

АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
AGROENGINEERING AND FOOD TECHNOLOGIES**Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса**
Technologies, Machines and Equipment for the Agro-industrial Complex

Научная статья

УДК 631.31

doi: 10.55196/2411-3492-2025-1-47-41-47

**Исследование процесса взаимодействия рабочих органов
почвообрабатывающих орудий с почвой****Расул Алимович Апажев¹, Юрий Ахметханович Шекихачев^{✉2}**Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, проспект
Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030¹apazhev97@mail.ru^{✉2}shek-fmep@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6300-0823>

Аннотация. Механическая обработка почвы наряду с системой севооборотов, удобрения, защиты посевов от сорняков, вредителей и болезней является одним из важнейших звеньев любой системы земледелия. Во все времена обработка почвы была и остается одним из наиболее энергоемких и дорогих процессов в земледелии. По разным подсчетам сегодня в среднем на него приходится 40% энергетических и 25% трудовых затрат общего объема полевых работ. Современные требования к почвообрабатывающим орудиям требуют создания их на базе технологий, предусматривающих максимальную адаптацию к технологическому процессу с учетом конкретных почвенно-климатических условий работы. Основная цель при этом состоит в обеспечении необходимых показателей качества разрыхления, под которыми, прежде всего, понимают получение почвенных агрегатов определенного размера и улучшение технико-экономических результатов работы. Обеспечить получение на проектом этапе с достаточной долей вероятности именно необходимого размера агрегатов возможно при условии максимально полно разработанной математической модели взаимодействия рабочей поверхности орудия с обрабатываемой средой. Это, прежде всего, предполагает наличие математических моделей почвы и самого рабочего органа. Исследования базируются на методах физического и математического моделирования, сравнения. В качестве объекта исследования использовано плужное почвообрабатывающее орудие. Результаты расчетов параметров процесса взаимодействия рабочих органов почвообрабатывающих орудий с почвой обработаны с помощью пакета прикладных программ «STATISTICA-5.0». В результате проведенного исследования установлена зависимость перемещения носка лемеха от начала движения до момента откалывания призмы почвы от характеристик обрабатываемой почвы и параметров рабочего органа почвообрабатывающего орудия.

Ключевые слова: почва, обработка, энергоемкость, почвообрабатывающие орудия, параметры, режим работы, моделирование

Для цитирования. Апажев Р. А., Шекихачев Ю. А. Исследование процесса взаимодействия рабочих органов почвообрабатывающих орудий с почвой // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова 2025. № 1(47). С. 41–47. doi: 10.55196/2411-3492-2025-1-47-41-47

Original article

Study of the process of interaction of working organs of soil cultivation tools with soil

Rasul A. Apazhev¹, Yuri A. Shekikhachev^{✉2}

Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, 1v Lenin Avenue, Nalchik, Russia, 360030

¹apazhev97@mail.ru

^{✉2}shek-fmep@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6300-0823>

Abstract. Mechanical tillage along with crop rotation system, fertilization, crop protection from weeds, pests and diseases is one of the most important links in any farming system. At all times, tillage has been and remains one of the most energy-intensive and expensive processes in agriculture. According to various estimates, today it accounts for an average of 40% of energy and 25% of labor costs of the total volume of field work. Modern requirements for tillage implements require their creation on the basis of technologies that provide for maximum adaptation to the technological process, taking into account specific soil and climatic conditions of work. The main goal is to ensure the necessary indicators of the quality of loosening, which, first of all, mean obtaining soil aggregates of a certain size and improving the technical and economic results of the work. Ensuring the receipt of the required size of aggregates at the design stage with a sufficient degree of probability is possible under the condition of the most fully developed mathematical model of the interaction of the working surface of the tool with the processed environment. This, first of all, presupposes the presence of mathematical models of the soil and the working element itself. The studies are based on the methods of physical and mathematical modeling, comparison. A plow tillage implement was used as an object of study. The results of calculating the parameters of the process of interaction of the working elements of tillage implements with the soil were processed using the STATISTICA-5.0 software package. As a result of the conducted study, the dependence of the movement of the ploughshare tip from the start of the movement to the moment of breaking off the soil prism on the characteristics of the cultivated soil and the parameters of the working body of the tillage tool was established.

