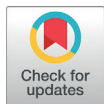


**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.059-080>EDN: <https://elibrary.ru/myqsdp>

УДК / UDK 631.171

*Оригинальная статья / Original article***Повышение эффективности комбайновой
уборки картофеля: динамическое обоснование
параметров комкоразрушающего устройства****И. А. Успенский¹, Г. Г. Рамазанова²,
М. Ю. Костенко¹, П. И. Гаджиев²✉**¹ *Рязанский государственный агротехнологический
университет имени П. А. Костычева,**г. Рязань, Российская Федерация, <https://ror.org/05q4zgg93>*² *Российский государственный университет народного
хозяйства имени В. И. Вернадского,**г. Балашиха, Российская Федерация*✉ gulbike@yandex.ru*Аннотация*

Введение. Одной из ключевых продовольственных культур в мире является картофель. Однако его производство в регионах с тяжелыми, каменистыми и запыляющими почвами вызывает затруднения. Применение высокопроизводительных картофелеуборочных комбайнов на таких почвах крайне неэффективно и приводит к значительным потерям продовольствия и ресурсов. В условиях роста мирового населения необходимо создание научного обоснования для комкоразрушающего устройства, которое позволит на этапе подготовки почвы к посадке динамически разрушать прочные почвенные комки до состояния, при котором последующая комбайновая уборка станет эффективной.

Цель исследования. Теоретическое обоснование конструктивно-режимных параметров битерного барабана комкоразрушающего устройства машины и установление зависимости угла отклонения и предельного угла ножа от высоты почвенного пласта на элеваторе.

Материалы и методы. Исследование проводили на примере битера комкоразрушающего устройства. Ножи свободно вращались на осях битера. При движении сепарирующего элеватора за счет битера с ножами разрушались комки почвы, что привело к дроблению почвенных комков в несколько стадий. Методами теоретической механики и аналитической динамики выведены аналитические зависимости, связывающие параметры системы. Аналитические зависимости были промоделированы и визуализированы с использованием программного комплекса *Mathcad*. Анализ уравнений и графиков проводили методами аналитического и сравнительного анализа.

© Успенский И. А., Рамазанова Г. Г., Костенко М. Ю., Гаджиев П. И., 2026

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Результаты исследования. Изучено воздействие системы битер-нож на процесс разрушения почвенных комков в машинах для подготовки почвы под комбайновую уборку картофеля. Определены геометрические параметры системы битер-нож при взаимодействии с почвенным пластом, находящимся на элеваторе. Получены зависимости величины угла отклонения ножа от высоты пахотного слоя на элеваторе и при выходе из почвенного слоя. Рациональная длина ножа битера $l = 170$ мм, толщина – $\delta = 16$ мм.

Обсуждение и заключение. Результаты анализа динамики системы битер-нож при ее контакте с почвенной массой демонстрируют, что угол отклонения рабочего органа α является функцией от толщины обрабатываемого слоя на полотне элеватора, что соответствует уровню загрузки устройства. Помимо этого, на данную величину влияют такие параметры, как угол наклона пруткового элеватора и возникающая центробежная сила ножа. Полученные данные позволяют выявить динамику битерного барабана, необходимую для приведения тяжелых почв в рыхлое состояние при посадке картофеля, что может решить проблемы отделения клубней от почвенных комков при комбайновой уборке на тяжелых комковатых и засоренных камнями почвах.

Ключевые слова: комкоразрушающее устройство, битер-нож, предпосадочная подготовка, уборка картофеля, повреждение клубней, битерный барабан, разрушение комков почвы

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Успенский И.А., Рамазанова Г.Г., Костенко М.Ю., Гаджиев П.И. Повышение эффективности комбайновой уборки картофеля: динамическое обоснование параметров комкоразрушающего устройства. *Инженерные технологии и системы.* 2026;36(1):41–58. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.041-058>

Improving the Efficiency of Combine-Harvesting Potatoes: Dynamic Substantiation of Soil Clod-Breaking Device Parameters

I. A. Uspenskiy^a, G. G. Ramazanova^b,
M. Y. Kostenko^a, P. I. Gadzhiev^b✉

^a Ryazan State Agrotechnological University

Named after P. A. Kostychev,

Ryazan, Russian Federation, <https://ror.org/05q4zgg93>

^b Vernadsky Russian State University of National Economy,
Balashikha, Russian Federation

✉ gulbike@yandex.ru

Abstract

Introduction. Potatoes are one of the world key food crops. But, harvesting potatoes in regions with heavy, rocky and waterlogged soils is difficult. Using high-performance potato harvesters on such soils is extremely ineffective and leads to significant losses of food and resource. The growing of global population causes the necessity to develop a scientific substantiation for creating soil clod-breaking device, which at the stage of preparing soil for planting will dynamically break up strong soil clods to a state allowing subsequent combine-harvesting to be effective and low-loss.

Aim of the Study. The study is aimed at substantiating theoretically the design and operating parameters of the beater drum of the clod-breaking device of the machine and determining the dependence of the deflection angle and limit angle of the knife on the height of the soil layer on the elevator.

Materials and Methods. The study was conducted using a clod-breaker beater as an example. The knives rotated freely on the beaters axes. When the cleaning elevator moved, the beater with knives broke up soil clods, resulting in the fragmentation of the soil clods in several stages. The methods of theoretical mechanics and analytical dynamics were used to find analytical dependences linking the system parameters. These analytical dependences were modeled and visualized using Mathcad software. The equations and graphs were analyzed using analytical and comparative analysis.

Results. There has been studied the impact of a beater-knife system on the breakdown of soil clods in soil machines to prepare the soil for combine-harvesting of potatoes. There have been determined the geometric parameters of the beater-knife system during interaction with the soil layer located in the elevator. There have been found the dependences of the knife deflection angle on the height of the arable layer in the elevator and when leaving the soil layer. There has been found that the optimal beater knife length is $l = 170$ mm, and the thickness is $\delta = 16$ mm.

Discussion and Conclusion. The results of analyzing the beater-knife system dynamics during its contact with the soil demonstrate that the working element deflection angle α depends on the thickness of the soil layer being processed on the elevator apron that corresponds to the machine load level. In addition, this value is influenced by such parameters as the elevator rod inclination angle and knife centrifugal force. The obtained data help determine the dynamics of the beater drum, which is necessary for breaking heavy soils during potato planting that make it possible to solve the problem of separating tubers from soil clods during combine-harvesting on heavy, cloddy, and stony soils.

Keywords: clod breaker, beater knife, pre-planting preparation, potato harvesting, tuber damage, beater drum, breaking up soil clods

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Uspenskiy I.A., Ramazanova G.G., Kostenko M.Y., Gadzhiev P.I. Improving the Efficiency of Combine-Harvesting Potatoes: Dynamic Substantiation of Soil Clod-Breaking Device Parameters. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(1):41–58. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.041-058>

ВВЕДЕНИЕ

Процесс производства картофеля является энерго- и трудоемким, причем 75 % всех затрат приходится на уборочные работы. Уборка картофеля комбайнами позволяет сократить затраты труда на 20 %, снизить потери урожая почти в 3 раза [1–3]. Однако применение высокопроизводительных картофелеуборочных комбайнов на значительных площадях, особенно в регионах с тяжелыми суглинистыми, комковатыми и засоренными камнями почвами (например, во многих частях России, Восточной Европы, Азии), фактически невозможно. В технологическом процессе уборочных машин важную роль играет сепарация почвы, которая заключается в отделении почвы от твердых почвенных комков, в том числе камней [4–6]. Наличие неразрушенных почвенных комков существенно снижает сепарацию почвы, приводит к увеличению повреждений клубней, высоким потерям урожая (до 60 % и более от массы клубней составляют комки почвы и камни), резкому росту трудозатрат из-за необходимости ручной переборки, снижению рентабельности производства вследствие низкой производительности и высокого процента брака. Практика показывает, что качественная подготовка почвы – залог повышения эффективности функционирования картофелеуборочных машин [7–9].

