

Научная статья

УДК 631.51

DOI: 10.55196/2411-3492-2025-4-50-103-110

## Влияние угла действия режущего клина на механизм деформирования почвы и энергоемкость процесса почвообработки

**Мухамад Хусаинович Мисиров<sup>✉1</sup>, Артур Мухамедович Егожев<sup>2</sup>**

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

<sup>✉1</sup>misir56@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9752-1184>

<sup>2</sup>artyr-egozhev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4220-9107>

**Аннотация.** В статье представлены результаты теоретического исследования влияния угла действия  $\omega$  режущего клина на механизм деформирования и энергоёмкость процесса обработки почвы. На основе анализа классических и современных подходов установлено, что угол действия, определяемый как угол между равнодействующей силой резания и вектором скорости, является ключевым параметром, определяющим преобладающий тип деформации (отрыв, сдвиг или сжатие). Показано, что для типичных условий работы почвообрабатывающих орудий (угол резания  $\delta = 15-40^\circ$ , угол трения  $\psi = 22-31^\circ$ ) угол действия является положительным и лежит в диапазоне  $\omega = 37-71^\circ$ , что обуславливает преобладание отрывной деформации над сдвиговой. Построена классификация из пяти возможных механизмов деформирования в зависимости от величины угла действия и проанализирована их энергоёмкость. Установлено, что отрывная деформация, характеризующаяся наименьшими энергозатратами, реализуется при положительных углах действия. Результаты работы доказывают несостоительность исключительно сдвиговой модели Тиме применительно к почвам и обосновывают необходимость использования моделей, учитывающих хрупкое разрушение и рост трещин. Полученные данные имеют практическую значимость для оптимизации геометрических параметров рабочих органов с целью снижения энергоёмкости почвообработки.

**Ключевые слова:** угол действия, режущий клин, деформация почвы, энергоёмкость, отрыв, сдвиг, сопротивление резанию, механика разрушения

**Для цитирования:** Мисиров М. Х., Егожев А. М. Влияние угла действия режущего клина на механизм деформирования почвы и энергоемкость процесса почвообработки // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2025. № 4(50). С. 103–110. DOI: 10.55196/2411-3492-2025-4-50-103-110

Original article

## The influence of the cutting wedge angle on the soil deformation mechanism and energy consumption of the tillage process

**Mukhamad Kh. Misirov<sup>✉1</sup>, Artur M. Egozhev<sup>2</sup>**

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

<sup>✉1</sup>misir56@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9752-1184>

<sup>2</sup>artyr-egozhev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4220-9107>

**Abstract.** The article presents the results of a theoretical study on the influence of the angle of action  $\omega$  of a cutting wedge on the deformation mechanism and energy capacity of the soil tillage process. Based on the analysis of classical and modern approaches it was found that the angle of action, defined as the angle between the resultant cutting force and the velocity vector, is a key parameter that determines the predominant type of deformation (tension, shear, or compression). It is shown that for typical operating conditions of tillage tools (cutting angle  $\delta = 15-40^\circ$ , friction angle  $\psi = 22-31^\circ$ ) the angle of action is positive and lies in the range  $\omega = 37-71^\circ$ , which causes the prevalence of tensile deformation over shear. A classification of five possible deformation mechanisms depending on the angle of action is constructed and their energy intensity is analyzed. It was found that tensile deformation, characterized by the lowest energy consumption, is realized at positive angles of action. The results prove the inconsistency of the exclusive shear model of Time for soils and justify the need to use models that take into account brittle fracture and crack growth. The obtained data are of practical importance for optimizing the geometric parameters of working bodies to reduce the energy intensity of soil cultivation.

