

Научная статья

УДК 631.311:004.94

doi: 10.55196/2411-3492-2023-4-42-110-117

## Математическое моделирование процесса обработки почвы почвообрабатывающими рабочими органами

**Расул Алимович Апажев**

Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, проспект  
Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030, apazhev97@mail.ru

**Аннотация.** Обработка почвы – важнейшее звено в технологии возделывания сельскохозяйственных культур. В настоящее время на обработку почвы в среднем приходится 35-40% энергетических затрат всего объема полевых работ и до 20% энергии, потребляемой в сельском хозяйстве. Обработка почвы позволяет регулировать водно-воздушный режим, интенсивность биологических процессов и поддерживать необходимое фитосанитарное состояние почвы и посевов. Энергоемкость и качество обработки почвы зависят от степени совершенства технических средств. Математическое моделирование процесса обработки почвы различными почвообрабатывающими рабочими органами является актуальной задачей, поскольку позволяет разработать более совершенные энергоэффективные технические средства. Анализ рабочего процесса выполнялся с применением аналитических основ земледельческой механики и теоретических основ упруго-вязко-пластического разрушения почвенной среды с учетом его напряженно-деформированного состояния, методов имитационного и физического моделирования. Полученные данные обработаны методами математического анализа и вероятностно-статистическими методами. В результате циклических колебаний консоли, которой оборудован наконечник, за счет распространения волн деформации впереди образуется сжатая зона почвы. В математической модели, описывающей процесс разрушения почвы наконечником с консолью, сочетается статическое разрушение почвы и разрушение на основе распространения волн деформации консолью. Установлено, что общее сопротивление разрыхлению возрастает прямо пропорционально при увеличении глубины разрыхления, по параболической зависимости с увеличением ширины наконечника, спадающего ускоренно при уменьшении толщины консоли, приобретает наименьшее значение, когда длина консоли приобретает значение ширины наконечника. Таким образом, при проектировании почвообрабатывающих машин для снижения энергоемкости процесса резания почвы: необходимо учитывать положительные качества комбинированного резания почвы; оборудовать зубцы рабочих органов консольными пластинами, устанавливая их на лобной поверхности.

**Ключевые слова:** почва, обработка, резание, рабочий орган, энергоемкость, сопротивление, моделирование

**Для цитирования.** Апажев Р. А. Математическое моделирование процесса обработки почвы почвообрабатывающими рабочими органами // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2023. № 4(42). С. 110–117. doi: 10.55196/2411-3492-2023-4-42-110-117

Original article

## Mathematical modeling of the process of soil cultivation using tillage working bodies

**Rasul A. Apazhev**

Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, 1v Lenin Avenue, Nalchik,  
Russia, 360030, apazhev97@mail.ru

**Abstract.** Tillage is the most important link in the technology of cultivating agricultural crops. Currently, soil cultivation accounts for on average 35–40% of the energy costs of the total volume of field work and up to 20% of the energy consumed in agriculture. Soil cultivation allows you to regulate the water-air regime, the intensity of biological processes and maintain the necessary phytosanitary condition of the soil and crops. The energy intensity and quality of tillage depend on the degree of sophistication of technical means. Mathematical modeling of the process of soil cultivation with various soil-cultivating working bodies is an urgent task, since it allows the development of more advanced energy-efficient technical means. The analysis of the work process was carried out using the analytical foundations of agricultural mechanics and the theoretical foundations of elastic-visco-plastic destruction of the soil environment, taking into account its stress-strain state, simulation and physical modeling methods. The obtained data was processed by methods of mathematical analysis and probabilistic-statistical methods. As a result of cyclic vibrations of the console with which the tip is equipped, due to the propagation of deformation waves, a compressed soil zone is formed in front. The mathematical model describing the process of soil destruction by a tip with a cantilever combines static destruction of the soil and destruction based on the propagation of deformation waves by the cantilever. It has been established that the overall resistance to loosening increases in direct proportion to the depth of loosening, according to a parabolic dependence with increasing tip width, which decreases rapidly as the thickness of the cantilever decreases, and acquires its smallest value when the length of the cantilever becomes equal to the width of the tip. Thus, when designing tillage machines to reduce the energy intensity of the soil cutting process: it is necessary to take into account the positive qualities of combined soil cutting; equip the teeth of the working bodies with cantilever plates, installing them on the frontal surface.