Уборка картофеля представляет собой сложный и многогранный процесс, который требует применения новых постоянно совершенствующихся и адаптируемых к современным условиям способов. Существующие технологии подготовки почвы (например, сплошное фрезерование) ограничиваются рядом факторов: наличием

камней, структурой почвы и высокими энергозатратами [10–12]. Данные технологии неприменимы на каменистых почвах, так как не обеспечивают нужной степени рыхления для последующей качественной сепарации. Таким образом, сельхозпроизводители оказываются перед выбором: либо использовать ручной труд с низкой производительностью, либо нести огромные потери при механизированной уборке, либо вообще отказываться от выращивания картофеля на подобных землях.

В условиях роста мирового населения и необходимости интенсификации сельского хозяйства невозможность использовать плодородные, но «проблемные» почвы под высокотехнологичное производство картофеля становится глобальным вызовом. Это ограничивает потенциальные объемы производства, увеличивает себестоимость и ведет к перерасходу топлива, человеко-часов и самих клубней. Основной проблемой при комбайновой уборке картофеля, которую необходимо решить, является отделение клубней от примесей – почвенных комков и камней.

Эффективным решением является применение комкоразрушающего устройства машины для подготовки почвы к комбайновой уборке картофеля. Исследование направлено на прорыв в агроинженерии – создание научного обоснования для комкоразрушающего устройства, которое заблаговременно, на этапе подготовки почвы к посадке, сможет решить ключевую задачу: динамически разрушить прочные почвенные комки до состояния, при котором последующая комбайновая уборка станет эффективной.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время отсутствуют эффективные технологии возделывания картофеля в тяжелых почвенно-климатических зонах, поскольку применяемый метод предварительной подготовки почвы требует разработки новых технических средств с активными комкоразрушающими устройствами.

Исследования технологических процессов разрушения почвенных комков ножами битерного барабана комкоразрушающего устройства проводятся отечественными и зарубежными учеными. Подчеркивается важность предварительной подготовки тяжелых почв к посадке и комбайновой уборке картофеля [13; 14]. Разрыхление почвы перед посадкой культуры способствует улучшению ее структуры: почва остается рыхлой вплоть до начала комбайновой уборки, что положительно сказывается на ее сепарации и приводит к уменьшению потерь и повреждения клубней.

Проведенный анализ показал, что, несмотря на имеющиеся технические средства для подготовки почвы под посадку и комбайновую уборку картофеля, у существующих моделей и технологий в зависимости от почвенно-климатических условий имеется ряд ограничений, не позволяющий полноценно их применять при возделывании картофеля. В связи с чем разработка машин с комкоразрушающими устройствами для возделывания картофеля на тяжелых почвах является перспективным направлением исследований.

Установлено, что наиболее благоприятные условия для применения картофелеуборочных комбайнов создаются путем предварительной подготовки почвы перед посадкой картофеля специализированной техникой. Для этого необходимо

усовершенствовать машины для подготовки почвы путем оснащения их комкоразрушающими устройствами [15–17].

При уборке картофеля картофелеуборочными комбайнами поддержание оптимального технологического процесса является основным фактором повышения производительности. В противном случае, эффективность работы комбайна снижается, в результате чего ухудшается качество сепарации почвы и увеличивается повреждение клубней. Это способствует потерям производства продукции агропромышленного комплекса. Неравномерность загрузки комбайна происходит из-за изменения физико-механических свойств и состава поступающей в комбайн массы, а также из-за неравномерности гребней. Резкое снижение эффективности сепарации наблюдается на тяжелых почвах, где имеются прочные комки, соизмеримые с клубнями. От качества предварительной подготовки почвы зависит решение вышеизложенной проблемы [18; 19].

На основании теории районирования и типажа картофелеуборочных комбайнов и машин профессора Г. Д. Петрова¹ предлагается при определении технологических комплексов машин для возделывания и уборки картофеля ориентировочно разделить почвенный слой на зоны, которые требуют предварительной подготовки.

При анализе существующих исследований отечественных ученых в данной области было выявлено несколько способов подготовки почвы, например, сплошное фрезерование или разрушение и отсеивание почвы от крупных прочных комков с применением машин для подготовки почвы² [20–22]. Появляются новые технологии сепарации картофеля, новые элементы сепарирующего рабочего органа при производстве картофелеуборочных машин, обеспечивающих качественную уборку урожая в определенных почвенно-климатических и лабораторных условиях [23–24]. Учеными из федерального научного агроинженерного центра ВИМ предлагается ресурсосберегающая технология уборки корнеплодов, способствующая качественной уборке урожая при влажности более 17% [25]. Недостатком данных технологий является сложность конструктивных решений при работе машин в полевых условиях, в связи с чем целесообразно продолжить исследования в данной области.

Для улучшения качества уборки картофеля, применительно к конкретным условиям, авторами предложено комкоразрушающее устройство машины для подготовки почвы к комбайновой уборке картофеля, которое обеспечивает разрушение комков почвы, двигающихся по элеватору машины, на более мелкие фракции по сравнению с известными техническими решениями [26]. Применение предложенного комкоразрушающего устройства способствует повышению эффективности уборки картофеля в тяжелых почвах. Для этого проведены дополнительные теоретические исследования движения почвенных комков и их взаимодействия с ножами бitera для обоснования параметров комкоразрушающего устройства машины при комбайновой уборке картофеля.

¹ Петров Г.Д. Картофелеуборочные машины. М.: Машиностроение; 1984. 320 с.

² Гаджиев П.И., Рамазанова Г.Г. Комплекс машин для подготовки почвы к комбайновой уборке картофеля: учеб. пособие. М.: ООО «Изд-во «КноРус»; 2021. 134 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

В качестве объекта исследования рассматривается комкоразрушающее устройство машины для подготовки почвы под посадку картофеля.

Методы исследования

В процессе проведения исследования применялся кинематический анализ сложного движения ножа (переносное вращение с битером и относительное вращение вокруг шарнира) с использованием теоремы о сложении скоростей. Для составления дифференциальных уравнений движения системы с двумя степенями свободы (обобщенные координаты: угол поворота битера φ и угол отклонения ножа α) использовался метод Лагранжа II рода. Метод применен в импульсной постановке для описания ударного взаимодействия. Для анализа ударных импульсов сил инерции и реакций в связях (шарнирах) при соударении ножа с почвенным комком применяли принцип Даламбера в импульсной форме.

На основе законов механики выведены аналитические зависимости, связывающие параметры системы: угол отклонения ножа при контакте с пластом, предельный угол ножа при выходе из пласта в радиальном положении, система уравнений, связывающая обобщенные скорости с ударными импульсами. Полученные зависимости реализованы в виде расчетных схем, наглядно демонстрирующих геометрию взаимодействия и приложенные силы.

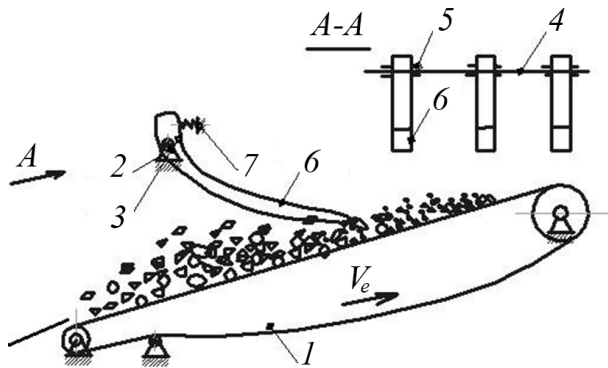
Аналитические зависимости были промоделированы и визуализированы с использованием программного комплекса *Mathcad*. Компьютерный анализ позволил качественно и количественно оценить характер влияния ключевого параметра h на рабочий процесс.

С целью выявления определяющих факторов (высота пласта, центробежная сила, угол наклона элеватора) проведен аналитический и сравнительный анализ полученных уравнений и графиков

Таким образом, методология исследования представляет собой последовательное применение методов аналитической динамики, теоретической механики и компьютерного моделирования для перехода от физической постановки агроинженерной задачи к количественным инженерным рекомендациям по проектированию комкоразрушающего устройства.

