

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-321315>

Оригинальное исследование



Сравнение различных форм лезвия поступательно движущихся почвообрабатывающих рабочих органов

А.Б. Кудзаев

Горский государственный аграрный университет, Владикавказ, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Работоспособность и энергоёмкость поступательно движущихся рабочих органов почвообрабатывающих машин во многом определяются параметрами их лезвий. При несоответствии параметров заданным условиям эксплуатации возможно забивание рабочего органа растительными остатками, а вместо менее энергоёмкого вида резания почвы — скользящего, может иметь место более энергоёмкий вид — рубящее резание. В связи с этим, для ученых, занимающихся совершенствованием конструкций поступательно движущихся в почве рабочих органов очень важно иметь методику оценки формы лезвий.

Цель — разработка методики сравнительной оценки различных форм лезвий поступательно движущихся рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Методы. В ходе работ использовались основные положения земледельческой механики, высшей математики и теоретической механики. Объектами исследования служили лезвия различных почвообрабатывающих рабочих органов, обеспечивающие скользящее резание почвы. Исследования проводились в Горском государственном аграрном университете в период с 2022 по 2023 годы. Результаты расчетов сравнивались с материалами, изложенными в соответствующих ГОСТах.

Результаты. Разработана методика, позволяющая определять относительные значения и направления равнодействующей силы сопротивления резанию почвы поступательно движущимся лезвием рабочего органа, имеющего разнообразную форму. Приведен пример применения методики для оценки эффективности лезвий садового инструмента, режущая часть которого описывается уравнением прямой линии, окружности, спирали Архимеда, логарифмической спирали и пример оценки криволинейного лезвия для плоскорежущих лап культиваторов.

Заключение. Предложенная методика оценки влияния формы поступательно движущегося плоского лезвия рабочего органа на значение сил сопротивления резанию почвы проста в использовании и может служить основой для дальнейшего развития с целью анализа эффективности формы лезвия ножей, совершающих плоско-параллельное движение.

Ключевые слова: форма лезвия; почвообрабатывающий рабочий орган; сила сопротивления резанию почвы.

Как цитировать:

Кудзаев А.Б. Сравнение различных форм лезвия поступательно движущихся почвообрабатывающих рабочих органов // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 4. С. 337–349. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-321315>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-321315>

Original Study Article

Comparison of different blade shapes of translatable moving soil tillage tools

Anatoliy B. Kudzaev

Gorsky State Agrarian University, Vladikavkaz, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The efficiency and energy capacity of translatable moving soil tillage tools are largely determined by the parameters of their blades. If the parameters do not match the specified operating conditions, clogging the working tools with plant residues becomes possible, and a less energy-consuming type of soil cutting — sliding — may be replaced with a more energy-consuming type — chopping cutting. In this regard, it is very important for scientists engaged in improving the designs of translatable moving soil tillage tools to have a method for assessing the shape of the blades.

AIMS: Development of a method for comparative assessment of various blade shapes of translatable moving soil tillage tools.

METHODS: For this study, the fundamentals of agricultural mechanics, higher mathematics, and theoretical mechanics were used. The objects of the study were the blades of various soil tillage tools, providing with sliding cutting of soil. The study was conducted at the Gorsky State Agrarian University in the period from 2022 to 2023. The calculations results were compared with the materials of the corresponding standards.

RESULTS: The method that helps to determine the relative values and directions of the resultant force of soil cutting resistance with a translatable moving blade of a soil tillage tool having a diverse shape has been developed. An example of the application of the method for assessment the effectiveness of blades of a garden tool, the cutting part of which is described by the equation of a straight line, a circle, an Archimedes spiral, a logarithmic spiral, as well as an example of assessment of a curved blade for soil tillage tools of cultivators are given.

CONCLUSIONS: The proposed method for assessing the influence of the shape of a translatable moving flat blade of the soil tillage tools on the value of soil cutting resistance forces is easy to use and can be the basis for further development in order to analyze the effectiveness of the knives' blade shape performing a plane-parallel movement.

Keywords: *shape of blade; soil tillage tools; soil cutting resistance force.*

To cite this article:

Kudzaev AB. Comparison of different blade shapes of translatable moving soil tillage tools. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;90(4):337–349.
DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-321315>

Received: 13.03.2023

Accepted: 01.06.2023

Published online: 15.09.2023

ВВЕДЕНИЕ

Форма лезвия почвообрабатывающих рабочих органов очень разнообразна и во многом определяет их работоспособность и энергоемкость. При несоответствии параметров лезвия заданным условиям эксплуатации рабочего органа возможно забивание последнего растительными остатками. Неудачно выбранные параметры приводят также к тому, что вместо менее энергоемкого вида резания почвы — скользящего, имеет место более энергоемкий вид — рубящее резание. Это хорошо видно на примере анализа конструкций ножей почвофрез, в особенности их крыльев [1]. Возникают также вопросы о влиянии формы криволинейного лезвия плоско-режущих лап культиваторов на сопротивление резанию почвы. Лапы с криволинейным лезвием получают сегодня все большее распространение и применяются на машинах известных западных брендов.

Поиску эффективной формы лезвия ножей фрез посвящено большое количество научных трудов отечественных и зарубежных ученых. Особо выделяются работы японских исследователей, которым удалось обосновать ряд важных параметров ножей, выполненных в форме спирали Архимеда [2–4], применяющихся широко в машинах японских и китайских фирм. Предложенное на основании многолетних работ исследователем J. Sakai (университет МИЭ, Япония) математическое обоснование формы кривой лезвия ножа почвофрезы [4], лежит в основе многих исследований специалистов, которые занимаются совершенствованием форм ножей, например [5]. В работе [5] также приведены три метода расчета сил, возникающих при обработке почвы роторными ножами: метод Далина А.Д. и Павлова П.В. (1950 г.); метод B.N. Ghosh (1967 г.); метод С.Р. Gupta и R. Visvanathan (1991 г.) [6, 7]. Модель А.Д. Далина и П.В. Павлова упоминается и в работе [8].

Более подробный анализ подобных методов дан в докторской диссертации Moses Okoth Marenya, выполненной в университете Претории [9].

К сожалению, опираясь на данные работы, мы не можем найти целостного ответа на вопрос о предпочтении той или иной формы лезвия рабочего органа с точки зрения снижения значений сил, возникающих при резании почвы.

Известны работы, в которых описываются попытки разработки ножей с крыльями, созданными по подобию лап обитающих в почве животных. Однако, пока такие рабочие органы не нашли применения на практике.

Отечественные ученые провели большую работу по поиску наиболее совершенной формы ножей сельскохозяйственных машин, в том числе и — почвообрабатывающих.

Изыскание оптимальной формы лезвия для ножей соломорезок и секаторов проведено академиком В.П. Горячкиным [10, 11].

Результаты изучения фрезерных почвообрабатывающих машин приведены в работе И.М. Панова [12].

В монографии профессора Ф.М. Канарева, дано обоснование параметров ножа почвофрезы с формой режущей кромки в виде логарифмической спирали [13].

Большое количество ссылок в работах индийских ученых дано на монографию профессора Г.Н. Синеокова, в которой он раскрывает некоторые вопросы резания почвы и расчета параметров культиваторов [14].