**Keywords:** soil, processing, cutting, working body, energy intensity, resistance, modeling

**For citation.** Apazhev R.A. Mathematical modeling of the process of soil cultivation with soil-cultivating working bodies. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2023;4(42):110–117. (In Russ.). doi: 10.55196/2411-3492-2023-4-42-110-117

**Введение.** В последнее время в сельскохозяйственном производстве резко возрос интерес к поиску и разработке новых методов и способов, обеспечивающих снижение энергоемкости и повышение качества технологических процессов обработки почвы.

На агротехнические показатели и тяговое сопротивление почвообрабатывающих машин значительное влияние оказывают физико-механические свойства почвы (удельное сопротивление, влажность и твердость почвы, коэффициент трения почвы о сталь, абразивные свойства почвы), изменяющиеся в зависимости от погодных условий, севооборота культур, внесения в почву минеральных и органических удобрений и т. д. Эти вопросы достаточно широко изучены в работах многих авторов [1–4].

Значительное количество результатов теоретических и экспериментальных исследований ученых посвящено раскрытию новых закономерностей процессов обработки почвы различными рабочими органами и машинами [5–8]. При внедрении почвообрабатывающей техники в производство разра-

батываются методы оценки эффективности функционирования в различных зонах с учетом ее работоспособности и надежности в процессе эксплуатации [9–12].

При этом обоснование конструктивных параметров новых способов обработки почвы и типов рабочих органов, принципиально отличающихся от традиционных приемов, применяемых на практике, невозможно без раскрытия теоретических основ их взаимодействия с почвой с учетом ее изменяющихся свойств. Для этого необходима разработка модели процесса взаимодействия рабочих органов с почвой, обеспечивающей возможность определения и анализа агротехнических и энергетических показателей процесса обработки почвы и обоснования их конструктивно-технологических параметров.

**Цель исследования** – аналитически исследовать образование сжатой зоны почвы упругой консолью за счет распространения волн деформации и разработать математическую модель, описывающую взаимодействие почвы и наконечника, оборудованного консолью, где лобовая поверхность консоли параллельна

лобовой поверхности ножа; установить, как меняется общее сопротивление резанию почвы при изменении глубины резания, ширины наконечника, толщины и длины консоли.

**Материалы, методы и объекты исследования.** Анализ рабочего процесса выполнялся с применением аналитических основ земледельческой механики и теоретических основ упруго-вязко-пластического разрушения почвенной среды с учетом её напряженно-деформированного состояния, методов имитационного и физического моделирования. Полученные данные обработаны методами математического анализа и вероятно-статистическими методами.

**Результаты исследования.** Консольно-установленная режущая кромка (КРК) на наконечнике во время резания почвы обеспечивает приложение нагрузки с большой скоростью. Такое действие следует рассматривать на основе принципов теории распространения волны деформации [13]:

$$P = \frac{uk_A S}{2vk_\alpha}, \quad (1)$$

где:

$$u = \sqrt{\frac{E_A(1-\mu)}{I_A(1+\mu)(1-2\mu)}} - \text{скорость волны}$$

деформации, м/с;

$\mu$  – угол трения почвы о нож, рад.;

$E_A$  – момент инерции почвы, кг·м<sup>2</sup>;

$k_A = I_A V_{КРК}^2 + \sigma_A \varepsilon_A$  – удельное динамическое сопротивление почвы, кг/(м·с<sup>2</sup>);

$I_A$  – массовая плотность почвы, кг/м<sup>3</sup>;

$v = V_{КРК}$ ,  $V_{КРК}$  – скорость КРК, м/с;

$\sigma_A$  – предел прочности почвы при статическом сжатии [14], кг/(м·с<sup>2</sup>);

$\varepsilon_A$  – динамическая деформация почвы;

$S = L_K b_K$  – площадь лобной поверхности консоли, м<sup>2</sup>;

$L_K$  – длина консоли, м;

$b_K$  – ширина наконечника, м;

$k_\alpha$  – коэффициент, учитывающий угол заострения рабочего органа.