Оборудование и процедура исследования

На рисунке 1 схематически изображено комкоразрушающее устройство машины для подготовки почвы к комбайновой уборке картофеля, которое состоит из сепарирующего элеватора 1, качающихся подпружиненных сферической формы ножей 6, поочередно размещенных на вращающейся ступенчатой полой оси с подшипниковыми цилиндрическими втулками 5. Ножи выполнены с возможностью возвращения в первоначальное положение за счет цилиндрической винтовой пружины сжатия 7 [24].



Р и с. 1. Схема комкоразрушающего устройства машины для подготовки почвы к комбайновой уборке:

1 – сепарирующий элеватор; 2 – комкоразрушающий барабан; 3 – шарниры; 4 – ступенчатая полая ось; 5 – подшипниковые цилиндрические втулки; 6 – качающиеся подпружиненные сферические ножи; 7 – цилиндрическая винтовая пружина сжатия

F i g. 1. Scheme of the clod-breaking device of the machine for soil preparation for combine harvesting:

1 – cleaning elevator; 2 – clod-breaking drum; 3 – hinges; 4 – stepped hollow axle; 5 – cylindrical bearing bushings; 6 – swinging spring-loaded spherical knives; 7 – cylindrical helical compression spring

Примечание: A – вид спереди; A-A – разрез вида спереди; V_e – скорость элеватора.
Note: A – front view; A-A – sectional front view; V_e – elevator speed.

Источник: рисунок 1 взят из [26].
Source: figure 1 was taken from [26].

Подкапывающий лемех 8 подрезает почвенный пласт при вращении сепарирующего элеватора 1, крупные комки почвы движутся к комкоразрушающему барабану 2, закрепленному на шарнирах 3. При взаимодействии с качающимися подпружиненными сферическими ножами 6, поочередно размещенными на вращающейся ступенчатой полой оси 4, с подшипниковыми цилиндрическими втулками 5 крупные части почвы начинают дробиться. При дальнейшем вращении сепарирующего элеватора 1 ножи прижимаются за счет цилиндрической винтовой пружины сжатия 7, средние комки почвы разрушаются. Дробление почвенных комков происходит в несколько стадий.

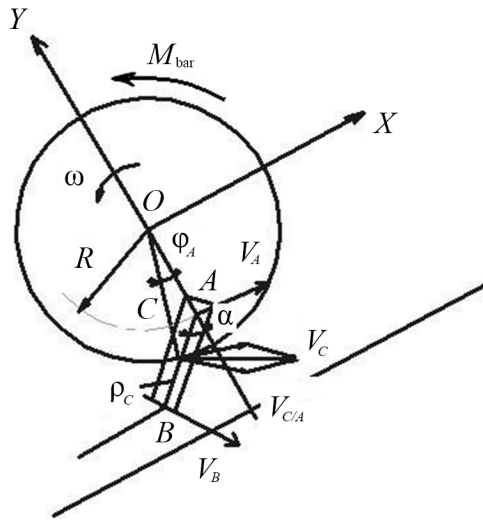
Контакт лезвия с комком почвы происходит за счет удара, возникающего в результате возвращения предварительно растянутой пружины в исходное положение. Сферическая форма лезвия увеличивает время и площадь контакта с комком в процессе работы. Предложенная конструкция комкоразрушающего устройства при подготовке почвы для уборки картофеля обеспечивает измельчение комков почвы, перемещающихся через элеватор машины, на более мелкие фракции, чем при использовании традиционных решений.

Для изучения этого вопроса составили дифференциальное уравнение движения системы, состоящей из ротора и режущего элемента, используя метод Лагранжа. Выбрали фиксированную систему координат XOY , проходящую через центр вращения ротора, и подвижную систему координат X_1OY_1 , вращающуюся

вместе с ротором и проходящую через центр вращения ротора и ось подвеса режущего элемента.

Битерный барабан (рис. 2) представляет собой систему из вращающегося ротора с шарнирно закрепленными ножами. Система имеет две степени свободы. К системе приложен вращающий момент M_{bar} . Нож при взаимодействии с почвенным пластом отклоняется на угол α .

Ввели следующие допущения: силами трения в шарнирах и весом ножа пренебрегали в виду их малого значения в сравнении с центробежной силой ножа. В качестве обобщенных координат системы приняли угол отклонения битера от вертикали и угол отклонения ножа от первоначального положения.



Р и с. 2. Расчетная схема к исследованию динамики битерного барабана

F i g. 2. Analytic model for the study of the dynamics of a beater drum

Примечание: Y – ось ординат; X – ось абсцисс; M_{bar} – вращающий момент барабана; R – радиус подвеса ножей на битере; ω – угловая скорость битера; φ_A – угол отклонения битера; C – центр тяжести ножа; A – точка крепления ножа к барабану; B – точка соприкосновения ножа с почвой; α – угол отклонения ножа; V_A – переносная (окружная) скорость точки A вместе с битером; V_C – абсолютная скорость центра тяжести ножа; V_{CA} – относительная скорость точки C относительно точки A ; V_B – абсолютная скорость точки B ножа; ρ_C – расстояние от оси подвеса до центра тяжести ножа.

Note: Y – ordinate axis; X – abscissa axis; M_{bar} – drum torque; R – blade suspension radius on beater; ω – beater angular velocity; φ_A – beater deflection angle; C – blade center of gravity; A – blade attachment point to drum; B – blade contact point with soil; α – blade deflection angle; V_A – transfer (circumferential) velocity of point A together with beater; V_C – absolute velocity of blade center of gravity; V_{CA} – relative velocity of point C , relative to point A ; V_B – absolute velocity of blade point B ; ρ_C – distance from suspension axis to blade center of gravity.

Источник: рисунки 2–5 составлены авторами статьи в программе Компас 14.

Source: figures 2–5 are compiled by the program Compass 14.

Уравнения Лагранжа второго рода в обобщенных координатах для удара записали в виде:

$$\Delta \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} \right) = Q_{\phi}^s,$$

$$\Delta \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) = Q_{\alpha}^s,$$

где Δ – оператор Лапласа; T – кинетическая энергия системы: битев и нож, Дж; $\dot{\phi}$ – угол поворота битева, °; $\dot{\alpha}$ – угол отклонения ножа, °; Q_1 и Q_2 – обобщенные силы, Н.

Определили обобщенные угловые скорости системы. Угловая скорость битева $\omega_1 = \dot{\phi}$, угловая скорость ножа $\omega_2 = \omega_{2/1} - \omega_1$, где $\omega_{2/1}$ – угловая скорость ножа относительно битева. Так как угловые скорости направлены вдоль одной оси, уравнения записаны не в векторном, а скалярном виде. Относительная угловая скорость ножа $\omega_1 = \dot{\alpha}$ при ударе направлена в противоположную сторону, тогда угловую скорость ножа записали в виде $\omega_2 = \dot{\phi} - \dot{\alpha}$.

Кинетическую энергию T системы битев-нож определили выражением:

$$T = T_1 + T_2,$$

где T_1 – кинетическая энергия битева, Дж; T_2 – кинетическая энергия ножа, Дж.

Кинетическая энергия битева T_1 , вращающегося вокруг неподвижной оси, определили выражением:

$$T_1 = I \cdot \frac{\omega_1^2}{2},$$

где I – момент инерции битева, $I = \frac{1}{2} MR^2$, кг · м²; M – масса битева, кг; $\omega_1 = \dot{\phi}$ – угловая скорость битева, рад/с.