**Keywords:** angle of action, cutting wedge, soil deformation, energy consumption, tension, shear, cutting resistance, fracture mechanics

**For citation:** Misirov M.Kh., Egozhev A.M. The influence of the cutting wedge angle on the soil deformation mechanism and energy consumption of the tillage process. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2025;4(50):103–110. (In Russ.). DOI: 10.55196/2411-3492-2025-4-50-103-110

**Введение.** Обработка почвы остается одним из наиболее энергоемких процессов в сельскохозяйственном производстве. В связи с этим задача снижения энергозатрат путем оптимизации параметров рабочих органов не теряет своей актуальности [1, 2]. Одним из фундаментальных процессов, лежащих в основе работы большинства почвообрабатывающих орудий, является резание почвенной среды клином. Традиционно теория резания почв базировалась на моделях, заимствованных из механики резания металлов, ключевой из которых является сдвиговая модель И. А. Тиме [3], не учитывающая образование трещин отрыва, наблюдавшихся экспериментально. Данная модель предполагает, что разрушение материала происходит преимущественно по плоскости сдвига.

Однако, как показывают многочисленные экспериментальные данные, механизм разрушения связных почв (суглинков, глин) существенно отличается от пластичного сдвига, характерного для металлов [4, 5]. Для почв, особенно при определенной влажности, более характерно хрупкое разрушение с образованием трещин отрыва [6, 7]. Некорректность прямого переноса металлорежущих моделей на почву подтверждается и расчетами, выполненными в работе [8], которые показали, что угол действия при резании почвы является положительным, в то время как при резании металлов он часто отрицательный.

В этом контексте параметр «угол действия»  $\omega$  – угол между равнодействующей силой резания и направлением движения (вектором скорости) – выходит на первый план, так как он напрямую определяет соотношение между отрывающими и сжимающими напряжениями в зоне резания и, следовательно, преобладающий механизм разрушения [8]. Несмотря на свою важность, этот параметр часто не учитывается при проектировании рабочих органов.

**Цель исследования** – изучить влияние угла действия режущего клина на характер деформации почвы и установить качественную связь между величиной этого угла и энергоемкостью процесса почвообработки на основе современных моделей, учитывающих хрупкий характер разрушения.

**Материалы, методы и объекты исследования.** Исследование носит теоретико-аналитический характер. Процесс резания рассматривался с позиции механики разрушения. Использовались методы физического и математического моделирования процесса резания хрупких неметаллических материалов. Объектом исследования является процесс взаимодействия двугранного режущего клина с почвенной средой, рассматриваемый как процесс трещинообразования и хрупкого разрушения. В качестве материала выбрана связная почва (суглинистая и глинистая поч-

ва), т. к. наиболее распространенным видом деформации суглинистых и глинистых почв под воздействием клина является отрыв, а не сдвиг, а также происходит интенсивное трещинообразование впереди клина [6].

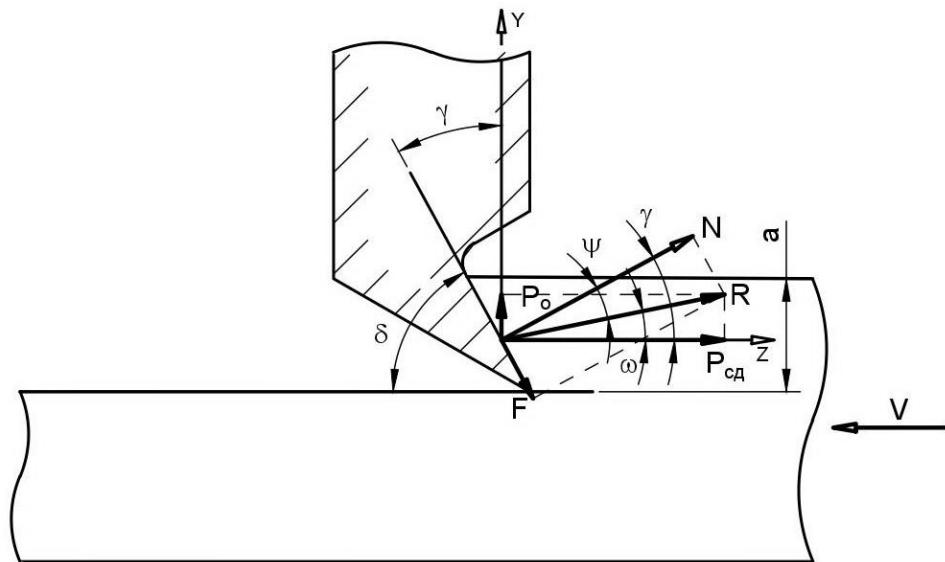
В качестве базовой расчетной схемы для теоретического описания процесса резания используется модель свободного прямоугольного резания хрупкого материала с образованием опережающих трещин и после-

