растений: сб. науч. тр. БелНИИ защиты растений. Минск, 1976. Вып. 1. С. 129-133.
4. Слобожанина Е. А. Биологические особенности колорадского жука в условиях Курганской области и обоснование мер борьбы с ним. Вестник Курганской ГСХА. 2019;(1):21-26. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39132191>
5. Казакевич П. П., Заяц П. В. Экспериментальная установка для обоснования параметров рабочих органов машины для сбора колорадского жука. Агропанорама. 2009;(5):9-11. Режим доступа: <https://ap.bsatu.by/arkhiv/17-2009/26-agropanorama-5-75-2009>
6. Бурдейко В. А., Дубень И. В. Машина и рабочие органы для сбора колорадского жука. Вестник Барановичского государственного университета. Серия: технические науки. 2018;(6):87-95. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35170633>
7. Бурдейко В. А., Ловкис В. Б. Расчет щеток машины для сбора колорадского жука. Вестник Барановичского государственного университета. Серия: технические науки. 2021;(9):53-58.
8. Чайчиц Н. В. Становление и развитие научных исследований по механизации сельскохозяйственного производства (История создания и развития факультета механизации Белорусской с.-х. академии). Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2005;(3):74-79.
9. Линьков В. В. Регуляторные зоны биодинамической саморегуляции насекомых-вредителей: на примере колорадского жука (*Leptinotarsa decemlineata* Say). Картофелеводство: сб. науч. тр. РУП «Науч.-практ. центр Нац. акад. наук Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству»; редкол.: С. А. Турко (гл. ред.) [и др.]. Минск, 2017. Т. 25. С. 141-156. Режим доступа: https://belbulba.by/wp-content/uploads/2018/05/Kartofelevodstvo_25.pdf

10. Малюга А. А., Чуликова Н. С., Енина Н. Н. Влияние минеральных удобрений и протравителей на колорадского жука и урожайность картофеля. Защита и карантин растений. 2018;(2):14-16.
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32525267>
11. Гриценко В. В., Гусейнов К. Г., Постников А. Н., Митюшев И. М. Проблемы, достижения и перспективы в защите картофеля от колорадского жука. Картофель и овощи. 2020;(8):27-31.
DOI: <https://doi.org/10.25630/PAV.2020.44.45.004>
12. Жевора С. В., Анисимов Б. В., Симаков Е. А., Овэс Е. В., Зебрин С. Н. Картофель: проблемы и перспективы. Картофель и овощи. 2019;(7):2-7. DOI: <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.89.92.006>
13. Зейрук В. Н., Васильева С. В., Старовойтов В. И., Глез В. М. Механический способ борьбы с колорадским жуком. Защита и карантин растений. 2020;(3):16-17.
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42439297>
14. Капустин В. П., Киселёв Н. В. Обоснование перспективных способов борьбы с колорадским жуком. Современные наукоемкие технологии. 2005;(11):46-47.
Режим доступа: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=26432>
15. Картофелеводство: результаты исследований, инновации, практический опыт. в 2 т. Под ред. Е. А. Симакова. М.: РАСХН, ВНИИ картоф. хоз-ва, 2008. 330 с.
16. Малюга А. А., Чуликова Н. С., Енина Н. Н., Тимошина Н. А., Федотова Л. С., Князева Е. В. Факторы формирования урожайности и качества картофеля. Современные технологии производства, хранения и переработки картофеля: мат-лы науч.-практ. конф. Под ред. С. В. Жеворы. М., 2017. С. 19-26.
17. Усков А. И., Можаяев Е. Е., Ускова Л. Б., Горяников Ю. В., Закабунина Е. Н., Хаустова Н. А. Картофелеводство. М.: ИНФРА-М, 2021. 173 с.