Из более поздних научных трудов можно отметить работы М.Н. Чаткина, И.П. Гаджиева, А.И. Алексеева и многих других, в которых рассматриваются, в том числе, ножи различной формы почвообрабатывающих фрез [15–17].

Несмотря на то, что процесс резания сельскохозяйственных материалов, в общем, и почвы в частности, глубоко изучен рядом известных ученых и изложен в многочисленных научных трудах, например [14, 18, 19], вопрос влияния формы лезвия ножа на сопротивление резанию почвы, до конца не раскрыт.

Ножи фрез совершают сложное, плоскопараллельное движение, осуществляют резание почвы без дополнительных упорных элементов, что существенно осложняет проведение изысканий. В связи с этим, на первом этапе работ, целесообразно рассмотреть вопрос сравнительной оценки лезвий почвообрабатывающих рабочих органов при более простом виде движения — поступательном.

На втором этапе работ, опираясь на результаты исследований первого этапа, целесообразно доработать созданную методику для определения рациональной формы кривой лезвия рабочих органов совершающих во время рабочего процесса обработки почвы плоскопараллельное движение.

Ниже приведены основные результаты исследования для первого этапа работ.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы являлось разработка методики сравнительной оценки различных форм лезвий поступательно движущихся рабочих органов почвообрабатывающих машин.

МЕТОДЫ

В ходе работ использовались основные положения земледельческой механики, высшей математики, теоретической механики.

Алгоритм исследования базируется на положениях, сформулированных в работах В.П. Горячкина, и данных, приведенных в работах Н.И. Кленына и В.А. Сакуна [20].

Дизайн исследования

Исследованиями предусматривалось: дальнейшее развитие элементов теории взаимодействия криволинейного лезвия с частицей почвы; получение

аналитических зависимостей для расчета коэффициента скольжения частиц почвы по криволинейному лезвию, результирующей силы сопротивления резанию почвы криволинейным лезвием и координаты ее приложения; длины лезвия; определение особенностей анализа лезвий выполненных в виде элемента дуги окружности, спирали Архимеда, логарифмической спирали.

Критерии соответствия

Данные кривые были отобраны нами на основании изучения трудов В.П. Горячкина, Ф.М. Канарева, J.Sakai и других ученых.

Продолжительность исследования

Исследования проводились в Горском ГАУ в период с 2022 по 2023 годы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Взаимодействие элемента криволинейного лезвия с частицей почвы

Пусть рабочий орган в виде поступательно движущегося плоского ножа, движущегося со скоростью \vec{v}_m , является симметричным относительно оси Y и состоит из двух половин — правой и левой (рис. 1).

Пусть ширина захвата рабочего органа b , а длина крыла $h_{кр}$.

Рассмотрим взаимодействие элемента лезвия расположенного на кривой OA с частицей почвы в точке K . Проведем к выделенному элементу лезвия касательную nn' , которая пересекает ось X под углом ξ (рис. 2).

Приложим к точке K вектор скорости поступательного перемещения машины \vec{v}_m .

На частицу почвы в точке K действуют: сила \vec{N} , направленная по нормали, проведенной к касательной nn' ; сила трения $\vec{F}_{тр}$, возникающая между лезвием и частицей почвы и направленная по касательной; результирующая сила \vec{R} , возникающая от совместного действия сил \vec{N} и $\vec{F}_{тр}$, и отклоненная от силы \vec{N} на угол трения почвы о материал лезвия — угол φ .

На рис. 2 также нанесены следующие обозначения величин: θ — угол поворота радиус-вектора r , проведенного к точке K из точки O , отсчет которого проводится от оси OX ; τ — угол, заключенный между радиус-вектором r и касательной nn' ; ψ — угол, заключенный между результирующей силой \vec{R} и скоростью \vec{v}_m ; ξ — угол наклона касательной nn' к оси X ; γ — угол наклона касательной nn' к оси Y .

Касательная nn' пересекает ось X в точке B . Проведем через точку B прямую mm' параллельную вектору скорости \vec{v}_m . Тогда, на рис. 2 явно видно прямое лезвие с углом $m'Bn'$, то есть, на точку K воздействует лезвие Bn' плоского ножа $m'Bn'$.

Разумно предположить, что каждый бесконечно малый элемент криволинейного лезвия воздействует на частицу почвы как прямолинейное лезвие с рабочей гранью в виде касательной, проведенной к точке взаимодействия и опорной гранью в виде прямой, параллельной вектору абсолютной скорости лезвия в точке контакта.

Данное методологическое положение является, на наш взгляд, очень важным, так как позволяет решить две задачи:

1. правильно определить условия скольжения материала по кромке лезвия;

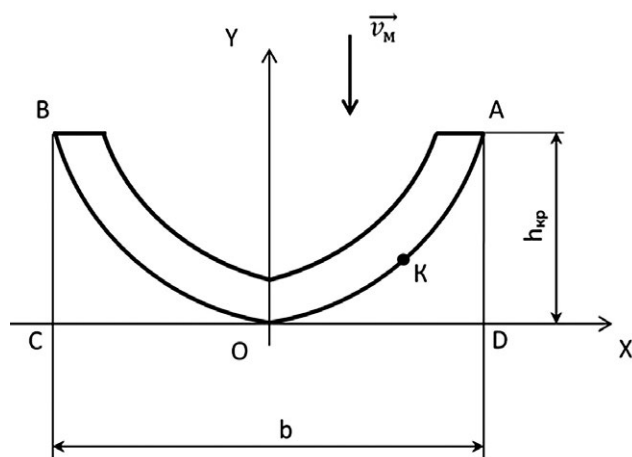


Рис. 1. Поступательно движущийся плоский нож с криволинейным лезвием.

Fig. 1. A translatory moving flat knife with a curved blade.

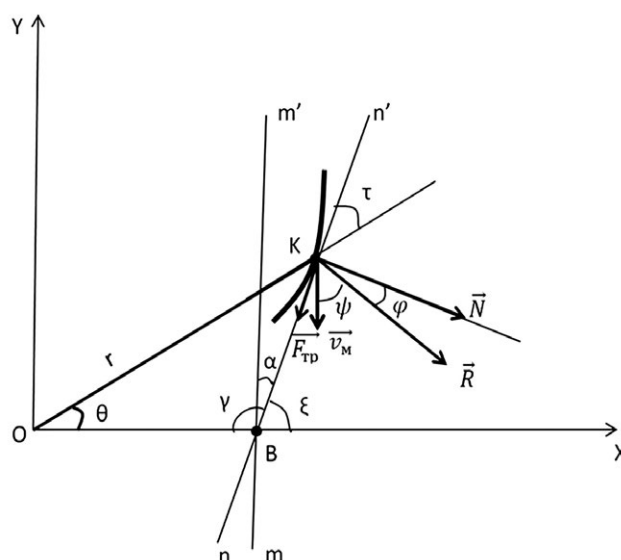


Рис. 2. Взаимодействие элемента криволинейного лезвия с частицей почвы.

Fig. 2. Interaction of a curved blade element with a soil particle.

2. зная зависимость изменения сил сопротивления резанию материала прямолинейным лезвием от угла его раствора γ , путем интегрирования по длине, определить результирующую силу сопротивления для лезвия произвольной формы.