дующего разрушения (рис. 1). В принятой модели равнодействующая силы резания  $R$  рассматривается как геометрическая сумма нескольких составляющих:

$P_{cd} = R \cos \omega$  – сдвигающая сила (тангенциальная) составляющая;

$P_o = R \sin \omega$  – отрывающая сила (нормальная) составляющая;

$P_{cж} = R \sin \omega$  – сжимающая сила (нормальная) составляющая.



**Рисунок 1.** Схема силового взаимодействия режущего клина с почвой и определение угла действия  $\omega$ :

$R$  – равнодействующая сила резания;  $V$  – вектор скорости резания,  $\omega$  – угол действия;

$\delta$  – угол резания;  $\Psi$  – угол трения;  $\gamma$  – передний угол

**Figure 1.** Diagram of the force interaction of the cutting wedge with the soil and determination of the angle of action  $\omega$ :

$R$  – is the resultant cutting force;  $V$  – is the cutting speed vector,  $\omega$  – is the angle of action;

$\delta$  – is the cutting angle;  $\Psi$  – is the friction angle;  $\gamma$  – is the front angle

В данной модели ключевым геометрическим параметром выступает угол действия, определяемый по формуле, который следует из рисунка 1:

$$\omega = 90^\circ - \delta - \Psi, \quad (1)$$

где

$\omega$  – угол действия;

$\delta$  – угол резания (дополняет передний угол

–  $\gamma$  до  $90$  градусов);

$\Psi$  – угол трения почвы по материалу клина.

Анализ уравнения (1) позволяет выявить критические условия, определяющие знак угла действия и, соответственно, направление сил и характер деформации почвы (рис. 2).

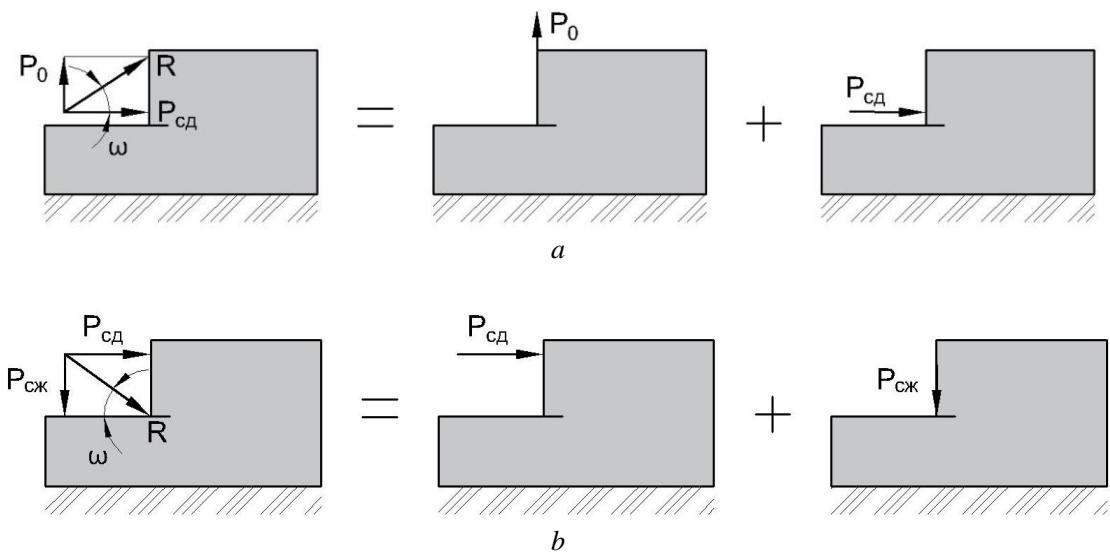
Выявлено три принципиально различных режима работы почвообрабатывающего клина:

1) при  $\delta + \Psi < 90^\circ$  угол действия положительный ( $\omega > 0$ ) (рис. 2a);

2) при  $\delta + \Psi = 90^\circ$  угол действия равен нулю ( $\omega = 0$ );

3) при  $\delta + \Psi > 90^\circ$  угол действия отрицательный ( $\omega < 0$ ) (рис. 2b).