Так как нож совершает плоскопараллельное движение, то его кинетическую энергию определили выражением:

$$T_2 = \frac{1}{2} mV_c^2 + \frac{1}{2} I_A \omega_2^2,$$

где V_c – абсолютная скорость центра тяжести ножа, м/с; m – масса ножа, кг; I_A – момент инерции ножа относительно его центра его вращения, кг · м²; $\omega_2 = \dot{\phi} - \dot{\alpha}$ – угловая скорость ножа, рад/с.

$$I_A = \frac{ml^2}{3} = \frac{m(2\rho_c)^2}{3} = \frac{4m\rho_c^2}{3},$$

где l – длина ножа, м; ρ_c – расстояние от оси подвеса до центра тяжести ножа, м.

Абсолютную скорость центра тяжести ножа \bar{V}_c определили выражением:

$$\bar{V}_c = \bar{V}_A + \bar{V}_{c/A}, \quad (1)$$

где \bar{V}_A – переносная (окружная) скорость точки A вместе с битевом, м/с; $\bar{V}_{c/A}$ – относительная скорость точки C , относительно точки A , м/с.

Переносную скорость точки A определили выражением:

$$\bar{V}_A = \bar{\omega}_1 \bar{R}, \quad (2)$$

где \bar{R} – радиус подвеса ножей на битере, м.

Относительная скорость $\bar{V}_{c/A}$ движения ножа относительно битера:

$$\bar{V}_{c/A} = \bar{\omega}_2 \cdot \bar{\rho}_c, \quad (3)$$

Подставили в выражение (1) уравнения (2) и (3):

$$\bar{V}_c = \bar{\omega}_1 \bar{R} + \bar{\omega}_2 \cdot \bar{\rho}_c,$$

Полную скорость центра тяжести ножа с учетом теоремы косинусов определили выражением

$$V_c^2 = \dot{\varphi}^2 R^2 + (\dot{\varphi} - \dot{\alpha})^2 \rho_c^2 - 2\dot{\varphi}\dot{\alpha}R\rho_c \cos(\alpha - \varphi_1). \quad (4)$$

Раскрыв скобки в выражении (4), получили:

$$V_c^2 = \dot{\varphi}^2 R^2 + \dot{\varphi}^2 \rho_c^2 + \dot{\alpha}^2 \rho_c^2 - 2\dot{\varphi}\dot{\alpha}\rho_c^2 - 2\dot{\varphi}\dot{\alpha}R\rho_c \cos(\alpha - \varphi_1).$$

Величину угла φ_1 определили размерами битера с ножами и углом отклонения α

$$\cos \varphi_1 = \frac{R + \rho_c \cos \alpha}{\sqrt{R^2 + \rho_c^2 + R\rho_c \cos \alpha}},$$

$$\sin \varphi_1 = \frac{\rho_c \sin \alpha}{\sqrt{R^2 + \rho_c^2 + R\rho_c \cos \alpha}}.$$

Тогда кинетическую энергию системы определили выражением:

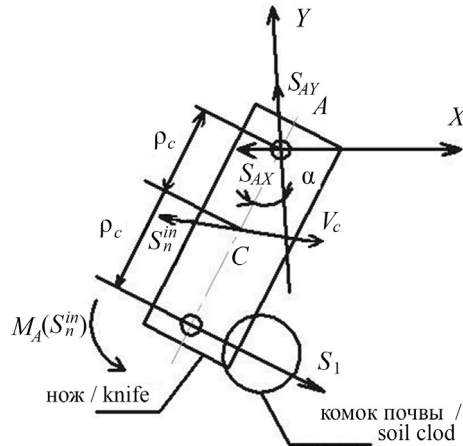
$$T = \frac{1}{4} M \dot{\varphi}^2 R^2 + \frac{1}{2} m (\dot{\varphi}^2 R^2 + \dot{\varphi}^2 \rho_c^2 + \dot{\alpha}^2 \rho_c^2 - 2\dot{\varphi}\dot{\alpha}\rho_c^2 + 2\dot{\varphi}\dot{\alpha}R\rho_c \cos(\alpha - \varphi_1)) + \frac{2}{3} m \rho_c^2 (\dot{\varphi} - \dot{\alpha})^2.$$

Вычислили частные производные от кинетической энергии по обобщенным скоростям:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = \frac{1}{2} M \dot{\varphi} R^2 + \frac{1}{2} m (2\dot{\varphi} R^2 + 2\dot{\varphi} \rho_c^2 - 2\dot{\alpha} \rho_c^2 + 2\dot{\alpha} R \rho_c \cos(\alpha - \varphi_1)) + \frac{4}{3} m \rho_c^2 (\dot{\varphi} - \dot{\alpha}),$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} = \frac{1}{2} m (2\dot{\alpha} \rho_c^2 - 2\dot{\varphi} \rho_c^2 + 2\dot{\varphi} R \rho_c \cos(\alpha - \varphi_1)) - \frac{4}{3} m \rho_c^2 (\dot{\varphi} - \dot{\alpha}).$$

Определили обобщенные ударные импульсы системы битер-нож, соответствующие обобщенным координатам. Рассмотрели отдельно удар ножа о комок почвы и ударное взаимодействие ножа с битером. Нож при ударном взаимодействии с комком почвы совершал плоскопараллельное движение (рис. 3).



Р и с. 3. Расчетная схема к исследованию ударного взаимодействия ножа с комком почвы

F i g. 3. Analytic model for the study of the impact interaction of a knife with a lump of soil

Примечание: S_{Ay} – ударный импульс реакции связи по оси O_y ; S_{Ax} – ударный импульс реакции связи по оси O_x ; S_n^{in} – ударный импульс сил инерции; S_1 – ударный импульс по комку почвы; V_c – абсолютная скорость.

Note: S_{Ay} – shock impulse of the reaction of the bond along the O_y -axis; S_{Ax} – shock impulse of the reaction of the bond along the O_x -axis; S_n^{in} – shock impulse of inertial forces; S_1 – impact pulse on a soil clod; V_c – absolute speed.

На нож, совершающий плоскопараллельное движение, на основании принципа Даламбера действуют ударный импульс сил инерции S_n^{in} и момент ударного импульса $M_A(S_n^{in})$ сил инерции относительно точки A .

$$S_n^{in} = m(V_c - V_c'),$$

$$M_A(S_n^{in}) = I_c(\omega_{21} - \omega_{21}'),$$

Где V_c и V_c' – абсолютные скорости центра тяжести C ножа до и после удара, м/с; ω_{21} , ω_{21}' – угловые скорости ножа до и после удара ($\omega_{21} = \alpha$), рад/с.

По определению коэффициент восстановления при ударе комка и нож (материал ножа) в этом случае равен $k = -\frac{V_c'}{-V_c}$, тогда угловая скорость после удара определили выражением $\omega_{21}' = k\omega_{21}$.

Ударный импульс сил инерции S_n^{in} направлен в противоположную сторону абсолютной скорости V_c . В результате ударного взаимодействия ножа и комка в шарнире A возникли ударные импульсы реакции связи S_{Ax} и S_{Ay} .

Составили уравнения механической системы с учетом принципа Даламбера

$$\begin{cases} S_{Ax} - S_1 \cos \alpha + S_n^{in} \cos(\alpha - \varphi_1) = 0 \\ S_{Ay} - S_1 \sin \alpha + S_n^{in} \sin(\alpha - \varphi_1) = 0 \\ S_1 2\rho_c + M_A(S_n^{in}) + S_n^{in} \cos(\alpha - \varphi_1) \rho_c = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Выразили величину ударного импульса сил инерции S_n^{in} из выражения (5)

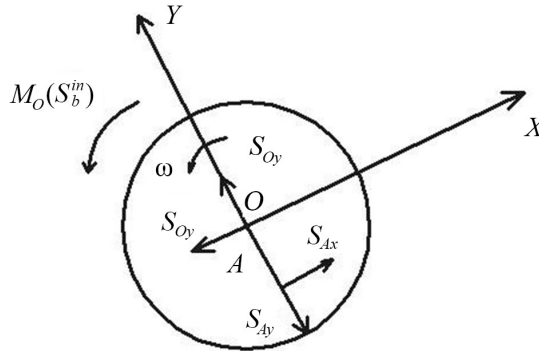
$$S_n^{in} = \frac{S_1 2\rho_c + M_A (S_n^{in})}{\rho_c \cos(\alpha - \varphi_1)}.$$

Тогда ударные импульсы реакции связи S_{Ax} и S_{Ay} определили выражениями

$$S_{Ax} = S_1 \cos \alpha - 2S_1 - \frac{M_A (S_n^{in})}{\rho_c},$$

$$S_{Ay} = -S_1 \sin \alpha + \frac{S_1 2\rho_c + M_A (S_n^{in})}{\rho_c \cos(\alpha - \varphi_1)} \sin(\alpha - \varphi_1).$$

Определили обобщенные ударные импульсы подшипников битера S_{Ox} , S_{Oy} и момент ударного импульса сил инерции битера относительно точки $OM_O (S_b^{in})$ (рис. 4).