С учетом выражения (1) запишем выражение для расчета силы резания в области консоли и КРК:

$$P_K = \frac{uk_A S}{2V_{КРК} k_\alpha}. \quad (2)$$

Таким образом, под действием силы  $P_K$  КРК подвергается упругой деформации и при возвращении в исходное положение резко действует на элемент почвы (ударяет).

Поэтому определим энергию единичного удара КРК о почву:

$$E_{уд} = \frac{J_K \omega_P}{2}, \quad (3)$$

где:

$$J_K = \frac{G_K L_K^2}{2g} - \text{момент инерции консоли,}$$

кг·м<sup>2</sup>;

$$G_K = M_K g - \text{вес консоли, кг·м}^2;$$

$$\omega_P = \frac{V_{КРК}}{L_K} - \text{угловая скорость КРК при}$$

разгибании консоли, с<sup>-1</sup>;

$M_K$  – масса консоли, кг;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Зная энергию единичного удара, определим глубину внедрения КРК в почву за один удар  $\delta_K$  и длительность ударного импульса  $t_{уд}$ :

$$\delta_K = \frac{2E_{уд} V_{КРК} k_\alpha}{uk_D F_{КП}}, \quad (4)$$

где:

$$F_{КП} = \frac{2}{3} F_K - \text{полезная площадь по-}$$

верхности консоли (поскольку упругая линия консоли является параболой третьего порядка [15], то первая ее треть от заземления незначительно удаляется от начального положения, следовательно, перемещение этого участка при сгибании и скорость при разгибании будет достаточно мала), м<sup>2</sup>:

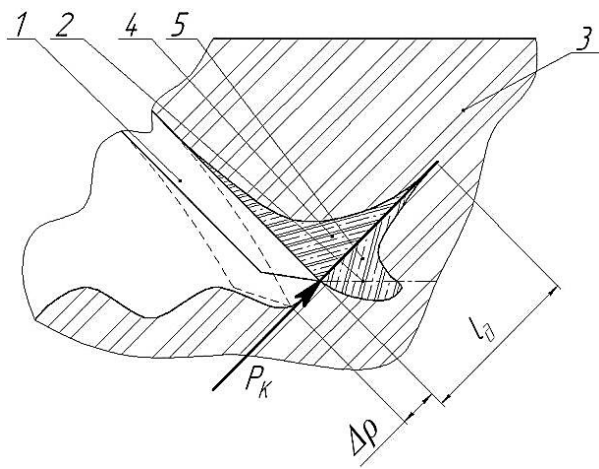
$$t_{уд} = \frac{2E_{уд} k_\alpha}{F_{КП} (u - V_{КРК}) k_D}. \quad (5)$$

Отсюда определим длину сжатой зоны почвы в результате нагрузки в зоне КРК:

$$l_\partial = (u - V_{КРК}) t_{уд}. \quad (6)$$

Сжатая зона 4 почвы 3 (рис. 1), образовавшаяся вследствие динамического действия

консоли 1 по линии 2, находится над консолью и ограничивается сверху кривой, являющейся параболой третьего порядка. Согласно закону Кулона, распространяющегося и на сложное напряженное состояние почвы, кроме главного нормального напряжения  $\sigma$  в почве, направление которого совпадает с распространением волны деформации, возникает еще главное действующее в направлении боковое напряжение  $\bar{\sigma}$ , перпендикулярное направлению распространения волны и образующее сжатую зону почвы 5 [14].