Keywords: soil, cultivation, energy intensity, tillage tools, parameters, operating mode, modeling

For citation. Apazhev R.A., Shekikhachev Yu.A. Study of the process of interaction of the working organs of soil cultivation tools with soil. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2025;1(47):41–47. (In Russ.). doi: 10.55196/2411-3492-2025-1-47-41-47

Введение. Исследование почвообрабатывающих рабочих органов и машин на их основе представляет собой достаточно сложную задачу. Сложность аналитического исследования обусловлена прежде всего многофакторностью описываемых процессов и их вероятностным характером. Отсутствие четкой математической модели, в свою очередь, затрудняет расчет и проектирование машины. Как следствие, основная доля отработки конструктивных параметров приходится на полевые и лабораторные испытания [1–4].

Современные требования к почвообрабатывающим орудиям требуют создания их на базе технологий, предусматривающих максимальную адаптацию к технологическому процессу с учетом конкретных почвенно-

климатических условий работы. Основная цель при этом состоит в обеспечении необходимых показателей качества разрыхления, под которыми прежде всего понимают получение почвенных агрегатов определенного размера и улучшение технико-экономических результатов работы [5–10].

Обеспечить получение на проектном этапе с достаточной долей вероятности именно необходимого размера агрегатов возможно при условии максимально полно разработанной математической модели взаимодействия рабочей поверхности орудия с обрабатываемой средой. Это прежде всего предполагает наличие математических моделей почвы и самого рабочего органа [11].

Цель исследования – установление параметров процесса взаимодействия рабочих органов почвообрабатывающих орудий с почвой.

Материалы, методы и объекты исследования. Исследования базируются на методах физического и математического моделирования, сравнения. В качестве объекта исследования использовано плужное почвообрабатывающее орудие. Результаты расчетов параметров процесса взаимодействия рабочих органов почвообрабатывающих орудий с почвой обработаны с помощью пакета прикладных программ «STATISTICA-5.0».

Результаты исследования. Схематически процесс взаимодействия орудия произвольной геометрической формы с почвой можно разделить на три этапа:

- подрезка и отделение от общего массива слоя почвы;
- разрыхление отделенной части;
- укладка разрыхленного слоя.

Характер протекания указанных процессов зависит как от конструктивных и кинематических параметров орудия, так и от свойств обрабатываемой среды.

Практически любое почвообрабатывающее орудие можно представить как систему с определенным образом ориентированными в пространстве элементарными лемехами. Поэтому основные принципы взаимодействия с почвой такого лемеха можно при определенных условиях перенести на реальное орудие.

В процессе движения лемеха в почве образуются линии скальвания (трещины), которые распространяются вперед по ходу и бокам.

Продольно-вертикальная плоскость. На начальном этапе, когда образующееся лезвием силовое поле еще не рассеяно, действует закон наибольшего касательного напряжения, и линии скальвания удлиняются под углом $90^\circ + \varphi_1$, где φ_1 – угол внешнего трения. Далее, с увеличением расстояния от лезвия, силовое поле уменьшается, и действие угла внутреннего трения φ_2 становится приоритетным. Линия скальвания удлиняется под углом $90^\circ + \varphi_2$. Учитывая то, что коэффициент внешнего трения для почвы больше коэффициента внешнего трения по стали, картина отделения почвенных призм примет вид, приведенный на рисунке 1.

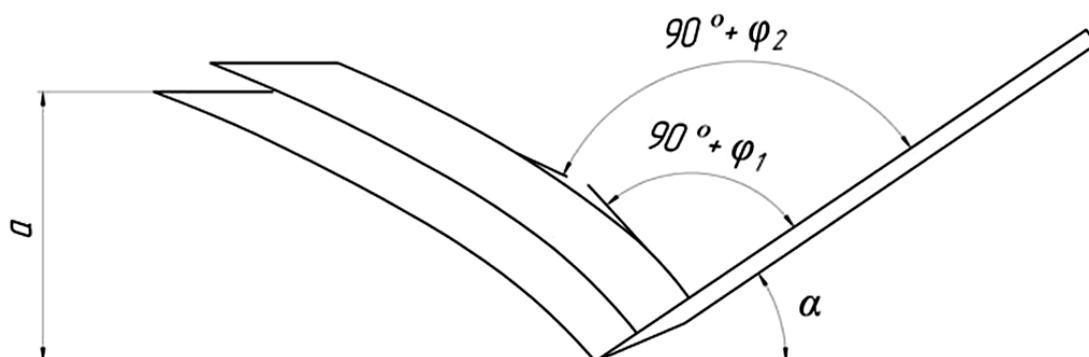


Рисунок 1. Теоретическое удлинение линий скальвания в продольно-вертикальной плоскости:
 a – глубина хода лемеха; α – угол атаки лемеха