Для анализа энергоёмкости использовался качественный сравнительный метод, основанный на положении о том, что энергозатраты на деформацию отрыва (хрупкое разрушение) существенно ниже, чем на пластический сдвиг, и тем более – на объемное сжатие [5].



**Рисунок 2.** Виды деформации обрабатываемого материала в зависимости от угла действия  $\omega$  равнодействующей силы резания  $R$ :  $a - \omega > 0$ ;  $b - \omega < 0$

**Figure 2.** Types of deformation of the workpiece depending on the angle of action  $\omega$  of the resultant cutting force  $R$ :  $a - \omega > 0$ ;  $b - \omega < 0$

## Результаты исследования

**1. Определение типичного диапазона угла действия почвообрабатывающих орудий.** Для практических условий почвообработки, где типичные значения угла резания почвообрабатывающих клиньев составляют  $\delta = 15 - 40^\circ$ , а угол трения  $\Psi = 22 - 31^\circ$  [5], расчеты показывают, что угол действия изменяется в пределах  $\omega = 37 - 71^\circ$ . Это свидетельствует о выполнении условия (1) и, следовательно, о положительном значении угла действия при работе почвообрабатывающих орудий.

Для стандартных почвообрабатывающих клиньев угол действия всегда является положительным и лежит в достаточно широком диапазоне  $\omega = 37 - 71^\circ$ . Это означает, что в соответствии с принятой моделью при резании почвы вертикальная составляющая силы резания  $P_o$  всегда направлена вверх и стремится оторвать стружку.

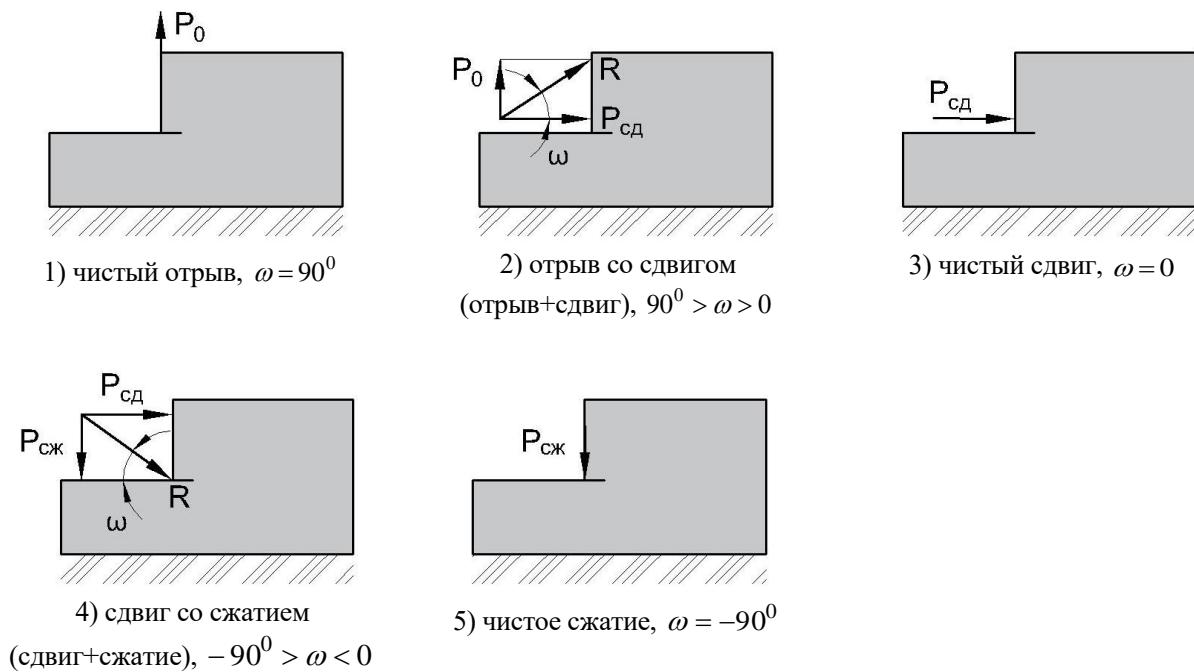
**2. Классификация механизмов деформирования в зависимости от угла действия.** На основе анализа физической модели разработана развернутая классификация механизмов деформирования, которая графически представлена на рисунке 3. В зависимости от величины угла  $\omega$  можно выделить пять принципиально различных схем нагружения и вызы-