Р и с. 4. Расчетная схема к исследованию ударного взаимодействия ножа с битером

F i g. 4. Analytic model for the study of impact interaction of a knife with a beater

Примечание: $M_O (S_b^{in})$ – момент ударного импульса сил инерции битера относительно точки O .

Note: $M_O (S_b^{in})$ – the moment of the impact impulse of the inertial forces of the beater relative to point O .

Составили уравнения механической системы с учетом принципа Даламбера

$$\begin{cases} S_{Ox} - S_{Ax} = 0 \\ S_{Oy} - S_{Ay} = 0 \\ M_O (S_n^{in}) - S_{Ax} R = 0. \end{cases}$$

Обобщенные ударные импульсы подшипников битера определили следующим выражением

$$S_{Ax} = S_1 \cos \alpha - 2S_1 - \frac{M_A (S_n^{in})}{\rho_c},$$

$$S_{Ay} = -S_1 \sin \alpha + \frac{S_1 2\rho_c + M_A (S_n^{in})}{\rho_c \cos(\alpha - \varphi_1)} \sin(\alpha - \varphi_1).$$

Момент ударного импульса сил инерции бitera $M_O(S_b^{in})$ относительно точки O определили выражением

$$M_O(S_b^{in}) = S_{Ax}R = S_1R(\cos \alpha - 2) + \frac{M_A(S_n^{in})R}{\rho_c}.$$

Вычислили обобщенные ударные импульсы как частное виртуальной работы ударного импульса на соответствующее виртуальное перемещение.

$$Q_\varphi^S = \left. \frac{\delta A^S}{\delta \varphi} \right|_{\delta \varphi=0} = \frac{S_1R\delta\varphi(\cos \alpha) - (S_n^{in} \cos(\alpha - \varphi_1))R\delta\varphi}{\delta\varphi},$$

$$Q_\alpha^S = \left. \frac{\delta A^S}{\delta \alpha} \right|_{\delta \alpha=0} = \frac{-(S_12 + S_n^{in} \cos(\alpha - \varphi_1))\rho_c \delta\alpha}{\delta\alpha}.$$

Упростив, имеем

$$Q_\varphi^S = S_1R(\cos \alpha) - (S_n^{in} \cos(\alpha - \varphi_1))R,$$

$$Q_\alpha^S = -(S_12 + S_n^{in} \cos(\alpha - \varphi_1))\rho_c.$$

Для рассматриваемой механической системы бitera-нож с двумя степенями свободы уравнения Лагранжа при ударе запишем в обобщенном виде

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = \frac{1}{2}M\dot{\varphi}R^2 + \frac{1}{2}m(2\dot{\varphi}R^2 + 2\dot{\varphi}\rho_c^2 - 2\dot{\alpha}\rho_c^2 - 2\dot{\alpha}R\rho_c \cos(\alpha - \varphi_1)) +$$

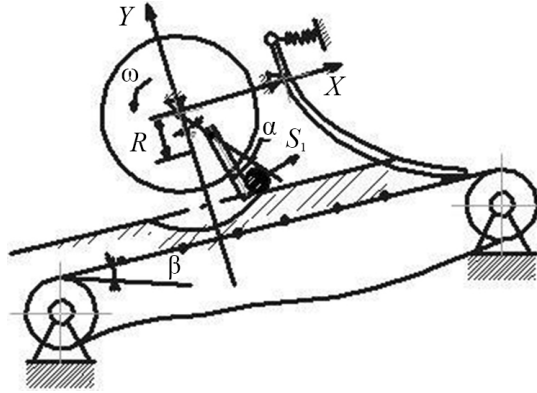
$$+ \frac{4}{3}m\rho_c^2(\dot{\varphi} - \dot{\alpha}) = S_1R(\cos \alpha) - (S_n^{in} \cos(\alpha - \varphi_1))R$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} = \frac{1}{2}m(2\dot{\alpha}\rho_c^2 - 2\dot{\varphi}\rho_c^2 - 2\dot{\varphi}R\rho_c \cos(\alpha - \varphi_1)) -$$

$$- \frac{4}{3}m\rho_c^2(\dot{\varphi} - \dot{\alpha}) = -(S_12 + S_n^{in} \cos(\alpha - \varphi_1))\rho_c.$$

Полученное уравнение для механической системы бitera-нож с двумя степенями свободы позволяет установить зависимости между параметрами системы: масса, размеры, углы поворота звеньев с изменением кинетической энергии при воздействии на почвенный пласт.

Проанализировав движение после соударения с ножом бitera, рассмотрели движение комка. На рисунке 5 показана расчетная схема удара ножа по комку почвы. Так как система бitera-нож представляет собой двойной маятник, то движение ножа очень сложно спрогнозировать, поэтому изучили случаи, в которых угол соударения ножа с почвенным комком происходит под определенным углом, обеспечивающим полет комка вверх относительно полотна сепарирующего элеватора.



Р и с. 5. Расчетная схема к исследованию удара ножа по комку почвы
 F i g. 5. Analytic model for the study of the impact of a knife on a soil clod

Примечание: β – угол наклона элеватора.
 Note: β – elevator inclination angle.

Рассмотрели геометрические параметры системы битер-нож при взаимодействии почвенным пластом, находящимся на элеваторе. Расстояние от центра битера до элеватора представили выражением

$$R + 2\rho_c + \Delta = R + 2\rho_c \cos \alpha + h,$$

где R – радиус подвеса ножей на битере, м; l – длина ножа, ($l = 2\rho_c$), м; ρ_c – расстояние от оси подвеса до центра тяжести ножа, м; h – высота почвенного пласта на элеваторе, м; Δ – величина зазора между ножом и элеватором, м.

Упростив выражение, выразили величину отклонения ножа при соприкосновении с почвенным пластом

$$\cos \alpha = 1 - \frac{h - \Delta}{l}.$$

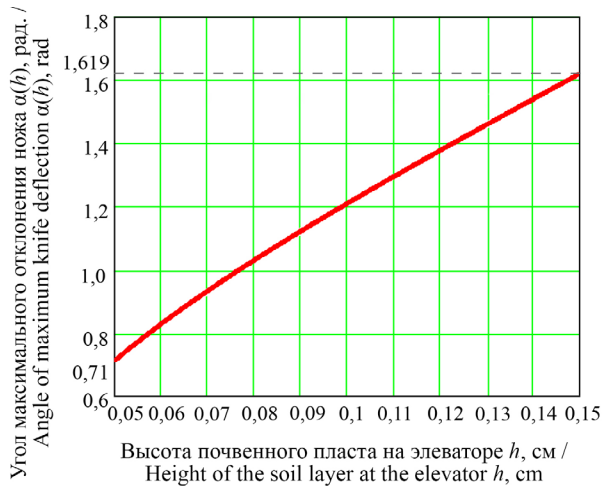
Величину угла отклонения ножа при соприкосновении с почвенным слоем определили выражением

$$\alpha = \arccos \left(1 - \frac{h - \Delta}{l} \right). \quad (6)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Учитывая полученные выражения, рассчитали отклонение ножа битера при взаимодействии с почвенными комками. Построили зависимость отклонения ножа при соприкосновении с почвенным пластом (рис. 6) в программе *Mathcad 16*.

