

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.2.183-191>
УДК 631.314:612



Теоретические предпосылки к бионическому обоснованию параметров рабочих органов стерневого культиватора

© 2019. А.Ф. Бабицкий, И.В. Соболевский, В.А. Ку克林

Академия биоресурсов и природопользования ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского», г. Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация

В южных регионах России наибольшее распространение получила минимальная технология возделывания зерновых культур в варианте раздельного сева. В связи с этим возникла необходимость в создании эффективных рабочих органов стерневого культиватора с принципиально новыми ресурсосберегающими способами воздействия на обрабатываемую среду и отвечающих требованиям современных прогрессивных технологий. Совершенствование форм поверхностей рабочих органов культиваторов проводилось с учетом механико-бионического подхода. Основные параметры зубчатой режущей поверхности определили методом бионических сравнений, выбрав в качестве бионического прототипа жука-скарабея. Использование зубчатой формы поверхности режущей кромки согласуется с бионическим принципом многоконтактного воздействия и приводит к тому, что вершины зубьев становятся концентраторами напряжений и при значительно меньшем усилии вдавливания вызывают процессы разрушения почвы, что обеспечивает снижение затрат энергии на подрезание пласта почвы. Оптимальная криволинейная форма рабочей поверхности, выполненная в виде логарифмической спирали, характеризуется неизменным значением угла между нормалью и радиус-вектором, и величина этого угла, равная углу внутреннего трения почвы φ_2 , будет обеспечивать скольжение почвы и растительных остатков с минимальной энергоемкостью. Аналитически обоснованы количество ($n = 4$), высота ($h = 5...7$ мм) и шаг расстановки зубьев ($S = 10...12$ мм) носка долота стерневого культиватора. Предлагается форма профиля рабочей поверхности долота стерневого культиватора в виде логарифмической спирали с переменным углом крошения. Экспериментальные исследования проводили в период с сентября по октябрь 2018 г. в почвенном канале научно-исследовательской лаборатории бионической агроинженерии кафедры механизации и технического сервиса в АПК. Они показали снижение тягового сопротивления предложенного рабочего органа стерневого культиватора на 16,5% в сравнении с тяговым сопротивлением серийного образца.

Ключевые слова: рыхление почвы, биологический прототип, жук-скарабей, параметры, мощность, тяговое сопротивление

Для цитирования: Бабицкий Л.Ф., Соболевский И.В., Ку克林 В.А. Теоретические предпосылки к бионическому обоснованию параметров рабочих органов стерневого культиватора. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2019;20(2):183-191. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.2.183-191>.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Министерства образования, науки и молодежи Республики Крым в рамках научного проекта № 18-48-910001.

Theoretical background for the bionic substantiation of parameters of the stubble cultivator working bodies

© 2019. Leonid F. Babitsky, Ivan V. Sobolevsky, Vladimir A. Kuklin

Academy of Bioresources and Environmental Management (Academic Unit) of V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Republic of Crimea, Russian Federation

In the southern regions of Russia, the technology of cultivation of grain crops in the variant of partial sowing has been widely used. In this regard, it became necessary to create effective working bodies of a stubble cultivator that would have fundamentally new resource-saving ways of influencing the area under cultivating and meet the requirements of modern advanced technologies. The shapes of the working bodies surfaces of the cultivators were improved taking into account the mechanic-bionic approach. The main parameters of the toothed cutting surface were determined by the method of bionic comparisons, with a scarab beetle as a bionic prototype. Use of the serrated shape of the cutting edge is consistent with the bionic principle of multi-contact exposure and leads to the fact that the tops of the teeth become stress concentrators and, with a significantly smaller indentation force, cause soil destruction processes, which reduces the energy costs of cutting the soil layer. The optimal curvilinear shape of the working surface made in the form of a logarithmic spiral, is characterized by a constant value of the angle between the normal and the radius vector, and the value of this angle, equal to the angle of internal friction of the soil φ_2 , will ensure the sliding of the soil and plant residues with minimal energy consumption. The number ($n = 4$), height ($h = 5...7$ mm) and tooth placement step ($S = 10...12$ mm) of the bit tip of the stubble cultivator are analytically justified. The shape of the profile of the working surface of the stubble cultivator bit in the form of a logarithmic spiral with a variable angle of crumbling is proposed. The studies were conducted in the period from September to October 2018 in the soil channel of the research Laboratory of Bionic Agroengineering of the Department of Mechanization and Technical Service in Agro-Industrial Complex. They have shown the decrease in the traction resistance of the proposed working body of the stubble cultivator by 16.5% in comparison with the traction resistance of the serial sample.