ваемых ими деформаций. Данные схемы соответствуют разным типам деформации и расположены в порядке возрастания энергозатрат.

**Случай 1: чистый отрыв** ( $\omega = 90^\circ$ ). Из соотношения (1) следует, что чистый отрыв реализуется при условии  $\delta = -\Psi$ , т. е. когда угол резания равен углу трения. Вопрос реализации данного условия на практике остается открытым. Деформация происходит исключительно за счет нормальных растягивающих напряжений. Это наименее энергоемкий вид деформации.

**Случай 2: отрыв со сдвигом** ( $90^\circ > \omega > 0$ ). Это наиболее распространенный режим при обработке связных почв. Преобладает отрывная деформация, но присутствует и сдвиговая составляющая. Вертикальная составляющая силы резания направлена вверх и способствует отрыву стружки, что является энергетически более выгодным процессом по сравнению с деформацией сдвига. Энергоемкость выше, чем при чистом отрыве, но значительно ниже, чем в следующих случаях.

**Случай 3: чистый сдвиг** ( $\omega = 0^\circ$ ). Реализуется при  $\delta = 90^\circ - \Psi$ . Равнодействующая сила  $R$  направлена параллельно вектору скорости, вызывая деформацию сдвига. Деформация осуществляется за счет касательных напряжений. Энергоемкость существенно возрастает.



**Рисунок 3.** Классификация механизмов деформирования почвы в зависимости от угла действия  $\omega$   
**Figure 3.** Classification of soil deformation mechanisms depending on the angle of action  $\omega$

**Случай 4: сдвиг со сжатием** ( $-90^\circ > \omega < 0$ ). Преобладает сдвиг, сопровождаемый уплотняющим воздействием на почву. Характерен для резания металлов. Отрывающая сила  $P_o$  меняет знак и становится сжимающей  $P_{сж}$ , что создает сжимающие напряжения, подавляющие развитие трещин и приводит к прижиму стружки и интенсивному трению. Энергоемкость высокая.

**Случай 5: чистое сжатие** ( $\omega = -90^\circ$ ). Реализуется при  $\delta = 180^\circ - \Psi$ . Деформация происходит за счет объемного смятия материала, что является наиболее энергоемким процессом. Процесса резания как такового нет.

Таким образом, величина угла действия напрямую определяет энергоемкость процесса: с его уменьшением (вплоть до отрицательных значений) энергозатраты на разрушение почвы резко возрастают.

Условия реализации перечисленных видов деформации могут быть использованы при моделировании процессов резания хрупких материалов, а также при решении прикладных задач. Так, аналитическое условие получения чистого сдвига режущим инструментом  $\gamma = \Psi$ , которое получено из соотношений  $\delta = 90^\circ - \Psi$  и  $\delta = 90^\circ - \gamma$ , является теорети-

ческой базой патента по определению критического коэффициента интенсивности напряжений при поперечном сдвиге [9].