References

1. Sonkina E. V., Bykhovets S. L. *Meropriyatiya po ogranicheniyu vrednosnosti koloradskogo zhuka v posadkakh kartofelya: analiticheskiy obzor*. [Measures to limit the harmfulness of the Colorado potato beetle in potato plantings: analytical review]. *Belorusskiy nauchnyy institut vnedreniya novykh form khozyaystvovaniya v APK*. Minsk, 2003. 36 p.
2. Ivanyuk V. G., Banadysev S. A., Zhuromskiy G. K. *Zashchita kartofelya ot bolezney, vrediteley i sornyakov*. [Protection of potatoes from diseases, pests and weeds]. Minsk: Belprint, 2005. 696 p.
3. Skur'yat A. T. *Vliyanie khimicheskikh obrabotok protiv koloradskogo zhuka na entomofaunu kartofel'nogo polya v usloviyakh BSSR*. [The effect of chemical treatments against the Colorado potato beetle on the entomofauna of a potato field in the conditions of the BSSR]. *Zashchita rasteniy: sb. nauch. tr. BelNII zashchity rasteniy*. [Plant protection: collection of scientific works of BelNII of plant protection]. Minsk, 1976. Iss. 1. pp. 129-133.
4. Slobozhanina E. A. *Biologicheskie osobennosti koloradskogo zhuka v usloviyakh Kurganskoy oblasti i obosnovanie mer bor'by s nim*. [Biological features of the colorado potato beetle in the conditions of the kurgan region and justification of measures to fight against it]. *Vestnik Kurganskoy GSKhA*. 2019;(1):21-26. (In Russ.).
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39132191>
5. Kazakevich P. P., Zayats P. V. *Eksperimental'naya ustanovka dlya obosnovaniya parametrov rabochikh organov mashiny dlya sbora koloradskogo zhuka*. [Experimental setup for substantiating the parameters of the working organs of a Colorado potato beetle harvesting machine]. *Agropanorama*. 2009;(5):9-11. (In Belarus).
URL: <https://ap.bsatu.by/arkhiv/17-2009/26-agropanorama-5-75-2009>
6. Burdeyko V. A., Duben I. V. *Mashina i rabochie organy dlya sbora koloradskogo zhuka*. [Machine and operating tools for collecting of colorado potato beetle]. *Vestnik Baranovichskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: tekhnicheskie nauki* = BarSU Herald. Series Engineering. 2018;(6):87-95. (In Belarus).
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35170633>
7. Burdeyko V. A., Lovkis V. B. *Raschet shchetok mashiny dlya sbora koloradskogo zhuka*. [Calculation of the brushes of the Colorado potato beetle collection machine]. *Vestnik Baranovichskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: tekhnicheskie nauki* = BarSU Herald. Series Engineering. 2021;(9):53-58. (In Belarus).
8. Chaychits N. V. *Stanovlenie i razvitie nauchnykh issledovaniy po mekhanizatsii sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva (Istoriya sozdaniya i razvitiya fakulteta mekhanizatsii Belorusskoy s.-kh. Akademii)*. [Formation and development of scientific research on the mechanization of agricultural production (History of the creation and development of the Faculty of Mechanization of the Belarussian Agricultural Academy)]. *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy. 2005;(3):74-79. (In Belarus).
9. Linkov V. V. *Regulyatornye zony biodinamicheskoy samoregulyatsii nasekomykh-vrediteley: na primere koloradskogo zhuka (Leptinotarsa Decemlineata Say)*. [Regulatory zones of biodynamic self-regulation of insect pests: on the example of the Colorado potato beetle (*Leptinotarsa Decemlineata* Say)]. *Kartofelevodstvo: sb. nauch. tr. RUP «Nauch.-prakt. tsentr Nats. akad. nauk Belarusi po kartofelevodstvu i plodoovoshchevodstvu»; redkol.: S. A. Turko (gl. red.)* [et al]. [Potato growing: collection of scientific works of RUP "Scientific and practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on potato and fruit and vegetable growing"; editor: S. A. Turko (Chief Editor)]. Minsk, 2017. Vol. 25. pp. 141-156. URL: https://belbulba.by/wp-content/uploads/2018/05/Kartofelevodstvo_25.pdf

10. Malyuga A. A., Chulikova N. S., Enina N. N. *Vliyaniye mineral'nykh udobreniy i protравiteley na kolorad-skogo zhuka i urozhaynost' kartofelya*. [Influence of mineral fertilizers and disinfectants on the colorado potato beetle and potato yield]. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2018;(2):14-16. (In Russ.).

URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32525267>

11. Gritsenko V. V., Guseynov K. G., Postnikov A. N., Mityushev I. M. *Problemy, dostizheniya i perspektivy v zashchite kartofelya ot koloradskogo zhuka*. [Problems and successes in potato protection from colorado potato beetle]. *Kartofel' i ovoshchi = Potato and Vegetables*. 2020;(8):27-31. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.25630/PAV.2020.44.45.004>

12. Zhevora S. V., Anisimov B. V., Simakov E. A., Oves E. V., Zebrin S. N. *Kartofel': problemy i perspektivy*. [Potato: problems and prospects]. *Kartofel' i ovoshchi = Potato and Vegetables*. 2019;(7):2-7. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.89.92.006>

13. Zeyruk V. N., Vasileva S. V., Starovoytov V. I., Glez V. M. *Mekhanicheskiy sposob bor'by s koloradskim zhukom*. [Mechanical method of controlling the colorado potato beetle]. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2020;(3):16-17. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42439297>

14. Kapustin V. P., Kiselev N. V. *Obosnovaniye perspektivnykh sposobov bor'by s koloradskim zhukom*. [Substantiation of perspective methods of fight colorado beetle]. *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii = Modern High Technologies*. 2005;(11):46-47. (In Russ.). URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=26432>

15. *Kartofelevodstvo: rezul'taty issledovaniy, innovatsii, prakticheskiy opyt*. [Potato growing: results of the research, innovations, practical experiment.]. V 2 vol. Pod red. E. A. Simakova. Moscow: RASKhN, VNII kartof. khoz-va, 2008. 330 p.

16. Malyuga A. A., Chulikova N. S., Enina N. N., Timoshina N. A., Fedotova L. S., Knyazeva E. V. *Faktory formirovaniya urozhaynosti i kachestva kartofelya*. [Factors of yield formation and quality of potato]. *Sovremennyye tekhnologii proizvodstva, khraneniya i pererabotki kartofelya: mat-ly nauch.-prakt. konf.* [Modern technologies of potato production, storage and processing: Proceedings of scientific and practical conf.]. Pod red. S. V. Zhevory. Moscow, 2017. pp. 19-26.

17. Uskov A. I., Mozhaev E. E., Uskova L. B., Goryanikov Yu. V., Zakabunina E. N., Khaustova N. A. *Kartofelevodstvo*. [Potato growing]. Moscow: INFRA-M, 2021. 173 p.

Сведения об авторах

✉ **Заяц Павел Владимирович**, соискатель, Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства», ул. Кнорина, 1, Минск, Республика Беларусь, 220049, e-mail: belagromech@tut.by, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4887-0852>, e-mail: p_zayats@tut.by

Казакевич Пётр Петрович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, зам. председателя Президиума НАН Беларуси, иностранный член РАН, Национальная академия наук Беларуси, пр-т Независимости, 66, Минск, Республика Беларусь, 220072, e-mail: nasb@presidium.bas-net.by, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9102-2816>

Information about the authors

✉ **Pavel V. Zayats**, applicant, Republican Unitary Enterprise «Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization», Knorin St. 1, Minsk, Republic of Belarus, 220049, e-mail: belagromech@tut.by, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4887-0852>, e-mail: p_zayats@tut.by

Pyotr P. Kazakevich, DSc in Engineering, professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Deputy Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, foreign member of the Russian Academy of Sciences, The National Academy of Sciences of Belarus, 66, Nezavisimosti Ave., Minsk, Republic of Belarus, 220072, e-mail: nasb@presidium.bas-net.by, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9102-2816>

✉ – Для контактов / Corresponding author