Таким образом, далее, криволинейное плоское лезвие представляем как совокупность бесчисленного множества прямолинейных лезвий.

Из теории клина известно, что движение вверх по грани Bn' частицы почвы находящейся в точке K возможно, если

$$\psi > 0. \quad (1)$$

Используя рис. 2 и 3, можем записать условие для угла ψ :

$$\psi = \theta + \tau - \varphi > 0. \quad (2)$$

Если зависимость между величинами радиус-вектора r и угла θ выразить в полярных координатах, то можем записать [21]:

$$\tau = \arctg\left(\frac{r'}{r_\theta}\right), \quad (3)$$

где r'_θ — первая производная по координате θ выражения для радиус-вектора $r = f(\theta)$.

Принимая во внимание, что в декартовой системе координат $x = r \cdot \cos(\theta)$, $y = r \cdot \sin(\theta)$, выражение для определения угла ξ будет:

$$\xi = \arctg\left(\frac{y'}{x'}\right) = \arctg\left(\frac{r'_\theta \sin(\theta) + r \cos(\theta)}{r'_\theta \cos(\theta) - r \sin(\theta)}\right). \quad (4)$$

На рис. 3 показано лезвие OA , описываемое частью дуги кривой с радиус-векторами r_0 , r_1

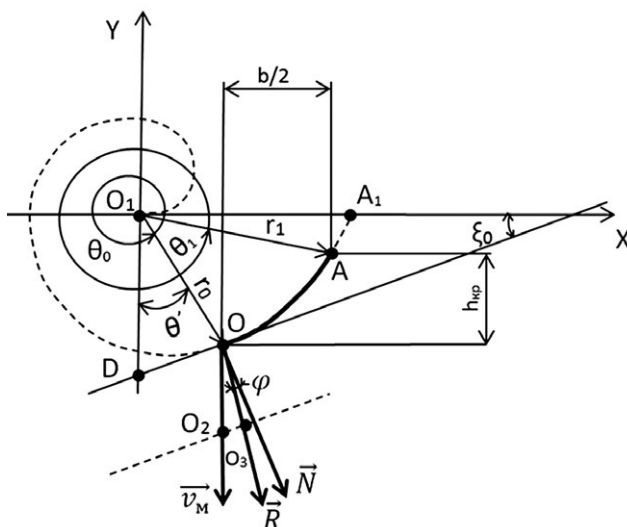


Рис. 3. Схема к определению начальных параметров лезвия рабочего органа как участка кривой $r=f(\theta)$.

Fig. 3. The scheme for determining the initial parameters of the blade of a the tillage tool as a section of the curve $r=f(\theta)$.

и соответствующими углами θ_0 и θ_1 . Для определения их значений составим соотношения:

$$r_1 \cos(\theta_1) - r_0 \cos(\theta_0) = \frac{b}{2}, \quad (5)$$

$$r_1 \sin(\theta_1) - r_0 \sin(\theta_0) = h_{кр}. \quad (6)$$

Решение нелинейных уравнений (5) и (6) при подстановке в них выражений, учитывающих вид зависимости $r=f(\theta)$, иногда вызывает большие трудности. В этом случае необходимо пользоваться численными методами.

Также полезны соотношения (рис. 3):

$$\xi = \theta' + \tau - \frac{\pi}{2}, \quad (7)$$

$$\theta' = \theta - 1,5\pi. \quad (8)$$

Коэффициент скольжения

Как известно из источника [20] коэффициент скольжения δ представляет собой отношение пути пройденного частицей почвы в относительном скольжении по лезвию к ее абсолютному перемещению. В рассматриваемом случае — это отношение расстояния $|O_2O_3|$ к расстоянию $|OO_3|$, что дает известное выражение

$$\delta = \frac{\sin(\xi - \varphi)}{\cos(\xi)},$$

которое удобно представить в виде [22]:

$$\delta = \tg(\xi) \cdot \cos(\varphi) - \sin(\varphi). \quad (9)$$

Для прямолинейного лезвия значение δ одинаково в любой точке, что нельзя сказать о криволинейном.

Для расчета значения δ , используя «теорему о среднем» [23], умножим правую и левую части выражения (9) на $d\theta$, затем заменим $\tg(\xi)$ на выражение из равенства (4), и проинтегрируем обе части получившегося выражения в пределах от θ_0 до θ_1 .

В итоге, зависимость для расчета среднего значения $\delta_{ср}$ коэффициента скольжения будет:

$$\delta_{ср} = \frac{\cos(\varphi)}{\theta_1 - \theta_0} \int_{\theta_0}^{\theta_1} \left[\frac{r'_\theta \sin(\theta) + r \cos(\theta)}{r'_\theta \cos(\theta) - r \sin(\theta)} \right] d\theta - \sin(\varphi). \quad (10)$$

Определение силы сопротивления резанию для сравнительного анализа лезвий различной формы

В качестве отправной точки примем графическую зависимость нормальной силы, возникающей при резании почвы, лезвиями с различными углами ξ , приведенную в [20], которая хорошо согласуется с материалами исследований изложенных в публикациях [18, 24].

Для прямого лезвия удельная нагрузка на единицу длины лезвия q_N постоянна по всей его длине и сила N изменяется прямо пропорционально удельной нагрузке. Примем, что максимальное значение нормальной силы $N_{\max}=1\text{Н}$, а длина лезвия составляет 1 см, то есть нагрузка $q_{N\max}=1\text{ Н/см}$. Тогда, изменение силы N в зависимости от изменения угла ξ означает и соответствующее изменение нагрузки q_N .

Участок кривой для промежутка $\xi \in \left[\varphi; \frac{\pi}{2}\right]$ мы можем описать полиномом.

Расчеты показывают, что зависимость между нагрузкой q_N и углом ξ хорошо аппроксимируется полиномом второй степени (коэффициент $R^2=0,999$):

$$q_N = a_0 + a_1\xi + a_2\xi^2, \quad (11)$$

где a_0, a_1, a_2 — коэффициенты: $a_0 = 1,469$; $a_1 = -1,6287$; $a_2 = 0,4429$.

Пусть нагрузка q_N действует на участок лезвия длиной dl . Тогда, возникает элементарная сила $dN = q_N \cdot dl$. Выразив длину dl , согласно рекомендациям [1] и подставив ее и выражение (11) в зависимость для dN , проинтегрировав полученное выражение в пределах от θ_0 до θ_1 , получим:

$$N = \int_{\theta_0}^{\theta_1} [a_0 + a_1\xi + a_2\xi^2] \sqrt{(r'_\theta)^2 + r^2} d\theta. \quad (12)$$

При проведении анализа конкретной кривой, описывающей форму лезвия, в формулу (12) необходимо вместо угла ξ подставлять соответствующее выражение, отражающее зависимость между углами ξ и θ для рассматриваемого случая.

Далее, необходимо определить значение угла θ_N , соответствующее положению радиус-вектора r , проведенного к точке приложения силы N .