Анализ рисунка 6 показал, что отклонение ножа при соприкосновении с почвенным пластом определяется его толщиной на элеваторе – загрузкой комкоразрушающего устройства. Также на величину отклонения оказывает угол наклона пруткового элеватора и величина центробежной силы ножа.



Р и с. 6. Зависимость угла максимального отклонения ножа от высоты почвенного пласта на элеваторе

F i g. 6. Dependence of the limit knife deflection angle on the height of the soil layer in the elevator

Примечание: $\alpha(h)$ – угол максимального отклонения ножа; h – высота почвенного пласта на элеваторе.

Note: $\alpha(h)$ – limit knife deflection angle; h – height of the soil layer at the elevator.

Источник: графики для рисунков 6, 7 составлены авторами статьи в программе *Mathcad 16*.

Source: the graphs for figures 6 and 7 were compiled by the authors of the article using the *Mathcad* program 16.

Рассмотрели предельный случай при высокой частоте вращения битера, когда нож под действием центробежной силы расположен радиально. Геометрические параметры системы битер-нож при взаимодействии пахотным слоем представили выражением

$$R + l + \Delta = (R + l) \cos \varphi_2 + h.$$

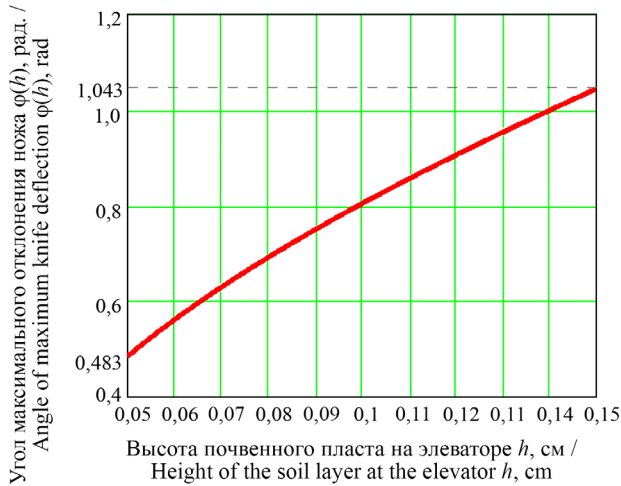
Упростив выражение, выразили величину предельного угла ножа при выходе из почвенного пласта

$$\cos \varphi_2 = \frac{R + l + \Delta - h}{R + l}. \quad (7)$$

Построили их зависимость (рис. 7).

Разработана динамическая модель системы «битер – нож» как двухстепенного двойного маятника с учетом ударного взаимодействия с почвенным пластом. На основе уравнений Лагранжа второго рода получены уравнения движения, описывающие изменение обобщенных координат (угла поворота битера и угла отклонения ножа) при ударе о почвенный комок.

Установлена количественная зависимость угла отклонения ножа α от параметров системы и условий работы. Показано, что угол отклонения определяется, прежде всего, высотой почвенного пласта на элеваторе h , т. е. загрузкой устройства, а также геометрическими параметрами ножа (длиной l и положением центра масс ρ_c) и величиной зазора Δ .



Р и с. 7. Зависимость величины предельного угла ножа от высоты почвенного пласта на элеваторе

F i g. 7. Dependence of the value of the maximum angle of the knife on the height of the soil layer on the elevator

Примечание: $\varphi(h)$ – предельный угол отклонения ножа.

Note: $\varphi(h)$ – limit knife deflection angle.

Получена и проанализирована зависимость предельного угла отклонения ножа φ^2 от высоты почвенного пласта для случая, когда нож под действием центробежной силы занимает радиальное положение. Эта зависимость имеет важное значение для определения максимально допустимой нагрузки на устройство без потери контакта ножа с комком.

На основе построенных в среде *Mathcad* графических зависимостей установлено, что ключевым фактором, управляющим процессом разрушения, является толщина обрабатываемого слоя почвы. Угол наклона элеватора и величина центробежной силы ножа выступают дополнительными регулируемыми параметрами, позволяющими оптимизировать процесс ударного воздействия для различных типов почв.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Степень разрушения комков почвы ударным барабаном зависит от физических и механических свойств почвы: влажности, плотности и размера (массы) комков.

После удара по комку почвы нож барабана расходует часть своей кинетической энергии, и его угловая скорость в абсолютном направлении становится равной нулю. Это означает, что ударный барабан будет отклоняться от своего радиального положения в направлении, противоположном вращению барабана до тех пор, пока под действием центробежных инерционных сил его скорость не станет равной нулю. Тогда его угловая скорость в абсолютном направлении будет равна скорости барабана.

Почвенный комок не вполне упругое тело, его коэффициент восстановления при ударе зависит от угловой скорости бitera и скорости комка до и после удара, которая влияет на величину ударного импульса.

Для сухих твердых почв значение коэффициента k не превышает 0,4. Для почв влажностью до 20 % $k = 0,2 \dots 0,3^3$.

Решение уравнений (6) и (7) в виде графиков зависимости угла отклонения и предельного угла ножа от высоты почвенного пласта позволяет сделать следующие выводы: при толщине $h = 5$ см почвенного пласта, поступающего на элеватор, нож бitera отклоняется на угол $\alpha = 43^\circ$, а при $h = 10$ см угол $\alpha = 68^\circ$.

Так же при толщине $h = 5$ см почвенного пласта предельный угол ножа бitera составляет $\alpha = 29^\circ$, а при $h = 10$ см предельный угол принимает значение $\alpha = 46^\circ$. Эти же данные подтверждаются и по результатам экспериментальных исследований.

По расчетам проведенных исследований получено, что рациональная длина ножа бitera $l = 170$ мм, толщина принимается $\delta = 16$ мм, что может быть использовано при проектировании новых конструкций комкоразрушающего устройства машин для подготовки почвы с учетом рекомендуемых параметров и режимов работы комкоразрушающего рабочего органа.

Полученные аналитические зависимости и модель представляют собой научную основу для инженерного расчета и проектирования комкоразрушающих устройств нового поколения. Они позволяют обоснованно выбирать рациональные геометрические (радиус барабана R , длина ножа l) и режимные (частота вращения, зазор Δ) параметры для конкретных почвенно-климатических условий.

Реализация предложенных решений на практике позволит кардинально повысить эффективность предпосадочной подготовки тяжелых комковатых почв. Это создаст необходимое условие для успешного применения высокопроизводительных картофелеуборочных комбайнов, что в итоге приведет к снижению примесей в ворохе до минимального уровня, уменьшению механического повреждения клубней, значительному росту производительности уборочных работ и снижению трудо- и энергозатрат.

Таким образом, результаты исследований вносят конкретный вклад в решение глобальной проблемы механизации уборки картофеля на сложных почвах и открывают путь к созданию ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих продовольственную безопасность и экономическую устойчивость картофелеводства в регионах с неблагоприятными почвенными условиями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дорохов А.С., Сибирёв А.В., Аксенов А.Г., Мосяков М.А., Сазонов М.В. Основы разработки автоматизированных машин для возделывания, уборки и послеуборочной обработки овощных культур и картофеля с цифровыми системами управления. *Инженерные технологии и системы*. 2022;32(1):145–173. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.145-173>
2. Гаджиев П.И., Рамазанова Г.Г., Гаджиев И.П. Разработка ресурсосберегающей технологии и технических средств для возделывания картофеля. *Наука в центральной России*. 2024;1(67):110–117. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-110-117>
3. Аксенов А.Г., Трунов М.С., Петухов С.Н. Обоснование концепции создания роботизированного комплекса для повышения эффективности фитосанитарных работ в семенных посадках картофеля. *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева*. 2023;15(4):96–105. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2023.74.49.013>

³ Гаджиев П.И., Рамазанова Г.Г. Комплекс машин для подготовки почвы к комбайновой уборке картофеля.