Figure 1. Theoretical elongation of the shear lines in the longitudinal-vertical plane:
 a – depth of the ploughshare stroke; α – angle of attack of the ploughshare

Однако, как показала практика, поправкой, учитывающей начальный этап, можно пренебречь и считать, что линия скальвания с самого начала удлиняется под углом $90^\circ + \varphi_2$ (рис. 2а).

Поперечно-вертикальная плоскость. Удлинение линий скальвания в этой плоскости

носит несколько иной характер. Отделение стружки от почвенного массива происходит под углом внутреннего трения к вертикали, но только до глубины, получившей название критической (рис. 2б).

Последующее углубление лемеха образует профиль новой формы (рис. 3).

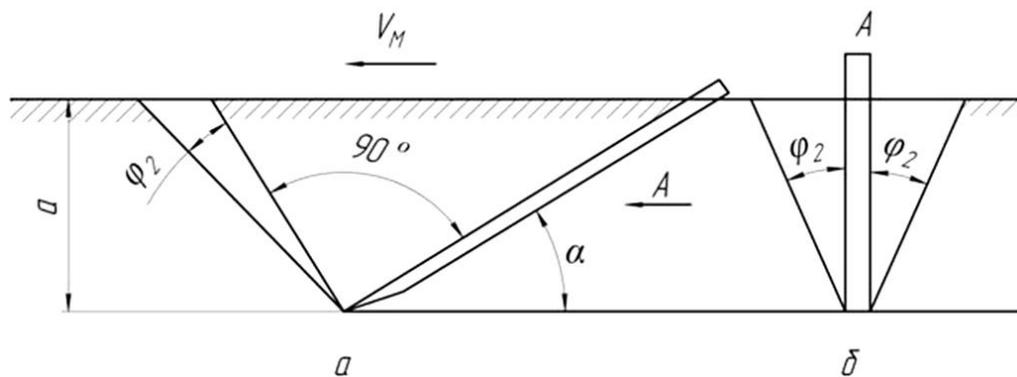


Рисунок 2. Удлинение линий скалывания в почве от элементарного лемеха
Figure 2. Extension of shear lines in soil from an elementary ploughshare

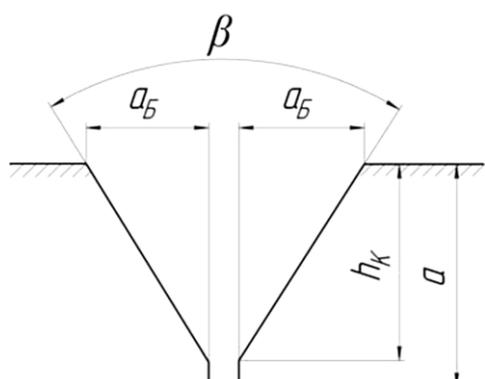


Рисунок 3. Профиль борозды в поперечно-вертикальной плоскости: a – глубина хода; h_K – критическая глубина; a_B – дальность удлинения в поперечно-вертикальной плоскости; β – угол распространения

Figure 3. Furrow profile in the transverse-vertical plane: a – depth of movement; h_K – critical depth; a_B – extension range in the transverse-vertical plane; β – propagation angle

Основные параметры профиля связаны между собой зависимостью:

$$h_K = \frac{a_B \cos(\beta - i + \varphi_1)}{\mu \cos\left(\frac{\beta - i + \varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)}, \quad (1)$$

где

i – угол заострения лезвия, град;
 $\mu = 0,95$.

Для определения расстояния между двумя последовательными линиями скалывания рассмотрим расчетную схему (рис. 4).

Первоначальное положение лемеха характеризуется точкой с координатами X_0, Y_0 и углом наклона лемеха α .

Вырежем по оси лемеха бесконечно тонкий слой почвы и рассмотрим физику происходящих процессов.