**Рисунок 1.** Схема распространения напряжения в почве при действии консоли с КРК  
**Figure 1.** Scheme of stress propagation in the soil under the action of a console with a CSE

Коэффициент бокового давления  $k_{\sigma} = \frac{\bar{\sigma}}{\sigma}$  для глинистых почв находится в пределах 0,11-0,82, для жестких почв 0,25-0,37 [14].

По теореме об изменении кинетической энергии работа  $A$  в исследуемой системе равна изменению кинетической энергии:

$$A = \Delta U_{Ck} = U_{Ck2} - U_{Ck1}, \quad (7)$$

где:

$\Delta U_{Ck}$  – изменение кинетической энергии,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2$ ;

$U_{Ck2}$  – конечная кинетическая энергия,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2$ ;

$U_{Ck1}$  – начальная кинетическая энергия,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2$ .

Чтобы выполнить скол элемента почвы от массива простым острым ножом, необходи-

мо выполнить работу  $A$ , для выполнения скола такого же элемента почвы от массива ножом с консолью необходимо выполнить такую же работу  $A$ .

Следовательно, в первом случае работа  $A$  равна работе силы для преодоления сопротивления почвы резанию  $P_{3AG}$  (сила резания):

$$A = A_{P_{3AG}} = P_{3AG} \ell_{CK} \cos \beta, \quad (8)$$

где:

$\ell_{CK} = V_H T_C$  – путь пройден ножом от начала контакта с массивом до полного скола элемента почвы, м;

$V_H$  – скорость внедрения наконечника в почву, м/с;

$T_C$  – время скола почвы, с;

$\beta$  – угол резания (рис. 2, а), град.

Во втором случае работа  $A$  равна сумме работ статической силы для преодоления сопротивления почвы резанию  $P_{CT}$ , изгибающей силы  $P_3 = -P_{CT}$  и динамической силы, действующей в области консоли  $P_K$  (рис. 2, б):

$$A = A_{P_{CT}} + A_{P_K} = P_{CT} \ell_{CK} \cos \beta - P_C \Delta \rho + P_K \ell_K. \quad (9)$$

Приравняем выражения (8) и (9):

$$P_{3AG} \ell_{CK} \cos \beta = P_{CT} \ell_{CK} \cos \beta - P_C \Delta \rho + P_K \ell_K. \quad (10)$$

Откуда найдем  $P_{CT}$ :

$$P_{CT} = \frac{P_C \Delta \rho}{\ell_{CK} \cos \beta} - \frac{P_K \ell_K}{\ell_{CK} \cos \beta} - P_{3AG}. \quad (10)$$

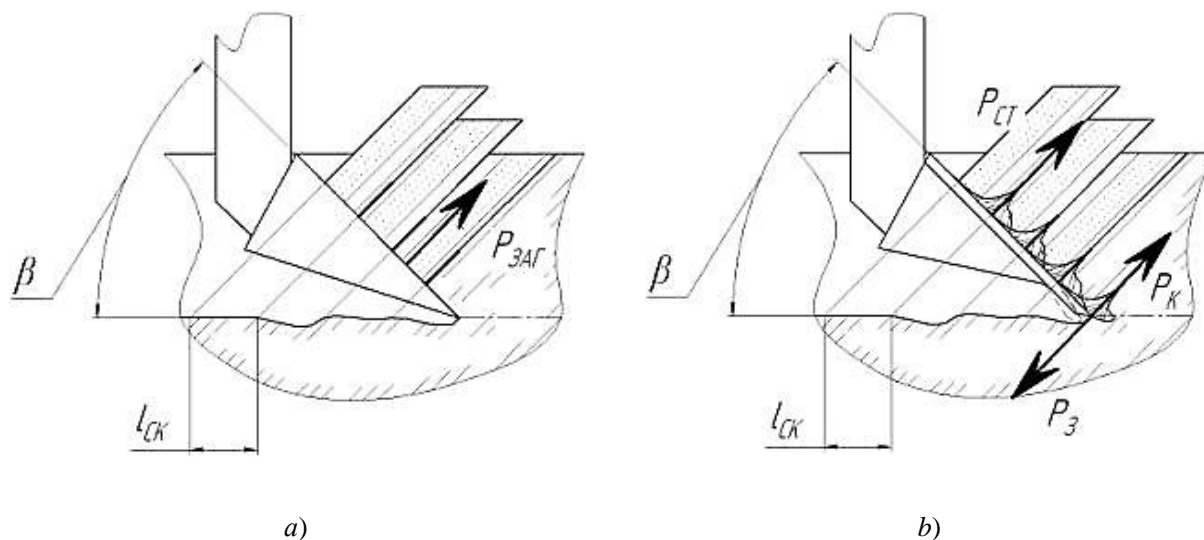
Установлено, что общее сопротивление резанию  $P_{CT}$ :