Key words: soil loosening, biological prototype, scarab beetle, parameters, power, traction resistance

For citation: Babitsky L.F., Sobolevsky I.V., Kuklin V.A. Theoretical background for the bionic substantiation of parameters of the stubble cultivator working bodies. *Agrarnaya nauka Euro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2019;20(2):183-191. (In Russ.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.2.183-191>.

Для южных регионов России наибольшее применение получила минимальная технология возделывания зерновых культур в варианте раздельного сева. Ее применение обусловлено возникновением большого разрыва между уборкой зерновых и их последующим посевом во избежание высыхания и затвердевания почвы.

Для данной технологии, в полной мере удовлетворяющей предъявляемым агротехническим требованиям, применимы стерневые культиваторы. Стерневые культиваторы часто используются для обработки почвы перед посевом и ухода за парами [1].

Однако, как показывает анализ существующих конструкций рабочих органов стерневых культиваторов и теоретических исследований [2, 3], основные теоретические разработки были направлены на изучение деформации почвы плоскорежущими органами. Само влияние формы плоскорежущего лезвия на качественные показатели обработки почвы определялось на основе методов теоретической механики, механики грунтов и экспериментальными способами. Однако при обосновании формы плоскорежущих рабочих органов методами теоретической механики невозможно полностью объяснить и учесть все основные явления, которые возникают в почве при воздействии на неё рабочим органом. Появляется необходимость создания эффективных рабочих органов стерневого культиватора с принципиально новыми ресурсосберегающими способами воздействия на обрабатываемую среду и отвечающих требованиям прогрессивных технологий.

Решение задач по совершенствованию форм поверхностей рабочих органов культиваторов предлагается на основе применения механико-бионического подхода, позволяющего аналитически описать их форму и параметры [4].

Цель исследований – разработка теоретических предпосылок к бионическому обоснованию параметров рабочих органов стерневого культиватора.

Материал и методы. Глубокий анализ влияния геометрической формы рабочих органов на сопротивление почвы был проведён В.П. Третьяком¹. Используя принципы вари-

ционного исчисления, он теоретически доказал, что при небольших сечениях рабочих органов их поперечное сечение можно принять отдельными прямыми линиями, при этом для уменьшения их сопротивления рекомендуется это сечение выполнить по криволинейной форме. С целью лучшего крошения почвы боковая форма рыхлителя должна быть выполнена по логарифмической кривой. Такая форма бионического профиля удовлетворяет условиям концентрации усилий в одной точке, что благоприятствует эффективному крошению почвы [5].

Однако остаётся нерешенным вопрос применения методов теоретических исследований с использованием закономерностей живой природы. Как показывает анализ выполненных нами теоретических исследований [6], наиболее актуальным, применительно к решению данного вопроса, является использование многоконтактного воздействия рабочих органов на почву. Применяв системный подход, с учетом биологической системы «почва-растение-атмосфера», можно обосновать оптимальные геометрические формы рабочих органов стерневого культиватора с приданием им некоторых свойств, а также характеристик живых организмов. Экспериментальные исследования проводили в период с сентября по октябрь 2018 г. в почвенном канале научно-исследовательской лаборатории бионической агроинженерии кафедры механизации и технического сервиса в АПК.

Объектом теоретического исследования является технологический процесс взаимодействия рабочих органов стерневого культиватора с почвой.

Результаты и их обсуждение. Поисковые исследования показали, что особого внимания заслуживает обоснование параметров рабочих органов стерневого культиватора по подобию роющих конечностей биологических прототипов с определением количества зубьев, их высоты, шага расстановки и формы рабочей поверхности лап.

Особый интерес для бионического сравнения рабочих органов стерневого культиватора, по характеру жизнедеятельности, представляет биологический прототип жука-скарabei (*Scarabaeus*)² (рис. 1).

¹ Третьяк В.П. Влияние формы рабочих органов, движущихся в почве, на тяговое сопротивление. В сб.: Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. Киев, 1967. Вып. 7. С. 18-28.

² Свободная энциклопедия Википедия, Скарabei. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki>.