4. Молоканова Л.О., Рембалович Г.К., Костенко М.Ю., Шемякин А.В., Желтоухов А.А. Динамика воздействия активного встряхивателя элеватора на компоненты картофельного вороха. *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева*. 2025;17(1):143–150. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2025.72.56.020>
5. Колчин Н.Н., Пономарев А.Г., Петухов С.Н. Как снизить повреждение клубней в машинных технологиях. *Картофель и овощи*. 2019;(3):14–16. <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.48.28.002>
6. Лапин Д.А., Волченков Д.А., Гришин И.И., Нефедов Б.А. Теоретические исследования траекторий движения компонентов картофельного вороха на прутковом элеваторе уборочной машины при работе дисковых интенсификаторов. *Международный научный журнал*. 2017;(6):107–112. URL: <https://www.mmegapolis.ru/2017-1/134-vypusk-6.html> (дата обращения: 15.06.2025).
7. Lü J., Shang Q., Yang Y., Li Z., Li J., Liu Z. Design Optimization and Experiment on Potato Haulm Cutter. *Transactions of the CSAM*. 2016;47(5):106–114. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.015>
8. Starovoitov S.I., Grin A.M. Plough Hull for Precision Tillage. In: XV International Scientific Conference «Interagromash 2022». Rostov-na-Donu: Springer Nature Switzerland (Zug); 2023. p. 425–432. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-21432-5>
9. Dongre A.U., Battase R., Dudhale S., Patil V.R., Chavan D. Development of Potato Harvesting Model. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017;4(10):1567–1570. URL: <https://www.irjet.net/volume4-issue10> (дата обращения: 25.05.2025).
10. Старовойтов С.И., Чемисов Н.Н. К определению модуля упругости почвы. *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина»*. 2011;(1):39–41. <https://www.elibrary.ru/rassxd>
11. Старовойтова О.А., Старовойтов В.И., Манохина А.А., Духанина С.М. Физико-механические параметры почвы при выращивании картофеля на грядах. *Земледелие*. 2018;(5):16–20. <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2018-10504>
12. Старовойтов С.И., Старовойтова Н.П., Чемисов Н.Н. О крошении суглинистой почвы. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2014;(3):30–34. <https://www.elibrary.ru/siwanx>
13. Mak J., Chen Y., Sadek M.A. Determining Parameters of a Discrete Element Model for Soil-Tool Interaction. *Soil and Tillage Research*. 2012;(118):117–122. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.019>
14. Obermayr M., Dressler K., Vrettos C., Eberhard P. Prediction of Draft Forces in Cohesionless Soil with the Discrete Element Method. *Journal of Terramechanics*. 2011;48(5):347–358. <https://doi.org/10.1016/J.JTERRA.2011.08.003>
15. Пшеченков К.А., Мальцев С.В., Смирнов А.В. Технология комбайновой уборки картофеля на суглинистых почвах в центральном регионе России. *Картофель и овощи*. 2018;(4):19–21. URL: <http://potatoveg.ru/arxiv> (дата обращения: 27.05.2025).
16. Гаджиев П.И., Рамазанова Г.Г., Гаджиев И.П. Способ возделывания картофеля на тяжелых и каменистых почвах. *Техника и оборудование для села*. 2024;(2):16–18. <https://www.elibrary.ru/olhrdv>
17. Гаджиев П.И., Рамазанова Г.Г., Байбобоев Н.Г., Абдуалиев М.Х., Гаджиев И.П. Анализ работ в области динамической нагруженности комкоразрушающих барабанов от взаимодействия с почвой. *Техника и оборудование для села*. 2025;(3):22–28. <https://www.elibrary.ru/atauwq>
18. Успенский И.А., Юхин И.А., Мачнев А.В., Голиков А.А. Формирование комплекса картофелеуборочных и транспортных машин. *Техника и оборудование для села*. 2021;(2):27–31. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-27-31>
19. Zhou J.G., Gao Z.N., Chen J., Yang S.M., Li M.Q., Chen Z. и др. Design and Experiment of a Self-Propelled Crawler-Potato Harvester for Hilly and Mountainous Areas. *Inmateh Agricultural Engineering*. 2021;(2):151–158. <https://doi.org/10.35633/inmateh-64-14>
20. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Шогенов Ю.Х. Интенсивные машинные технологии, роботизированная техника и цифровые системы для производства основных

- групп сельскохозяйственной продукции. *Техника и оборудование для села*. 2018;(7):2–7. <https://www.elibrary.ru/uuufbg>
21. Дорохов А.С., Сибирёв А.В., Аксенов А.Г., Мосяков М.А., Сазонов Н.В. Математическая модель определения показателей качества энерго-ресурсосберегающей технологии уборки корнеплодов и картофеля в условиях повышенной влажности почвы. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2023;(2):78–83. <https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/2/78-83>
 22. Дорохов А.С., Ерохин М.Н., Сибирёв А.В., Мосяков М.А. Энергия разрушения почвенных комков сепарирующим рабочим органом в зависимости от физико-механических свойств почвы. *Агроинженерия*. 2024;26(4):4–12. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-4-12>
 23. Бызов В.А., Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Щеголихина Т.А., Манохина А.А. Оптимизация подготовки почвы при возделывании топинамбура. *Техника и оборудование для села*. 2025;(1):22–26. <https://www.elibrary.ru/ukxjsu>
 24. Яруллин Ф.Ф., Ибятков Р.И., Абдуллин Р.Ф., Хазиев А.А. Результаты экспериментальных исследований дискового рабочего органа в почвенном канале. *Техника и оборудование для села*. 2024;(9):12–16. <https://www.elibrary.ru/nvhmed>
 25. Сибирёв А.В., Мосяков М.А., Сазонов Н.В., Мансуров А.П., Лобачевский Я.П. Энергосберегающая технология уборки корнеплодов и картофеля. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2024;(4):107–112. <https://doi.org/10.31857/S2500208224040216>
 26. Рамазанова Г.Г., Костенко М.Ю., Гаджиев П.И., Махмутов М.М., Гаджиев И.П., Махмутов М.М. и др. Комкоразрушающее устройство машины для подготовки почвы к комбайновой уборке картофеля. Патент 2834386 С1. Российская Федерация. 6 февраля 2025. <https://www.elibrary.ru/apjmnc>

REFERENCES

1. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A., Sazonov M.V. Basis of Developing Automated Machines with Digital Control Systems for Cultivating, Harvesting and Postharvest Processing of Vegetable Crops and Potatoes. *Engineering technologies and systems*. 2022;32(1):145–173. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.145-173>
2. Gadzhiev P.I., Ramazanova G.G., Gadzhiev I.P. Development of Resource-Saving Technology and Technical Means for Potato Cultivation. *Science in the Central Russia*. 2024;1(67):110–117. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-110-117>
3. Aksenov A.G., Trunov M.S., Petukhov S.N. Justification of the Concept of Creating a Robotic Complex to Improve the Efficiency of Phytosanitary Work in Potato Seed Plantings. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev*. 2023;15(4):96–105. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36508/RSATU.2023.74.49.013>
4. Molokanova L.O., Rembalovich G.K., Kostenko M.Y., Shemyakin A.V., Zheltoukhov A.A. Dynamics of the Impact of an Active Elevator Shaker on the Components of a Potato Heap. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev*. 2025;17.(1):143–150. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36508/RSATU.2025.72.56.020>
5. Kolchin N.N., Ponomarev A.G., Petukhov S.N. How to Reduce Potato Tubers Damaging Under Machine Technologies. *Potato and Vegetables*. 2019;(3):14–16. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.48.28.002>
6. Lapin D.A., Volchenkov D.A., Grishin I.I., Nefedov B.A. Theoretical Study of the Trajectories of the Components of the Potato Heap Bar the Elevator of the Harvesting Machine When the Disk Modulators. *International Scientific Journal*. 2017;(6):107–112. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.mmegapolis.ru/2017-1/134-vypusk-6.html> (accessed 15.06.2025).
7. Lü J., Shang Q., Yang Y., Li Z., Li J., Liu Z. Design Optimization and Experiment on Potato Haulm Cutter. *Transactions of the CSAM*. 2016;47(5):106–114. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.015>