- возрастает прямо пропорционально при увеличении глубины разрыхления  $H$  (рис. 3);

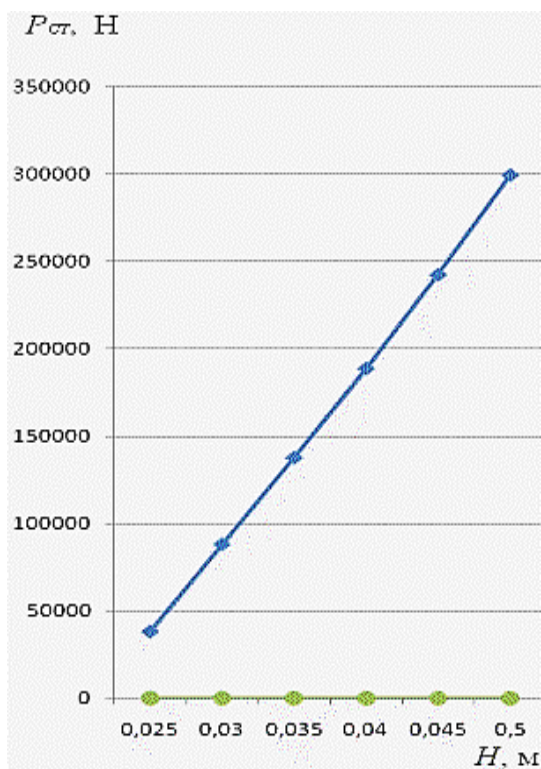
- растёт по параболической зависимости с увеличением ширины наконечника  $b_K$  (рис. 4);

- спадает ускоренно при изменении толщины консоли  $c_K$  (рис. 5);

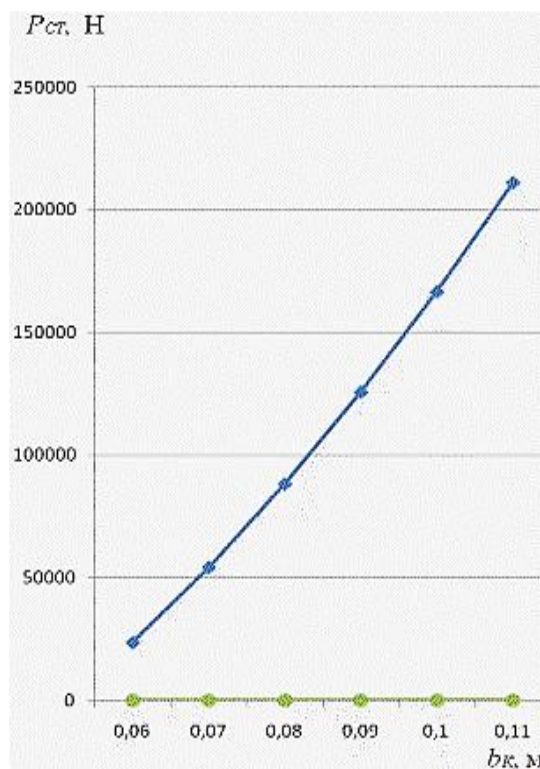
- приобретает наименьшее значение при значениях длины консоли  $L_K$  от 0,03 м до 0,05 м (рис. 6).