Сила N должна быть приложена в центре тяжести эпюры q_N . Так как мы используем полярные координаты, то формула для определения угла расположения центра тяжести θ_N будет:

$$\theta_N = \frac{\int_{\theta_0}^{\theta_1} [a_0 + a_1\xi + a_2\xi^2] \theta d\theta}{\int_{\theta_0}^{\theta_1} [a_0 + a_1\xi + a_2\xi^2] d\theta}. \quad (13)$$

Дальнейший расчет заключается в определении значений сил:

- трения

$$F_{\text{тр}} = N \cdot \text{tg}(\varphi), \quad (14)$$

- результирующей $R_{\text{л}}$, от действия сил N и $F_{\text{тр}}$:

$$R_{\text{л}} = N \sqrt{1 + \text{tg}^2(\varphi)}, \quad (15)$$

- в случае, если рабочий орган имеет два симметрично расположенных лезвия, суммарное значение сопротивления R_c :

$$R_c = 2R_{\text{л}} \cdot \cos(\theta_N - \varphi). \quad (16)$$

Следует особо отметить, что для того, чтобы результаты расчета отражали не относительные значения сил, а близкие к наблюдаемым в реальности, необходимо опытным путем определить экспериментальную зависимость $q_N = f(\xi)$ для рассматриваемого типа почвы с учетом характеристик лезвия (угол заточки, ширина фаски и т.д.).

Для сравнительной же оценки, можно ограничиться единичной нагрузкой.

Длина лезвия $L_{\text{л}}$ рассчитывается общепринятым методом:

$$L_{\text{л}} = \int_{\theta_0}^{\theta_1} \sqrt{(r'_\theta)^2 + r^2} d\theta. \quad (17)$$

Если рабочий орган содержит правое и левое симметричные лезвия, то полученное значение необходимо умножить на 2.

В справочной литературе [21] приведены значения выражения (17).

Исходные данные для анализа формы лезвия

Исходными данными являются: ширина захвата рабочего органа b ; длина крыла рабочего органа $h_{\text{кр}}$; функциональная зависимость вида $y=f(x)$ или $r=f(\theta)$. Начальным значением угла ξ_0 задаемся из условия $\xi_0 > \varphi$.

Выбор для исследования форм режущих кромок плоских лезвий

Академик В.П. Горячкин изучал различные кривые, применение которых, на первый взгляд, рационально для описания формы режущих кромок лезвий вращающихся ножей, предназначенных для подпорного резания соломы и ветвей плодовых деревьев [10, 11]. Им были положительно отмечены окружность и спираль Архимеда, отрицательно — гиперболическая и логарифмическая спирали. Принимая во внимание, что логарифмическая спираль рекомендуется рядом ученых для использования при проектировании ножей почвообрабатывающих машин [13], выведем аналитические зависимости, необходимые для расчета относительных значений сил сопротивления резания почвы, для случаев исполнения

режущей кромки лезвий в виде окружности, спирали Архимеда и логарифмической спирали.

Анализ выбранных форм режущих кромок плоского лезвия. Окружность

Отсчет угла θ будем вести от вертикальной оси Y , разделяющей третий и четвертый квадранты координатной плоскости. Тогда, углы $\theta_0 = \xi_0$, $\theta = \xi$.

Воспользовавшись равенствами (5) и (6), получим выражение для расчета значения радиуса окружности $r_{\text{окр}}$:

$$r_{\text{окр}} = \frac{\frac{b^2}{4} + h_{\text{кр}}^2}{2h_{\text{окр}} \cdot \cos(\xi_0) - b \cdot \sin(\xi_0)}. \quad (18)$$

Пусть $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0$. Вычислив расстояние $|OA|$, определим выражение для расчета значений $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = 2 \arcsin \left[\left(\frac{b}{4r_{\text{окр}}} \right)^2 + \left(\frac{h_{\text{окр}}}{2r_{\text{окр}}} \right)^2 \right]^{0,5}. \quad (19)$$

Угол θ_1 :

$$\theta_1 = \xi_0 + \Delta\theta. \quad (20)$$

Решение уравнений (10), (12) и (13) дает следующие зависимости:

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{\cos(\varphi)}{\theta_1 - \theta_0} \cdot \left\{ \ln[\cos(\theta_0)] - \ln[\cos(\theta_1)] \right\} - \sin(\varphi), \quad (21)$$

$$N = r_{\text{окр}} \cdot \left[a_0(\theta_1 - \theta_0) + a_1 \left(\frac{\theta_1^2}{2} - \frac{\theta_0^2}{2} \right) + a_2 \left(\frac{\theta_1^3}{3} - \frac{\theta_0^3}{3} \right) \right], \quad (22)$$

$$\theta_N = \frac{a_0 \left(\frac{\theta_1^2}{2} - \frac{\theta_0^2}{2} \right) + a_1 \left(\frac{\theta_1^3}{3} - \frac{\theta_0^3}{3} \right) + a_2 \left(\frac{\theta_1^4}{4} - \frac{\theta_0^4}{4} \right)}{a_0(\theta_1 - \theta_0) + a_1 \left(\frac{\theta_1^2}{2} - \frac{\theta_0^2}{2} \right) + a_2 \left(\frac{\theta_1^3}{3} - \frac{\theta_0^3}{3} \right)}. \quad (23)$$

Далее проводятся расчеты по формулам (14)–(17).

Спираль Архимеда

Уравнение спирали Архимеда в полярных координатах:

$$r = k\theta, \quad (24)$$

где k — параметр спирали, равный (рис. 3),

$$k = \frac{r}{2\pi} = \frac{|O_1 A_1|}{2\pi}.$$

Принимая во внимание (3) и опираясь на рис. 3 и 4, можем записать равенство:

$$\theta_0 + \arctg(\theta_0) - 2\pi - \xi_0 = 0. \quad (25)$$

Решение (25) позволяет определить значение θ_0 .

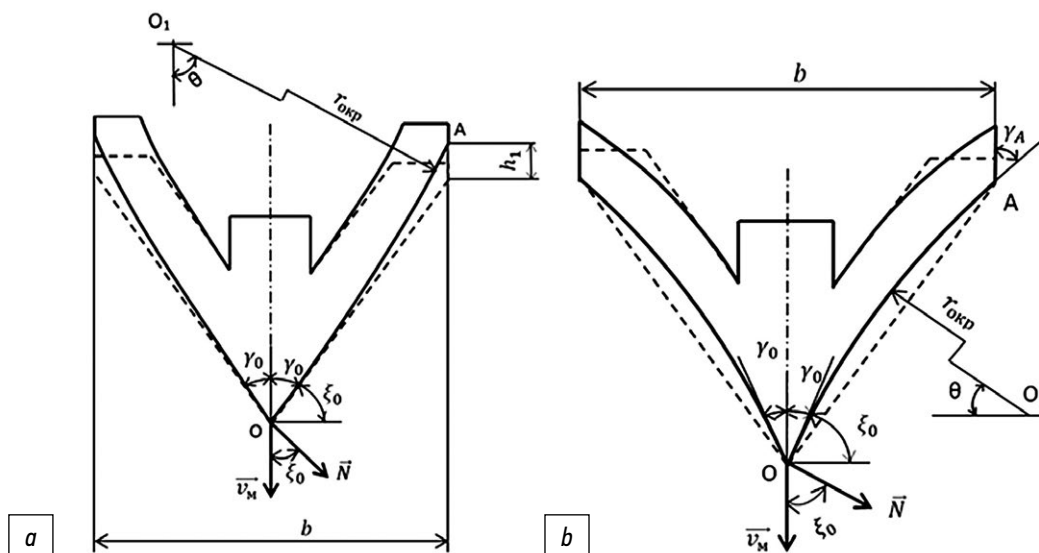


Рис. 4. Плоскорежущие лапы с формой кромки лезвия в виде дуги окружности: *a* — с выпуклой кромкой лезвия; *b* — с вогнутой кромкой лезвия.