8. Starovoitov S.I., Grin A.M. Plough Hull for Precision Tillage. In: XV International Scientific Conference “Interagromash 2022”. Rostov-na-Donu: Springer Nature Switzerland (Zug); 2023. p. 425–432. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-21432-5>
9. Dongre A.U., Battase R., Dudhale S., Patil V.R., Chavan D. Development of Potato Harvesting Model. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017;4(10):1567–1570. Available at: <https://www.ijret.net/volume4-issue10> (accessed 25.05.2025).
10. Starovoitov S.I., Chemisov N.N. On Determining Soil Elasticity Module. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education “Moscow State Agroengineering University Named After V. P. Goryachkin”*. 2011;1(46):39–41. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/rassxd>
11. Starovoitova O.A., Starovoitov V.I., Manokhina A.A., Dukhanina S.M. Physical and Mechanical Parameters of Soils at the Cultivation of Potato in Ridges. *Zemledelie*. 2018;(5):16–20. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2018-10504>
12. Starovoitov S.I., Starovoitova N.P., Chemisov N.N. [On the Crumbling Gofloamy Soil]. *Agricultural Machinery and Technology*. 2014;(3):30–34. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/siwanx>
13. Mak J., Chen Y., Sadek M.A. Determining Parameters of a Discrete Element Model for Soil-Tool Interaction. *Soil and Tillage Research*. 2012;(118):117–122. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.019>
14. Obermayr M., Dressler K., Vrettos C., Eberhard P. Prediction of Draft Forces in Cohesionless Soil with the Discrete Element Method. *Journal of Terramechanics*. 2011;48(5):347–358. <https://doi.org/10.1016/J.JTERRA.2011.08.003>
15. Pshechenkov K.A., Maltsev S.V., Smirnov A.V. Technology of Potatoes Combine Harvesting on Loamy Soils in the Central Region of Russia. *Potato and Vegetables*. 2018;(4):19–21. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://potatoveg.ru/arxivy> (accessed 27.05.2025).
16. Gadzhiev P.I., Ramazanova G.G., Gadzhiev I.P. Method of Cultivating Potatoes on Heavy and Rocky Soils. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024;2(320):16–18. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/olhrdv>
17. Gadzhiev P.I., Ramazanova G.G., Baiboboev N.G., Abdualiev M.Kh., Gadzhiev I.P. Analysis of Dynamic Loading of Lump-Crushing Drums as a Result Of Interaction with Soil. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2025;(3):22–28. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/atauwq>
18. Uspensky I.A., Yukhin I.A., Machnev A.V., Golikov A.A. Creating an Integrated System of Potato Harvesters and Transport Vehicles *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;(2):27–31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-27-31>
19. Zhou J.G., Gao Z.N., Chen J., Yang S.M., Li M.Q., Chen Z., et al. Design and Experiment of a Self-Propelled Crawler-Potato Harvester for Hilly and Mountainous Areas. *Inmateh Agricultural Engineering*. 2021;(2):151–158. <https://doi.org/10.35633/inmateh-64-14>
20. Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Shogenov Yu.Kh. Intensive Machine Technologies, Robotized Equipment and Digital Systems for Production of Main Groups of Agricultural Products. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2018;(7):2–7. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/uufvbg>
21. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A., Sazonov N.V. Mathematical Model of Indicators Determination of Quality Root Crops Harvesting and Potato Energy Saving Technology in High Humidity Soil Condition. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2023;(2):78–83. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/2/78-83>
22. Dorokhov A.S., Erokhin M.N., Sibirev A.V., Mosyakov M.A. Energy of Soil Clod Crushing with a Separating Working Tool, Depending on Physical and Mechanical Properties of the Soil. *Agricultural Engineering*. 2024;26(4):4–12. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-4-12>
23. Byzov V.A., Starovoytov V.I., Starovoytova O.A., Shchegolihina T.A., Manokhina A.A. Optimization of Soil Preparation for Jerusalem Artichoke Cultivation. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2025;(1)22–26. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/ukxjsu>

24. Yarullin F.F., Ibyatov R.I., Abdullin R.F., Khaziev A.A. Results of Experimental Studies of a Disk Working Body in a Soil Channel. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024;(9):12–16. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/nvhmed>
25. Sibirev A.V., Mosyakov M.A., Sazonov N.V., Mansurov A.P., Lobachevsky Ya.P. Energy Saving Technology for Harvesting Root Crops and potatoes. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2024;(4):107–112. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S2500208224040216>
26. Ramazanova G.G., Kostenko M.Y., Gadzhiev P.I., Makhmutov M.M., Gadzhiev I.P., Makhmutov M.M., et al. Clod Breaking Device of Machine for Soil Preparation for Combine Harvesting of Potatoes. Patent 2834386 C1 Russian Federation. 2025 February 6. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/apjmnc>

Об авторах:

Успенский Иван Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической эксплуатации транспорта Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Scopus ID: 57193743041, Researcher ID: B-7990-2019, ivan.uspensckij@yandex.ru

Рамазанова Гюльбике Гудретдиновна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологического развития систем жизнеобеспечения сельских территорий Российского государственного университета народного хозяйства имени В. И. Вернадского (143907, Российская Федерация, г. Балашиха, ул. Шоссе Энтузиастов, д. 50), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2758-9479>, Scopus ID: 56072031000, Researcher ID: CPQ-5874-2022, gulbike@yandex.ru

Костенко Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии металлов и ремонта машин Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3733-3717>, Researcher ID: G-9926-2019, km340010@rambler.ru

Гаджиев Парвиз Имранович, доктор технических наук, профессор, декан факультета информационного и технического сервиса Российского государственного университета народного хозяйства имени В. И. Вернадского (143907, Российская Федерация, г. Балашиха, ул. Шоссе Энтузиастов, д. 50), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6877-6126>, Researcher ID: DNC-7890-2022, pgadjiev@yandex.ru

Вклад авторов:

И. А. Успенский – формулирование замысла/идеи исследования, целей и задач.

Г. Г. Рамазанова – деятельность по аннотированию (созданию метаданных), очистке данных и поддержанию их целостности (включая программный код для интерпретации, где это необходимо) для первоначального и повторного использования.

М. Ю. Костенко – разработка математической зависимости, критический анализ полученных результатов.

П. И. Гаджиев – разработка или проектирование методологии исследования; создание моделей.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 15.06.2025; поступила после рецензирования 28.10.2025;
принята к публикации 19.11.2025*

About the authors:

Ivan A. Uspenskiy, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Technical Operation of Transport, Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Scopus ID: 57193743041, Researcher ID: B-7990-2019, ivan.uspenskiy@yandex.ru

Gulbike G. Ramazonova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technological Development of Life Support Systems in Rural Areas, Vernadsky Russian State University of National Economy (50 Jentuziastov Highway St., Balashikha 143907, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2758-9479>, Scopus ID: 56072031000, Researcher ID: CPQ-5874-2022, gulbike@yandex.ru

Mikhail Yu. Kostenko, Dr.Sci. (Eng.), Professor of Metal Technology and Machine Repair Chair, Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3733-3717>, Researcher ID: G-9926-2019, km340010@rambler.ru

Parviz I. Gadzhiev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Dean of the Information and Technical Service Faculty, Vernadsky Russian State University of National Economy (50 Jentuziastov Highway St., Balashikha 143907, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6877-6126>, Researcher ID: DNC-7890-2022, pgadjiev@yandex.ru

Authors contribution:

I. A. Uspenskiy – formulating the study concept/idea, goals, and objectives.

G. G. Ramazonova – annotating (creating metadata), data cleaning, and maintaining the data integrity (including interpretive code, where necessary) for their initial using and reusing.

M. Y. Kostenko – developing the mathematical relationship, critical analyzing of the results obtained.

P. I. Gadzhiev – developing or designing of the study methodology; creating models.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 15.06.2025; revised 28.10.2025; accepted 19.11.2025