**Рисунок 2.** Схемы для определения работы сил при резании почвы:  
 а) простым острым ножом; б) ножом с КРК  
**Figure 2.** Schemes for determining the work of forces when cutting soil:  
 а) with a simple sharp knife; б) a knife with a CCE



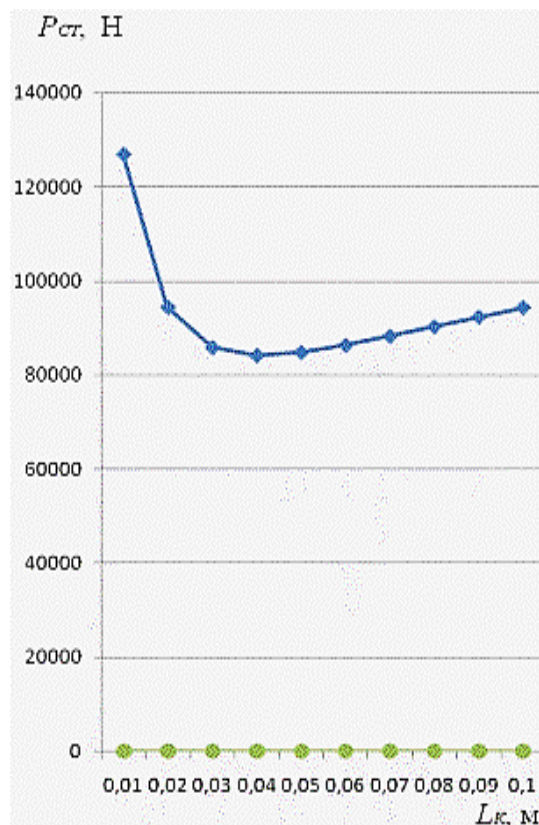
**Рисунок 3.** Закономерности смены сопротивления почвы разрыхлению  $P_{CT}$  в зависимости от глубины разрыхления  $H$   
**Figure 3.** Patterns of changes in soil resistance to loosening depending  $P_{CT}$  on the depth of loosening  $H$



**Рисунок 4.** Закономерности изменения сопротивления почвы разрыхлению  $P_{CT}$  в зависимости от ширины наконечника  $b_K$   
**Figure 4.** Patterns of changes in soil resistance to loosening depending  $P_{CT}$  on the width of the tip  $b_K$



**Рисунок 5.** Закономерности смены сопротивления почвы разрыхлению  $P_{СТ}$  в зависимости от толщины консоли  $c_K$   
Figure 5. Patterns of changes in soil resistance to loosening depending  $P_{СТ}$  on the thickness of the cantilever  $c_K$



**Рисунок 6.** Закономерности изменения сопротивления почвы разрыхлению  $P_{СТ}$  в зависимости от длины консоли  $L_K$   
Figure 6. Patterns of changes in soil resistance to loosening depending  $P_{СТ}$  on the length of the cantilever  $L_K$

**Вывод.** В результате циклических колебаний консоли, которой оборудован наконечник, за счет распространения волн деформации впереди образуется сжатая зона почвы. В математической модели, описывающей процесс разрушения почвы наконечником с консолью, сочетается статическое разрушение почвы и разрушение на основе распространения волн деформации консолью. Установлено, что общее сопротивление разрыхлению возрастает прямо пропорционально при увеличении глубины разрыхления по параболической зависимости с увеличением ширины наконечника.

Общее сопротивление разрыхлению минимальна в случае, когда длина консоли равна ширине наконечника.

Таким образом, при проектировании почвообрабатывающих машин для снижения энергоемкости процесса резания почвы:

- необходимо учитывать положительные качества комбинированного резания почвы;
- оборудовать зубцы рабочих органов консольными пластинами, устанавливая их на лобной поверхности.