Fig. 4. Flat-cutting hoe of a cultivator with the circular arc shape of the blade edge: *a* — with a convex edge of the blade; *b* — with a concave edge of the blade.

Воспользовавшись равенствами (6) и (24) получим выражение для расчета коэффициента k :

$$k = \frac{h_{кр}}{\theta_1 \cdot \sin(\theta_1) - \theta_0 \cdot \sin(\theta_0)}. \quad (26)$$

Подставив (26) в (5) получим нелинейное уравнение:

$$\theta_1 \cdot \cos(\theta_1) - E\theta_1 \cdot \sin(\theta_1) - F = 0, \quad (27)$$

где

$$E = \frac{b}{2h_{кр}}, \quad F = \theta_0 \cdot \cos(\theta_0) - E\theta_0 \cdot \sin(\theta_0).$$

Решение (27) лучше производить численным методом, после чего, по формуле (26) вычислить значение коэффициента k .

Интегралы, входящие в формулы (10), (12) и (13), также, удобнее вычислять численным методом.

Длину лезвия определяем при помощи формулы, приведенной в [21].

Логарифмическая спираль

Уравнение логарифмической спирали в полярной системе координат можно записать в виде:

$$r = a \cdot e^{k\theta}, \quad (28)$$

где a — коэффициент; k — параметр логарифмической спирали; e — основание натурального логарифма.

Если спираль раскручивается против часовой стрелки, то $k > 1$, если по часовой стрелке, то $k < 1$.

По формуле (3) определяем угол τ :

$$\tau = \arctg\left(\frac{1}{k}\right).$$

Угол ξ , который равен углу между векторами \vec{N} и \vec{v} определяется согласно

$$\xi = \theta + \arctg\left(\frac{1}{k}\right) - 2\pi. \quad (29)$$

При заданном значении ξ_0 формула (29) позволяет определить значение θ_0 .

Решая численным методом уравнение (5) или (6) находим значение угла θ_1 .

Далее, методом подбора можно определить значения коэффициента a и параметра k при которых кривая будет проходить через точки O и A (рис. 3).

С помощью равенства (10) получим выражение для расчета значения δ_{cp} :

$$\delta_{cp} = \frac{\cos(\varphi)}{\theta_1 - \theta_0} \cdot \int_{\theta_0}^{\theta_1} \frac{k \cdot \sin(\theta) + \cos(\theta)}{k \cdot \cos(\theta) - \sin(\theta)} d\theta - \sin(\varphi). \quad (30)$$

Решение (12) позволяет получить выражение для расчета силы N :

$$N = \frac{z_3}{k} (e^{k\theta_1} - e^{k\theta_0}) + \frac{z_4}{k^2} [e^{k\theta_1} (k\theta_1 - 1) - e^{k\theta_0} (k\theta_0 - 1)] + z_5 \left[e^{k\theta_1} \left(\frac{\theta_1^2}{k} - \frac{2\theta_1}{k^2} + \frac{2}{k^3} \right) - e^{k\theta_0} \left(\frac{\theta_0^2}{k} - \frac{2\theta_0}{k^2} + \frac{2}{k^3} \right) \right], \quad (31)$$

где коэффициенты z_i равны:

$$z_1 = \arctg\left(\frac{1}{k}\right) - 2\pi, \quad z_2 = a\sqrt{1+k^2},$$

$$z_3 = z_2 (a_0 + a_1 z_1 + a_2 z_1^2), \quad z_4 = (a_1 + 2a_2 z_1) z_2,$$

$$z_5 = a_2 z_2.$$

Вычисляя интегралы в (13), находим выражение для расчета значений угла θ_N :

$$\theta_N = \frac{z_6 \left(\frac{\theta_1^2}{2} - \frac{\theta_0^2}{2} \right) + z_7 \left(\frac{\theta_1^3}{3} - \frac{\theta_0^3}{3} \right) + a_2 \left(\frac{\theta_1^4}{4} - \frac{\theta_0^4}{4} \right)}{z_6 (\theta_1 - \theta_0) + z_7 \left(\frac{\theta_1^2}{2} - \frac{\theta_0^2}{2} \right) + a_2 \left(\frac{\theta_1^3}{3} - \frac{\theta_0^3}{3} \right)}, \quad (32)$$

где

$$z_6 = a_0 + a_1 z_1 + a_2 z_1^2, \quad z_7 = a_1 + 2z_1 a_2.$$

Длина режущей кромки лезвия:

$$L_{л} = \frac{\sqrt{1+k^2}}{k} a (e^{k\theta_1} - e^{k\theta_0}). \quad (33)$$

Рассмотрим применение предложенной методики на двух примерах.

Пример 1. Сравнение различных форм лезвий для садово-огородного инструмента

Для инструмента, предназначенного для перекапывания почвы, важным является легкость его внедрения в почву и количество последней, остающейся необработанной. На рис. 1 площадь необработанной почвы после полного погружения лезвия, будет представлять собой два криволинейных треугольника $\triangle OBC$ и $\triangle OAD$.

Исходные данные для расчета: ширина захвата инструмента $b=210$ мм; угол наклона касательной к правой части лезвия в точке O — угол $\xi_0=30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$; начальное значение длины крыла рабочего органа (рис. 1) $h_{кр}$ обусловлено углом ξ_0 ; величину $h_{кр}$ изменяем до 180 мм с шагом 20 мм. В качестве контроля принимаем прямое лезвие.

Результаты расчета, полученные с учетом зависимостей (14)–(33) приведены в таблице 1.

Второй вариант таблицы принят как контрольный, так как при значении угла $\xi_0 = 30^\circ$, имеем скользящее резание. Соответственно, значения R_c , $L_{\text{лрo}}$ и $S_{\text{нс}}$ для этого варианта приняты за 100%.

Как видно из таблицы, самое большое относительное суммарное значение сопротивления резанию наблюдается у прямого лезвия ($\xi_0 = 0^\circ$). Затем, с увеличением угла ξ значение R_c уменьшается, а значения коэффициента скольжения $\delta_{\text{ср}}$ возрастают.

Пример 2. Форма лезвия для плоскорежущих лап культиваторов

Параметры плоскорежущих лап культиваторов изложены в ГОСТ 1343-82. Выберем лапу с параметрами: ширина захвата $b = 260$ мм; угол раствора лапы $\gamma = 35^\circ$, ширина конца крыла $b_l = 50$ мм. Примем этот вариант как контрольный.

Лезвие крыла культиваторной лапы можно выполнить по дуге окружности двумя способами, в результате чего оно будет иметь выпуклую или вогнутую кромку (рис. 4).

При выпуклой кромке лезвия (рис. 4а), по мере перемещения сорняков от центра лапы к краю, условия для их схода улучшаются. Лапы с подобным лезвием выпускаются в Китае и Индии.