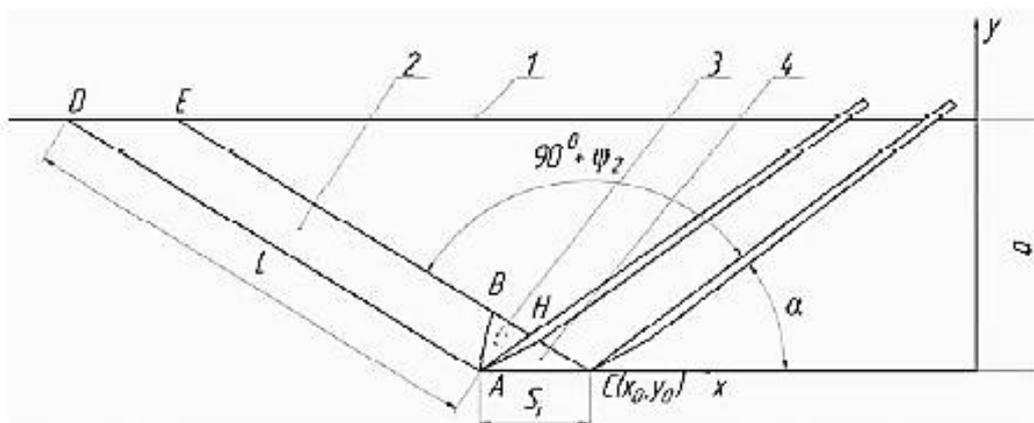


Рисунок 4. Расчетная схема для определения расстояния между двумя последовательными линиями скалывания: 1 – уровень поверхности почвы; 2 – зона упругой деформации; 3 – зона пластической деформации; 4 – изменяющийся участок

Figure 4. Calculation scheme for determining the distance between two consecutive shear lines: 1 – soil surface level; 2 – elastic deformation zone; 3 – plastic deformation zone; 4 – changing section

С началом движения сминается зона 4 почвы до момента скалывания, после чего начинается сдвиг сколотой части. Для удлинения линии скалывания нужно преодолеть силу сцепления частиц:

$$T_i = C_i F_c, \quad (2)$$

где

C_i – удельное сцепление частиц, кН/м²;

F_c – площадь скалывания, м²,

$$F_c = Ldz = \frac{a}{\cos(\alpha + \varphi_2)}, \quad (3)$$

где

L – длина линии скалывания, м;

dz – ширина вырезанного слоя почвы, м;

a – глубина обработки почвы, м;

φ_2 – угол внутреннего трения, град.

Сколотая призма почвы имеет две зоны: зону 3 пластической деформации и зону 2 упругой деформации. Скалывание происходит за счет высвобождения энергии упругой деформации, накопление энергии упругой деформации – за счет передачи усилия от лемеха в зону 2 через зону 3. С достаточной для расчетов точностью можно считать, что условие скалывания составит:

$$T_i = T_{ABH},$$

где

T_{ABH} – сила смятия участка ABH .

Сжатие участка AHC можно считать изотропным до момента скалывания и начала движения сколотой части. Процесс изотропного сжатия характеризуется модулем объемного сжатия:

$$K_v = \frac{\sigma}{\Delta V/V},$$

где

σ – напряжение, кН/м²;

ΔV – величина, на которую уменьшается объем среды, м³;

V – начальный объем среды, м³.

Модуль объемного смятия можно вычислить по формуле:

$$K_v = \frac{E}{3(1-2\nu)},$$

где

E – модуль упругости, Н/м²;

ν – коэффициент Пуассона.

Из расчетной схемы (рис. 4) по теореме синусов вычисляем, что:

$$AH = \frac{S_l \cos(\alpha + \varphi_2)}{\cos \varphi_2},$$

где

S_l – перемещение носка лемеха от начала движения до момента откалывания призмы почвы, м.

Образующееся напряжение по линии AB будет равно:

$$\sigma = \frac{T_l}{|AH|dz} = \frac{T_l \cos \varphi_2}{S_l \cos(\alpha + \varphi_2) dz}, \quad (4)$$

где

dz – толщина вырезанного слоя почвы, м.