### Список литературы

1. Apazhev A., Egozhev A., Misirov M., Polishchuk E., Egozhev A. Mathematical model for calculating the parameters of machines for processing near-trunk strips in a terrace // E3S Web of Conferences 1st International Scientific and Practical Conference. 2021. С. 01019. DOI: 10.1051/e3sconf/202126201019

2. Апажев А. К., Егожев А. А., Егожев А. М., Дзуганов В. Б., Пазова Т. Х. Вертикальная фреза для обработки приствольных полос интенсивного сада // Сельский механизатор. 2023. № 5. С. 20-21. DOI: 10.47336/0131-7393-2023-5-20-21. EDN: DWEMNV
3. Апажев А. К., Егожев А. А., Егожев А. М., Полищук Е. А. Двухроторная фреза для террасного садоводства // Сельский механизатор. 2022. № 4. С. 10-11. EDN: RQRCKA
4. Егожев А. М., Апажев А. К., Полищук Е. А., Егожев А. А. Фреза для горного и предгорного садоводства // Сельский механизатор. 2021. № 12. С. 10. EDN: ONPXGF
5. Апажев А. К., Шекихачев Ю. А., Хажметов Л. М., Егожев А. М., Балкаров Р. А., Фиашшев А. Г. Ротационная косилка для обработки приствольных полос плодовых насаждений на террасах // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70. № 1(50). С. 87–93. DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-1-87-93. EDN FRWYFN
6. 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. EDN: WNHGRE
7. Ашабоков Х. Х., Апажев А. К., Шекихачев Ю. А., Хажметов Л. М., Фиашшев А. Г., Курасов Б. С. Теоретическое обоснование конструктивно-режимных параметров плужно-фрезерного агрегата // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2019. № 08(152). С. 275.
8. Хажметова А. Л., Апажев А. К., Шекихачев Ю. А., Хажметов Л. М., Фиашшев А. Г., Курасов В. С. Теоретическое обоснование конструктивно-режимных параметров агрегата для обработки междурядий и приствольных полос плодовых насаждений // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2019. № 07(151). С. 232–243. EDN: FBQERM
9. Апажев А. К., Шекихачев Ю. А., Хажметов Л. М., Егожев А. М., Фиашшев А. Г., Барагунов А. Б. Повышение эксплуатационной надежности сельскохозяйственных машин // Техника и оборудование для села. 2023. № 4(310). С. 12–16. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-4-12–16. EDN: HHJDDY.
10. Апажев А. К., Шекихачев Ю. А., Дзуганов В. Б., Шекихачева Л. З., Чеченов М. М., Шекихачев А. А. Основные направления повышения эффективности использования сельскохозяйственной техники // АгроЭкоИнфо. 2022. № 4(52). DOI: 10.51419/202124418. EDN: YVMHMC.
11. Апажев А. К., Шекихачев Ю. А. Оптимизация функционирования сельскохозяйственных производственных систем // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2022. № 1(35). С. 81–89. DOI: 10.55196/2411-3492-2022-1-35-81-89. EDN: AMXFOK
12. Егожев А. М., Апажев А. К., Мисиров М. Х., Полищук Е. А., Егожев А. А. Метод расчета на прочность грузонесущих резьбовых соединений сельскохозяйственных машин и орудий // Сельский механизатор. 2020. № 12. С. 38–39. EDN: OAVYWT
13. Бакушев С. В. Геометрически и физически нелинейная механика сплошной среды: Плоская задача. Москва: Книжный дом «Либроком», 2013. 312 с.
14. Заручевых И. Ю., Невзоров А. Л. Механика грунтов в схемах и таблицах. Москва: Изд-во АСВ, 2007. 134 с.
15. Тер-Мартirosян З. Г. Механика грунтов. Москва: Изд-во АСВ, 2009. 488 с.