Исходные данные: $\gamma = 35^\circ$, угол $\xi_0 = \frac{\pi}{2} - \gamma = 55^\circ$. Высота крыла составляет 185,7 мм.

При вогнутой схеме кромки лезвия (рис. 4б) имеем более острый клин вблизи носка лапы, что может положительно отразиться на тяговом сопротивлении рабочего органа. Лезвия, соответствующие данной схеме, применяются на лапах культиваторов различных фирм: Will Rich, Case, John Deere, Krause и т.д.

При создании выреза по окружности для таких лезвий, следует обратить особое внимание на значение угла наклона касательной в бесконечной близости к точке А. Этот угол должен обеспечить беспрепятственный сход сорняков с лезвия. Примем его равным 45° . Значением угла γ будем варьировать. Необходимо учесть,

что для этой схемы угол $\xi = \frac{\pi}{2} - \theta$.

Результаты расчетов по контрольному варианту и обеим схемам представлены в таблице 2.

Значения суммарной силы R_c и суммарной длины лезвия L_c по базовому варианту примем за 100%.

Как видно из таблицы, контрольный вариант имеет довольно высокое значение коэффициента скольжения ($\delta = 0,831$) и небольшое значение суммарной длины лезвия L_c .

Расчеты показывают, что выпуклая форма обеспечивает высокие значения $\delta_{\text{ср}}$, которые находятся в диапазоне 0,899–1,2. Можно отметить, что с ростом среднего

значения коэффициента скольжения $\delta_{\text{ср}}$ наблюдается, по сравнению с контролем, снижение суммарной силы сопротивления резанию R_c с 3,9% до 15,14%. Прирост длины режущей кромки лезвия составляет 27,8–46,7%.

При вогнутой форме кромки лезвия лапы и значения угла $\gamma_0 = 25$ – 30° , возникают более высокие значения силы R_c чем при выпуклой форме, что обусловлено менее выгодными значениями угла θ_N , а следовательно, и направлением силы N .

ОБСУЖДЕНИЕ

Резюме основного результата исследования

Как видим, применение предложенной методики сравнения плоских лезвий различной формы позволяет решать различные практические задачи.

Обсуждение основного результата исследования

Если внимательно посмотреть на результаты расчетов по примеру 1, то можно заметить, что у лезвий в виде дуги окружности, спирали Архимеда и логарифмической спирали, с ростом длины крыла рабочего органа уменьшаются значения радиуса окружности и значения силы R_c (см. табл. 1). При этом возрастают значения коэффициента скольжения $\delta_{\text{ср}}$.

Если построить графические зависимости $R_c = f(\delta_{\text{ср}})$ и $L_c = f(\delta_{\text{ср}})$ для случая исполнения лезвия в виде дуги окружности, то видно, что интенсивное снижение суммарной силы R_c наблюдается при средних значениях коэффициента скольжения $\delta_{\text{ср}} \approx 0,43$ – $0,67$ и в этом же промежутке значений $\delta_{\text{ср}}$ пересекаются кривые графика. Длина лезвия увеличивается на 48,3% по сравнению с длиной в варианте 2 (см. табл. 1). Изложенное означает, что при заданных значениях параметров b и ξ_0 длина крыла более 120 мм становится нерациональной.

Сравнивая ближайшие к контролю варианты 3, 5, 12 и 18 между собой, отметим, что при одних и тех же значениях необработанной площади, криволинейное лезвие в вариантах 5, 12 и 18 обеспечивает снижение суммарного значения силы резания R_c по сравнению с вариантом 3 на 4%, а по сравнению с вариантом 2 — на 13,5%.

Полученные соотношения размеров для ручного садово-огородного инструмента очень хорошо согласуются с материалами ГОСТ 19596-87.

Результаты расчетов позволяют также заключить, что при поступательном движении рабочего органа и заданных значениях его ширины захвата b , начального значения угла наклона касательной ξ_0 и длины крыла $h_{\text{кр}}$, лезвия в форме дуги окружности, спирали Архимеда и логарифмической спирали имеют приблизительно одинаковую длину и обеспечивают возникновение близких значений сил сопротивления резанию.

Таблица 1. Результаты расчета некоторых характеристик лезвий различной формы симметричного садово-огородного инструмента шириной захвата $b=210$ мм

№ п/п	Начальное значение угла наклона касательной ξ_0 , град	Длина крыла раб. органа $h_{кр}$, мм	Радиус окружн. $r_{окр}$, мм	Параметр спирали k	Коэффициент спирали a	Козфф. скольжения $\delta_{ср}$	Суммарная сила R_c		Суммарная длина лезвия, $L_{лро}$		Необработ. площадь $S_{ис}$, см ²	
							абсолютное значение, Н	отклонение от базового варианта, ±%	абсолютное значение, мм	отклонение от базового варианта, ±%	абсолютное значение, см ²	отклонение от базового варианта, ±%
Контроль (прямое лезвие)												
1	0	0	–	–	–	0	21	+5	210	-13,4	0	-100
2	30	60,6	–	–	–	0,069	20,0	0	242,5	0	63,6	0
3	35	73,5	–	–	–	0,179	18,1	-9,5	256,3	+5,7	77,2	+21,4
4	40	88,1	–	–	–	0,303	16,3	-18,5	274,1	+13	92,4	+45,3
Окружность, $r=const$												
5	30	81	497	–	–	0,181	17,3	-13,5	266	+9,7	77,19	+21,4
6	30	88	395,2	–	–	0,316	16,6	-17	275,4	+13,6	81,46	+28,1
7	30	100	307,9	–	–	0,437	15,6	-22	292,6	+20,7	88,21	+38,7
8	30	120	247	–	–	0,673	14,5	-27,5	324,7	+33,9	97,7	+53,6
9	30	140	222,6	–	–	0,987	13,8	-31	359,7	+48,3	104,8	+64,8
10	30	160	212,7	–	–	1,498	13,4	-33	397	+63,7	109,3	+71,9
11	30	180	210	–	–	3,516	13,3	-33,5	436,1	+79,8	111	+74,5
Спираль Архимеда, $r=k\theta$												
12	30	81	–	8,95	–	0,180	17,26	-13,7	266,3	+9,8	77,18	+21,4
13	30	88	–	7,12	–	0,314	16,52	-17,4	275	+13,4	81,3	+27,8
14	30	100	–	5,54	–	0,431	15,54	-22,3	292,8	+20,7	88,26	+38,8
15	30	120	–	4,42	–	0,655	14,37	-28,2	324,8	+33,9	98,14	+54,3
16	30	140	–	3,94	–	0,945	13,64	-31,8	359,4	+48,2	105,5	+65,9
17	30	155	–	3,78	–	1,242	13,37	-33,2	387	+59,6	109,6	+72,3
Логарифмическая спираль, $r=ae^{k\theta}$												
18	30	81	–	0,15	32	0,178	18,1	-9,5	255,9	+5,5	71,96	+13,1
19	30	88	–	0,15	17,05	0,311	16,6	-17	275	+13,4	81,34	+27,9
20	30	100	–	0,15	13,2	0,433	15,6	-22	292	+20,4	88,28	+38,8
21	30	120	–	0,15	10,5	0,66	14,4	-28	325	+34	98,16	+54,3
22	30	140	–	0,2	6,96	0,934	13,7	-31,5	359	+48	105,9	+66,5
23	30	155	–	0,4	1,855	1,145	13,3	-33,5	387	+59,6	111,9	+75,9

В связи с этим, при выборе формы кривой для лезвия поступательно движущегося рабочего органа можно ограничиться окружностью, что значительно упростит проектные работы.