С другой стороны, возникающее напряжение представим как:

$$\sigma = \frac{T_l}{|AH|dz} = \frac{T_l \cos \varphi_2}{S_l \cos(\alpha + \varphi_2) dz}, \quad (5)$$

где

$\varepsilon_v = \Delta V/V$ – коэффициент объемной деформации.

Подставив в уравнение (4) значения формул (2), (3) и (5), получаем, что:

$$K_v \varepsilon_v = \frac{a C_i \cos \varphi_2}{S_l \cos^2(\alpha + \varphi_2)}. \quad (6)$$

Окончательно получим:

$$S_l = \frac{a C_i \cos \varphi_2}{\cos^2(\alpha + \varphi_2) K_v \varepsilon_v}. \quad (7)$$

Вывод. В результате проведенного исследования установлена зависимость перемещения носка лемеха от начала движения до момента откалывания призмы почвы от характеристик обрабатываемой почвы и параметров рабочего органа почвообрабатывающего орудия.

Список литературы

1. Мисиров М. Х., Егожев А. А., Алиев Н. А. Обоснование конструктивных элементов рабочих органов почвообрабатывающих фрез // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2023. № 3(41). С. 113–122. DOI: 10.55196/2411-3492-2023-3-41-113-122. EDN: IGDBTF
2. Мисиров М. Х., Егожев А. А. Некоторые особенности обработки почв режущим клином // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2022. № 3(37). С. 130–137. DOI: 10.55196/2411-3492-2022-3-37-130-137. EDN: LOYWPO
3. Апажев А. К., Егожев А. М., Егожев А. А. Обоснование конструктивно-технологических параметров рабочего органа фрезы для обработки почвы вокруг штамба дерева в условиях террасы // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2022. № 2(36). С. 68–76. DOI: 10.55196/2411-3492-2022-2-36-68-76. EDN: WNHGRE
4. Шекихачева Л. З. Научно обоснованные принципы почвозащитной системы земледелия // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2021. № 4(34). С. 86–90. EDN: MNBAAL
5. Хажметова А. Л., Карданов Р. А., Хажметов Л. М. К вопросу совершенствования машин для обработки приствольных полос плодовых насаждений в террасном садоводстве // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2021. № 2(32). С. 89–94. EDN: PBNNCW
6. Апажев А. К., Шекихачев Ю. А., Хажметов Л. М. Рациональные параметры и режимы работы комбинированного почвообрабатывающего шлейфа // Известия Горского государственного аграрного университета. 2016. Т. 53. № 2. С. 146–151. EDN: WCFZUP
7. Теоретическое обоснование конструктивно-режимных параметров агрегата для обработки междурядий и приствольных полос плодовых насаждений / А. Л. Хажметова, А. К. Апажев, Ю. А. Шекихачев, Л. М. Хажметов, А. Г. Фиапшев, В. С. Курасов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2019. № 151. С. 232–243. DOI: 10.21515/1990-4665-151-020. EDN: FBQERM
8. Оптимизация параметров и режимов работы фрезерного рабочего органа агрегата для обработки междурядий и приствольных полос плодовых насаждений / А. Л. Хажметова, А. К. Апажев, Ю. А. Шекихачев, Л. М. Хажметов, А. Г. Фиапшев // АгроЭкоИнфо. 2019. № 3(37). С. 37. EDN: GEURAH
9. Оптимизация параметров и режимов работы пахотно-фрезерного агрегата по критерию минимума тягового сопротивления / Х. Х. Ашабоков, А. К. Апажев, Ю. А. Шекихачев, Л. М. Хажметов, А. Г. Фиапшев // АгроЭкоИнфо. 2019. № 2 (36). С. 32. EDN: ERCQEK
10. Оптимизация параметров и режимов работы фрезерного рабочего органа агрегата для обработки междурядий и приствольных полос плодовых насаждений / А. Л. Хажметова, А. К. Апажев, Ю. А. Шекихачев, Л. М. Хажметов, А. Г. Фиапшев, В. С. Курасов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2019. № 153. С. 159–169. DOI: 10.21515/1990-4665-153-018. EDN: LBSJWW
11. Моделирование процесса работы агрегата для обработки междурядий и приствольных полос плодовых насаждений / А. Л. Хажметова, А. К. Апажев, Ю. А. Шекихачев, Л. М. Хажметов, А. Г. Фиапшев // АгроЭкоИнфо. 2019. № 2 (36). С. 29. EDN: OEGCIR