**3. Влияние угла действия на энергоёмкость процесса.** Поскольку для почвообрабатывающих клиньев характерен режим с положительным углом действия (случаи 1 и 2), это объясняет, почему при обработке почвы преобладает отрывная деформация, энергоемкость которой ниже. Увеличение угла действия (например, за счет уменьшения угла резания  $\delta$  или снижения трения) приводит к росту доли отрывной деформации и, как следствие, к потенциальному снижению энергозатрат. Данный теоретический вывод хорошо согласуется с экспериментальными данными работ [5, 7], в которых отмечается низкая энергоемкость процессов, связанных с расклиниванием и отрывом пласта почвы.

На практике для увеличения доли отрывной деформации необходимо выполнить условие  $\omega \rightarrow 90^\circ$ . Тогда из соотношения (1) следует, что это возможно при условии  $(\delta + \Psi) \rightarrow \min$ .

Напротив, если бы угол действия был отрицательным (как при резании металлов), это привело бы к резкому росту энергоемкости из-за преобладания деформации сжатия и трения (случаи 4 и 5).

**Практические рекомендации.** На основании проведенного исследования сформулированы следующие практические рекомендации, которые могут быть использованы при проектировании энергоэффективных режущих органов почвообрабатывающих орудий:

1) конструктивные параметры режущих органов следует выбирать из условия обеспечения положительного угла действия. Положительный угол действия способствует снижению энергоемкости процесса почвообработки за счет преобладания менее энергоемкой отрывной деформации;

2) уменьшение угла резания и снижение трения способствуют увеличению угла действия и росту доли энергетически выгодной отрывной деформации. Данное условие можно представить математически следующим образом:  $\omega \rightarrow 90^\circ$  при  $(\delta + \Psi) \rightarrow \min$ .

**Выводы.** 1. Установлено, что угол действия режущего клина является ключевым параметром, определяющим тип деформации почвы и, как следствие, энергоёмкость процесса почвообработки.

2. Показано, что угол действия режущего клина можно использовать в качестве параметра для управления механизмом разрушения почвы с целью снижения энергоемкости процесса ее обработки. Определены условия

для изменения направления равнодействующей силы резания.

3. Установлено, что для типичных почвообрабатывающих клиньев, используемых на практике, угол действия является положительным и находится в диапазоне  $37\text{--}71^\circ$ , что обуславливает преобладание отрывной деформации над сдвиговой при резании связных почв.

4. Разработана классификация, выделяющая пять механизмов деформирования почвы в зависимости от величины угла действия: чистый отрыв, отрыв со сдвигом, чистый сдвиг, сдвиг со сжатием, чистое сжатие. Установлено, что энергоёмкость процессов резания (крошения, разрушения) возрастает в данном порядке.

5. Снижение энергоёмкости процесса почвообработки возможно за счет уменьшения угла резания и снижения трения, т. е.  $(\delta + \Psi) \rightarrow \min$ , что способствует увеличению угла действия и росту доли энергетически выгодной отрывной деформации.

6. Полученные результаты позволяют аргументированно подходить к проектированию геометрии режущих органов почвообрабатывающих машин, ориентируясь на поддержание положительного угла действия для снижения их тягового сопротивления.

#### Список литературы

1. Горячкин В. П. Теория почвообрабатывающих орудий. Москва: Колос, 1968. 455 с.
2. Синеоков Г. Н., Панов И. М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин. Москва: Машиностроение, 1977. 328 с.
3. Тиме И. А. Основы резания металлов и режущие инструменты. Москва: Машгиз, 1962. 512 с.
4. Зеленин А. Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. Москва: Машиностроение, 1968. 256 с.
5. Панов И. М., Ветохин В. И. Физические основы механики почв. Киев: Феникс, 2008. 266 с. ISBN 978-966-651-621-6
6. Синеоков Г. Н. Проектирование почвообрабатывающих машин. Москва: Машиностроение, 1965. 311 с.
7. Мисиров М. Х., Канкулова Ф. Х. Определение условий для разрушения отрывом и сдвигом при резании почв и грунтов клином // АгроЭкоИнфо. 2018. № 1(31). С. 36. EDN: XSUVXN
8. Мисиров М. Х. Угол действия почвообрабатывающего клина // Достижения и перспективы реализации национальных проектов развития АПК: сб. науч. тр. VIII Международной научно-практической конференции памяти профессора Б. Х. Жерукова. Часть 2. Нальчик: ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, 2020. С. 88–92. EDN: FHNZMM
9. Патент 2650613 Российской Федерации. МПК G01N 3/24. Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжений при поперечном сдвиге твердого тела / А. К. Апажев, М. Х. Мисиров, А. Х. Габаев, А. М. Мисирова; патентообладатель ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ. № 2017109045; заявл. 17.03.2017; опубл. 16.04.2018, Бюл. № 11. 8 с.