Анализ образцов садово-огородного инструмента, имеющегося на рынке, показывает, что очень многие из них имеют лезвия в виде дуги окружности.

Весьма содержательными являются материалы таблицы 2, из которых видно, что в принятом нами диапазоне изменения угла γ , выпуклая форма кромки лезвия обеспечивает более интенсивное снижение силы сопротивления резанию R_c , чем вогнутая.

По сравнению с контролем, при $\gamma_0=20^\circ$ вогнутая форма обеспечивает снижение силы R_c уже на 7,86%. Очевидно, по этой причине, применяемые сегодня на практике зарубежные образцы плоскорежущих лап с вогнутой формой режущей кромки лезвия имеют значения угла γ , близкие к вышеуказанному.

В завершение, особо отметим положение, изложенное в книге профессора Г.Н. Синеокова [14], в которой

он приводит расчеты по снижению тягового сопротивления рабочего органа при росте угла γ . С другой стороны, он отмечает важность уменьшения угла γ для обеспечения схода сорняков с крыльев лапы. Из нашего примера, мы видим, что при сохранении начального значения угла γ_0 форма лезвия по схеме 4а будет способствовать снижению опасности скапливания сорняков в конце крыльев лапы.

Ограничения исследования

Тем не менее, ввиду того, что плоскорежущая лапа представляет собой пространственный клин, окончательное решение о целесообразности применения той или иной формы лезвия для обработки конкретного типа почвы, должно приниматься только на основании полевых испытаний опытных образцов рабочих органов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана простая методика оценки влияния формы поступательно движущегося плоского лезвия

Таблица 2. Результаты расчета некоторых характеристик лезвия плоскорежущих лап культиваторов шириной захвата 260 мм

Table 2. Calculation results of some indicators of the blade of flat-cutting hoes of cultivators with a grip width of 260 mm

№ п/п	Угол раствора γ , град		Параметр h_1 , мм	Радиус окружности $r_{\text{окр}}$, мм	Коэффициент скольжения $\delta_{\text{ср}}$	Суммарная сила R_c		Сумм. длина лезвия, $L_{\text{дро}}$	
	начальное значение, γ_0	конечное значение, γ_A				абсолютное значение, Н	отклонение от базового варианта, ±%	абсолютное значение, мм	отклонение от базового варианта, ±%
Контрольный вариант									
1	35	–	–	–	0,831	14,0	100	367,5	100
Схема 4а									
2	35	–	10	4803	0,899	13,45	- 3,9	469,5	+ 27,8
3	35	–	20	2575	0,971	13,0	- 7,14	486,4	+32,35
4	35	–	30	1839	1,044	12,57	- 10,21	503,7	+37,06
5	35	–	40	1475	1,121	12,2	- 12,9	521,2	+41,82
6	35	–	50	1260	1,20	11,88	- 15,14	539	+46,7
Схема 4б									
7	30	45	–	869,5	0,738	16,13	+ 15,2	454,6	+23,7
8	25	45	–	653	0,872	14,4	+ 2,3	455,6	+24,0
9	20	45	–	52,4	1,043	12,9	- 7,86	456,9	+24,3

на значение сил сопротивления резанию почвы. Рассмотрены два примера ее использования.

Установлено, что при поступательном движении лезвия, заданных значениях ширины захвата и длины его крыла, начальном значении угла наклона касательной, лезвие в форме дуги окружности является одним из эффективных, а простой математический аппарат, разработанный для оценки этой формы, значительно упрощает проектные работы.

Данная методика, может служить основой для дальнейшего ее развития с целью анализа эффективности формы лезвия ножей, совершающих при обработке почвы более сложное — плоско-параллельное движение.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад автора. А.Б. Кудзаев — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, редактирование текста рукописи, создание изображений. Автор подтверждает соответствие своего авторства международным

критериям *ICMJE* (автор прочел и одобрил финальную версию рукописи перед публикацией).

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведенным исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Author's contribution. A.B. Kudzaev — search for publications, writing the text of the manuscript, editing the text of the manuscript, creating images. The author read and approved the final version of the manuscript before publication.

Competing interests. The author declares that there is no conflict of interest.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрезерные ножи и ротационные зубы. Каталог фирмы «INDUSTRIEHOF Scherenbostel». [дата обращения: 28.02.2023] Доступ по ссылке: <https://www.industriehof.com/ru/catalogue/c2/c10/>
2. Sakai J. Theoretical Approach to the Hand Tractor of Rotary Tillage // JARQ. 1974. Vol. 8. № 3. P. 153–158. [дата обращения: 28.02.2023] Доступ по ссылке: https://www.jircas.go.jp/sites/default/files/publication/jarq/08-3-153-158_0.pdf
3. Sakai J. Designing Process and Theories of Rotary Blades for Better Rotary Tillage (Part 1) // JARQ. 1978. Vol. 12, N 2. P. 86–93. [дата обращения: 28.02.2023] Доступ по ссылке: https://www.jircas.go.jp/sites/default/files/publication/jarq/12-2-086-093_0.pdf
4. Sakai J., Shibata J., Tagushi T. Design Theory of Edg-Curves for Rotary Blades of Tractors // Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery. 1976. Vol. 38, N 2. P. 183–190. doi: 10.11357/jsam1937.38.183
5. Ju J.-S., Luan J.-M., Cheng C.-W. Trajectory Angles and Cultivating Dynamics for Tiller Blades // Journal of Agricultural Machinery. 2004. Vol. 13, N 1. P. 1–15. doi: 10.30062/JAM.200403.0001
6. Ghosh B.N. The power requirement of a rotary cultivator // Journal of Agricultural Engineering Research. 1967. Vol. 12, N 1. P. 5–12.
7. Gupta C.P., Visvanathan R. Dynamic behavior of saturated soil under impact loading // Trans. ASAE. 1991. Vol. 36, N 4. P. 1001–1007.
8. Mandal S.K., Bhattacharyya B., Mukherjee S., et al. Design Optimization of Rotary Tiller Blade using Specific Energy Requirement // International Journal of Current Engineering and Technology. 2016. Vol. 6, N 4. P. 1257–1263. doi: 10.14741/Ijcet/22774106/6.4.2015.31
9. Marenja M.O. Performance characteristics of a deep tilling rotavator [Internet]. Pretoria: University of Pretoria, 2009. [дата обращения: 01.03.2023] Доступ по ссылке: <https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/25458/Complete.pdf?sequence=7&isAllowed=y>
10. Горячкин В.П. Теория соломорезки и силосорезки // Собрание сочинений: в 3-х т. М.: Колос, 1968. Т.3. С. 68–113.
11. Горячкин В.П. Теория ручных ножниц и основные принципы их построения // Собрание сочинений: в 3-х т. М.: Колос, 1968. Т. 3. С. 120–133.
12. Панов И.М. Механико-технологические основы расчёта и проектирования почвообрабатывающих машин с ротационными рабочими органами: дисс. ... д-ра техн. наук. Москва, 1983.
13. Канарев Ф.М. Ротационные почвообрабатывающие машины и орудия. М.: Машиностроение, 1983.
14. Синекоков Г.Н. Проектирование почвообрабатывающих машин. М.: Машиностроение, 1965.
15. Алексеев А.И. Обоснование параметров фрезы для обработки почвы к посадке картофеля: дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2021.
16. Драняев С.Б., Чаткин М.Н., Корявин С.М. Моделирование работы винтового Г-образного ножа почвообрабатывающей фрезы // Тракторы и сельхозмашины. 2017. Т. 84. №7. С. 13–19. doi: 10.17816/0321-4443-66315
17. Гаджиев П.И., Славкин В.И., Алексеев А.И., и др. Исследование работы почвообрабатывающей фрезы с зубчатым лезвием ножей // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина. 2020. № 1 (95). С.14–18. doi: 10.34677/1728-7936-2020-1-14-18
18. Резник Н.Е. Теория резания лезвия и основы расчета режущих аппаратов. М.: Машиностроение, 1975.
19. Панов И.М., Ветохин В.И. Физические основы механики почв. Киев: Феникс, 2008.
20. Кленин Н.И. Сакун В.А. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. М.: Колос, 1980.
21. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1964.