References

1. Misirov M.Kh., Egozhev A.A., Aliev N.A. Justification of the structural elements of the working bodies of the tilling cutter. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2023;3(41):113–122. (In Russ.). DOI: 10.55196/2411-3492-2023-3-41-113-122. EDN: IGDBTF
2. Misirov M.H., Egozhev A.A. Some features of soil cultivation with a cutting wedge. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2022;3(37):130–137. (In Russ.). DOI: 10.55196/2411-3492-2022-3-37-130-137. EDN: LOYWPO
3. Apazhev A.K., Egozhev A.M., Egozhev A.A. Substantiation of the design and technological parameters of the working body of the cutter for tillage around the tree stem in a terrace. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2022;2 (36):68–76. (In Russ.). DOI: 10.55196/2411-3492-2022-2-36-68-76. EDN: WNHGRE
4. Shekihacheva L.Z. Scientifically based principles of soil protection system of agriculture. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2021;4(34):86–90. (In Russ.). EDN: MNBAAL

5. Khazhmetova A.L., Kardanov R.A., Khazhmetov L.M. The issue of improving machines for processing trunk strips of fruit plantations in terrace gardening. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2021;2(32):89–94. (In Russ.). EDN: PBNNCW

6. Apazhev A.K., Shekihachev Yu.A., Khazhmetov L.M. Rational parameters and operating modes of the combined soil-cultivating planer. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2016;53(2):146–151. (In Russ.). EDN: WCFZUP

7. Khazhmetova A.L., Apazhev A.K., Shekihachev Yu.A., Khazhmetov L.M., Fiapshev A.G., Kurasov V.S. Theoretical justification of constructive and regime parameters of the unit for processing of row-spacings and trunk strips of fruit plantings. *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University*. 2019;(151):232–243. (In Russ.). DOI: 10.21515/1990-4665-151-020. EDN: FBQERM

8. Khazhmetova A.L., Apazhev A.K., Shekihachev Yu.A., Khazhmetov L.M., Fiapshev A.G. Optimizacija parametrov i rezhimov raboty frezernogo rabocheho organa agregata dlja obrabotki mezhdurjadij i pristvol'nyh polos plodovyh nasazhdenij. *AgroEkoInfo*. 2019;3(37):37. (In Russ.). EDN: GEURAH

9. Ashabokov Kh.Kh., Apazhev A.K., Shekihachev Yu.A., Khazhmetov L.M., Fiapshev A.G. Optimizacija parametrov i rezhimov raboty pahotno-frezernogo agregata po kriteriju minimuma tjagovogo soprotivlenija. *AgroEkoInfo*. 2019;2(36):32. (In Russ.). EDN: ERCQEK

10. Khazhmetova A.L., Apazhev A.K., Shekihachev Yu.A., Khazhmetov L.M., Fiapshev A.G., Kurasov V.S. Optimization of parameters and working hours of milling working body of the unit for processing of row-spacings and space around fruit plantings. *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University*. 2019;(153):159–169. (In Russ.). DOI: 10.21515/1990-4665-153-018. EDN: LBSJWW

11. Khazhmetova A.L., Apazhev A.K., Shekihachev Yu.A., Khazhmetov L.M., Fiapshev A.G. Modelirovanie processa raboty agregata dlja obrabotki mezhdurjady i pristvol'nyh polos plodovyh nasazhdenij. *AgroEkoInfo*. 2019;2(36):29. (In Russ.). EDN: OEGCIR

Сведения об авторах

Апажев Расул Алимович – аспирант кафедры технической механики и физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова»

Шекихачев Юрий Ахметханович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической механики и физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 4107-1360, Scopus ID: 57205029899, Researcher ID: AAE-3244-2019

Information about the authors

Rasul A. Apazhev – Postgraduate student of the Department of Technical Mechanics and Physics, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov

Yuri A. Shekihachev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technical Mechanics and Physics, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 4107-1360, Scopus ID: 57205029899, Researcher ID: AAE-3244-2019

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 11.02.2025;
одобрена после рецензирования 28.02.2025;
принята к публикации 10.03.2025.

The article was submitted 11.02.2025;
approved after reviewing 28.02.2025;
accepted for publication 10.03.2025.