## References

1. Goryachkin V.P. *Teoriya pochvoobrabatyvayushchih orudij* [Theory of tillage tools]. Moscow: Kolos, 1968. 455 p. (In Russ.)
2. Sineokov G.N., Panov I.M. *Teoriya i raschet pochvoobrabatyvayushchih mashin* [Theory and calculation of tillage machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1977. 328 p. (In Russ.)
3. Time I.A. *Osnovy rezaniya metallov i rezhushchie instrumenty* [Fundamentals of Metal Cutting and Cutting Tools]. Moscow: Mashgiz, 1962. 512 p. (In Russ.)
4. Zelenin A.N. *Osnovy razrusheniya grunfov mekhanicheskimi sposobami* [Fundamentals of Soil Destruction by Mechanical Methods]. Moscow: Mashinostroenie, 1968. 256 p.
5. Panov I.M., Vetokhin V.I. *Fizicheskie osnovy mekhaniki pochv* [Physical Foundations of Soil Mechanics]. Kyiv: Feniks, 2008. 266 p. ISBN 978-966-651-621-6. (In Russ.)
6. Sineokov G.N. *Proektirovaniye pochvoobrabatyvayushchih mashin* [Design of tillage machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1965. 311 p. (In Russ.)
7. Misirov M.Kh., Kankulova F.Kh. Definition of conditions for destruction by tensile and shear when cutting soils and grounds with a wedge. *AgroEcoInfo*. 2018;1(31):36. (In Russ.). EDN: XSUVXN
8. Misirov M. Kh. Angle of action of a tillage wedge. *Dostizheniya i perspektivy realizacii nacional'nyh proektor razvitiya APK: sb. nauch. tr. VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii pamyati professora B.H. Zherukova. Chast' 2* [Achievements and prospects for the implementation of national projects for the development of the agro-industrial complex: collection of scientific papers of the VIII International scientific and practical conference in memory of Professor B.Kh. Zherukov. Part 2]. Nalchik: FGBOU VO Kabardino-Balkarskij GAU, 2020. Pp. 88–92. (In Russ.). EDN: FHNZMM
9. Patent 2650613 Russian Federation. Int. Cl. G01N 3/24. Method for determining of the stresses strength critical factor with a solid body transverse shear. A.K. Apazhev, M.Kh. Misirov, A.Kh. Gabayev, A.M. Misirova; patent holder FGBOU VO Kabardino-Balkarskij GAU. No. 2017109045; declared 17.03.2017; publ. 16.04.2018, Bull. No. 11. 8 p. (In Russ.)

## Сведения об авторах

**Мисиров Мухамад Хусаинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 7162-6895

**Егожев Артур Мухамедович** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технической механики и физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 1074-2232, Scopus ID: 6505576211, Researcher ID: AAB-3748-2020

## Information about the authors

**Mukhamad Kh. Misirov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Mechanics and Physics, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 7162-6895

**Artyr M. Egozhev** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Technical Mechanics and Physics, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 1074-2232, Scopus ID: 6505576211, Researcher ID: AAB-3748-2020

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

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

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

---

*Статья поступила в редакцию 11.11.2025;  
одобрена после рецензирования 02.12.2025;  
принята к публикации 09.12.2025.*

*The article was submitted 15.11.2025;  
approved after reviewing 02.12.2025;  
accepted for publication 09.12.2025.*