22. Маматов Ф.М., Мирзаев Б.С. Теория резания лезвием и расчет плосковращательных ножей дискового типа. Ташкент: Изд-во Академии наук Республики Узбекистан, 2013.

23. Зельдович Я.Б. Высшая математика для начинающих. М.: Физматгиз, 1960.

REFERENCES

1. Milling knives and rotary teeth. Catalog of the company "INDUSTRIEHOF Scherenbostel". Accessed: 28.02.2023. Available from: <https://www.industriehof.com/ru/catalogue/c2/c10/>
2. Sakai J. Theoretical Approach to the Hand Tractor of Rotary Tillage. *JARQ*. 1974;8(3):153–158. Accessed: 28.02.2023. Available from: https://www.jircas.go.jp/sites/default/files/publication/jarq/08-3-153-158_0.pdf
3. Sakai J. Designing Process and Theories of Rotary Blades for Better Rotary Tillage (Part 1). *JARQ*. 1978;12(2):86–93. Accessed: 28.02.2023. Available from: https://www.jircas.go.jp/sites/default/files/publication/jarq/12-2-086-093_0.pdf
4. Sakai J, Shibata J, Tagushi T. Design Theory of Edg-Curves for Rotary Blades of Tractors. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*. 1976;38(2):183–190. doi: 10.11357/jsam1937.38.183
5. Ju J-S, Luan J-M, Cheng C-W. Trajectory Angles and Cultivating Dynamics for Tiller Blades. *Journal of Agricultural Machinery*. 2004;13(1):1–15. doi: 10.30062/JAM.200403.0001
6. Ghosh BN. The power requirement of a rotary cultivator. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1967;12(1):5–12.
7. Gupta CP, Visvanathan R. Dynamic behavior of saturated soil under impact loading. *Trans. ASAE*. 1991;36(4):1001–1007.
8. Mandal SK, Bhattacharyya B, Mukherjee S, et al. Design Optimization of Rotary Tiller Blade using Specific Energy Requirement. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2016;6(4):1257–1263. doi: 10.14741/ijcet/22774106/6.4.2015.31
9. Marenja MO. Performance characteristics of a deep tilling rotavator [Internet]. Pretoria: University of Pretoria; 2009. Accessed: 28.02.2023. Available from: <https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/25458/Complete.pdf?sequence=7&isAllowed=y>
10. Goryachkin VP. *Theory of straw cutters and silage cutters. Collected works*: in 3 vols. Moscow: Kolos; 1968;3:68–113. (in Russ).
11. Goryachkin VP. *The theory of hand scissors and the basic principles of their construction. Collected works*: in 3 vols. Moscow: Kolos; 1968;3:120–133. (in Russ).

24. Погоров Т.А. Теоретическое обоснование бесподпорного резания стеблей растений шнековым режущим аппаратом с горизонтальной осью вращения // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2016. № 2 (22). С.177–191.

12. Panov IM. *Mekhaniko-tehnologicheskie osnovy rascheta i proektirovaniya pochvoobra-batyvayushchikh mashin s rotatsionnymi rabochimi organami* [dissertation] Moscow; 1983. (in Russ).
13. Kanarev FM. *Rotary tillage machines and implements*. Moscow: Mashinostroenie; 1983. (in Russ).
14. Sineokov GN. *Design of tillage machines*. Moscow: Mashinostroenie; 1965. (in Russ).
15. Alekseev AI. *Obosnovanie parametrov frezy dlya obrabotki pochvy k posadke kartofe-lya* [dissertation] Moscow; 2021. (in Russ).
16. Dranyaev SB, Chatkin MN, Koryavin SM. Modeling the operation of a screw L-shaped knife of a tiller. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2017;84(7):13–19. (in Russ). doi: 10.17816/0321-4443-66315
17. Gadzhiev PI, Slavkin VI, Alekseev AI, et al. Study of the work of a tillage cutter with a serrated blade of knives. *Vestnik FGOU VPO MGAU im VP Goryachkina*. 2020;1(95):14–18. (in Russ). doi: 10.34677/1728-7936-2020-1-14-18
18. Reznik NE. *Blade cutting theory and basics of cutting tools calculation*. Moscow: Mashinostroenie; 1975. (in Russ).
19. Panov IM, Vetokhin VI. *Physical foundations of soil mechanics*. Kyiv: Feniks; 2008. (in Russ).
20. Klenin NI, Sakun VA. *Agricultural and reclamation machines*. Moscow: Kolos; 1980. (in Russ).
21. Bronstein IN, Semendyaev KA. *Handbook of mathematics for engineers and students of higher educational institutions*. Moscow: Nauka; 1964. (in Russ).
22. Mamatov FM, Mirzaev BS. *Theory of cutting with a blade and the calculation of plano-rotating disk-type knives*. Tashkent: Izd-vo Akademii nauk Respubliki Uzbekistan; 2013. (in Russ).
23. Zeldovich YaB. *Higher Mathematics for Beginners*. Moscow: Fizmatgiz; 1960. (in Russ).
24. Pogorov TA. Theoretical substantiation of unsupported cutting of plant stems by a screw cutting device with a horizontal axis of rotation. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*. 2016;2(22):177–191. (in Russ).

ОБ АВТОРЕ

Кудзаев Анатолий Бештауович,

д-р техн. наук,

профессор кафедры «Технические системы в агробизнесе»;

адрес: Российская Федерация, Республика Северная Осетия-Алания, 362001, Владикавказ, ул. Кирова, д. 37;

ORCID: 0000-0001-5973-9932;

eLibrary SPIN: 2310-4400;

e-mail: akudzaev@rambler.ru

AUTHOR'S INFO

Anatoliy B. Kudzaev,

Dr. Sci. (Tech),

Professor of the Technical Systems in Agribusiness Department;

address: 37 Kirova street, 362001 Vladikavkaz,

Russian Federation;

ORCID: 0000-0001-5973-9932;

eLibrary SPIN: 2310-4400;

e-mail: akudzaev@rambler.ru