## References

1. Apazhev A., Egozhev A., Misirov M., Polishchuk E., Egozhev A. Mathematical model for calculating the parameters of machines for processing near-trunk strips in a terrace. E3S Web of Conferences 1st International Scientific and Practical Conference. 2021. S. 01019. DOI:10.1051/e3sconf/202126201019
2. Apazhev A.K., Yegozhev A.A., Yegozhev A.M., Dzuganov V.B., Pazova T.Kh. Vertical milling cutter for processing near-stem strips of an intensive garden. *Selskiy mekhanizator*. 2023;(5):20-21. (In Russ.). DOI: 10.47336/0131-7393-2023-5-20-21. EDN: DWEMNV
3. Apazhev A.K., Yegozhev A.A., Yegozhev A.M., Polishchuk Ye.A. Two-rotor milling cutter for terraced gardening. *Selskiy mekhanizator*. 2022;(4):10-11. (In Russ.). EDN: RQRCKA
4. Yegozhev A.M., Apazhev A.K., Polishchuk Ye.A., Yegozhev A.A. Milling cutter for mountain and foothill gardening. *Selskiy mekhanizator*. 2021;(12):10. (In Russ.). EDN: ONPXGF
5. Apazhev A.K., Shekikhachev Yu.A., Khazhmetov L.M., Yegozhev A.M., Balkarov R.A., Fiapshev A.G. Rotary Mower for Treating Near-Stem Strips of Fruit Plantations on Terraces. *Electrical technology and*

*equipment in the agro-industrial complex*. 2023;70(1):87–93. (In Russ.). DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-1-87-93. EDN FRWYFN

6. Apazhev A.K., Yegozhev A.M., Yegozhev 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.). EDN: WNHGRE

7. Ashabokov Kh.Kh., Apazhev A.K., Shekikhachev Yu.A., Khazhmetov L.M., Fiapshev A.G., Kurasov B.S. Theoretical justification of constructive and regime parameters of the arable and milling unit. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019;08(152):275. (In Russ.)

8. Khazhmetova A.L., Apazhev A.K., Shekikhachev 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. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019;07(151):232–243. (In Russ.). EDN: FBQERM

9. Apazhev A.K., Shekikhachev Yu.A., Khazhmetov L.M., Yegozhev A.M., Fiapshev A.G., Baragunov A.B. Improving the operational reliability of agricultural machines. Machinery and equipment for rural area. 2023;4(310):12–16. (In Russ.). DOI: 10.33267/2072-9642-2023-4-12-16. EDN: HHJDDY.

10. Apazhev A.K., Shekikhachev Yu.A., Dzuganov V.B., Shekikhacheva L.Z., Chechenov M.M., Shekikhachev A.A. The main directions for increasing the efficiency of the use of agricultural machinery. *AgroEkoInfo*. 2022;4(52). (In Russ.). DOI: 10.51419/202124418. EDN: YBMHMC.

11. Apazhev A.K., Shekikhachev Yu.A. Optimizing the functioning of agricultural production systems. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2022;1(35):81–89. (In Russ.). DOI: 10.55196/2411-3492-2022-1-35-81-89. EDN: AMXFOK

12. Yegozhev A.M., Apazhev A.K., Misirov M.Kh., Polishchuk Ye.A., Yegozhev A.A. Method for calculating the strength of load-bearing threaded connections of agricultural machines and implements. *Selskiy mekhanizator*. 2020;12:38–39. (In Russ.). EDN: OAVYYWT

13. Bakushev S.V. *Geometricheski i fizicheski nelineynaya mekhanika sploshnoy sredy: Ploskaya zadacha* [Geometric and physically nonlinear continuum mechanics: Plane problem]. Moscow: Knizhnyy dom "Librokom". 2013. 312 p. (In Russ.)

14. Zaruchevnykh I.Yu., Nevzorov A.L. *Mekhanika gruntov v skhemakh i tablitsakh*. Moscow: Izd-vo ASV, 2007. 134 s. (In Russ.)

15. Ter-Martirosyan Z.G. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Moscow: Izd-vo ASV, 2009. 488 p. (In Russ.)

---

#### Сведения об авторе

**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»

#### Information about the author

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

---

Статья поступила в редакцию 20.10.2023;  
одобрена после рецензирования 06.11.2023;  
принята к публикации 15.11.2023.

The article was submitted 20.10.2023;  
approved after reviewing 06.11.2023;  
accepted for publication 15.11.2023.