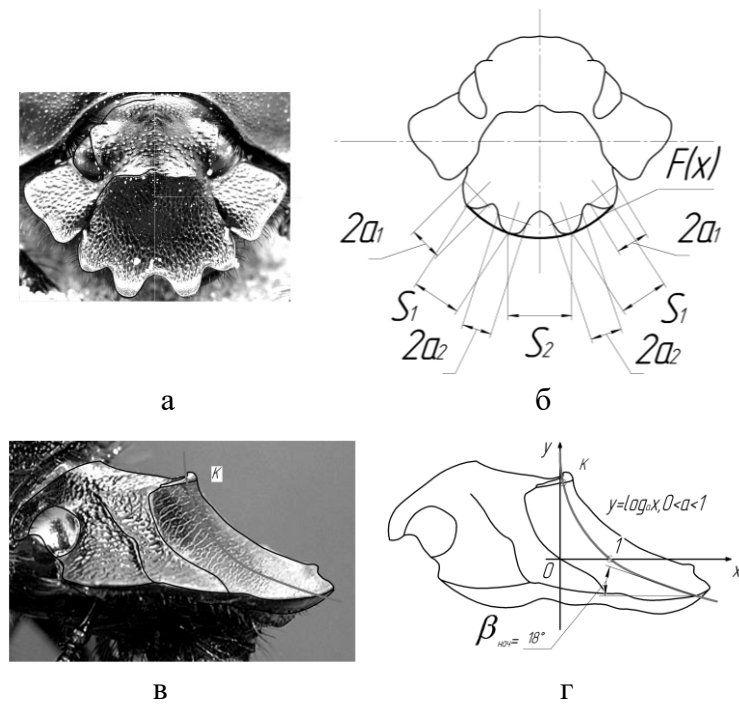


Рис. 1. Жук-скарабей (*Scarabaeus*): а) вид головы с 4 зубцами; б) проекция головы спереди; в) вид головы сбоку; г) проекция головы сбоку
Fig. 1. Scarab-beetle (*Scarabaeus*): a) view of the head, with 4 teeth; b) front projection of the head; c) side view of the head; d) side projection of the head

Основные функции рыхления у жука-скарабея выполняют передние конечности и веерный вид челюсти. Такой физический вид бионического прототипа позволит адаптировать элементы его морфологического строения с развитыми рыхлительными способностями к обоснованию элементов конструкции рабочего органа стернового культиватора [6].

В процессе работы стернового культиватора его рабочие органы, совершая поступательное движение, должны обеспечивать подрезание и крошение пласта почвы с минимальной энергоемкостью и с соблюдением агротехнических требований к качеству обработки. Оптимальную форму рабочего органа можно обосновать, применяя методы механики сплошной среды в сочетании с принципами бионического моделирования и рассматривая напряженно-деформированное состояние почвы³ [7, 8].

Использование зубчатой формы поверхности режущей кромки согласуется с бионическим принципом многоконтактного воздействия и приводит к тому, что вершины зубьев становятся концентраторами напряжений и при значительно меньшем усилии вдавливания

вызывают процессы деформации и разрушения почвы. Это приводит к снижению затрат энергии на подрезание пласта почвы [4, 7]. Основные параметры зубчатой режущей поверхности определяли методом бионических сравнений, выбрав в качестве бионического прототипа жука-скарабея. Голова жука-скарабея имеет две пары роющих зубцов: центральных и боковых, расположенных симметрично относительно продольной оси и характеризующихся полушириной a_1 и a_2 , коэффициентами расстановки k_1 и k_2 с шагами S_1 и S_2 (рис. 1). В результате измерений установлено, что коэффициенты расстановки центральных k_1 и боковых k_2 зубьев, соответственно, равны 0,3 и 0,22. Отношение полуширины зубьев составило:

$$k_3 = \frac{a_2}{a_1} = 1,17.$$

Учитывая, что зубья на рабочей поверхности носка долота (рис. 2) расположены по дуге окружности длиной Δl и радиусом $R_{сп}$, в первом приближении, запишем:

$$\Delta l = 2S_1 + S_2 + 2a_1, \quad (1)$$

где S_1 и S_2 – шаг расстановки зубьев.

³Синеоков Г.Н., Панов И.М. Теория и расчёт почвообрабатывающих машин. М.: «Машиностроение», 1977. 328 с.

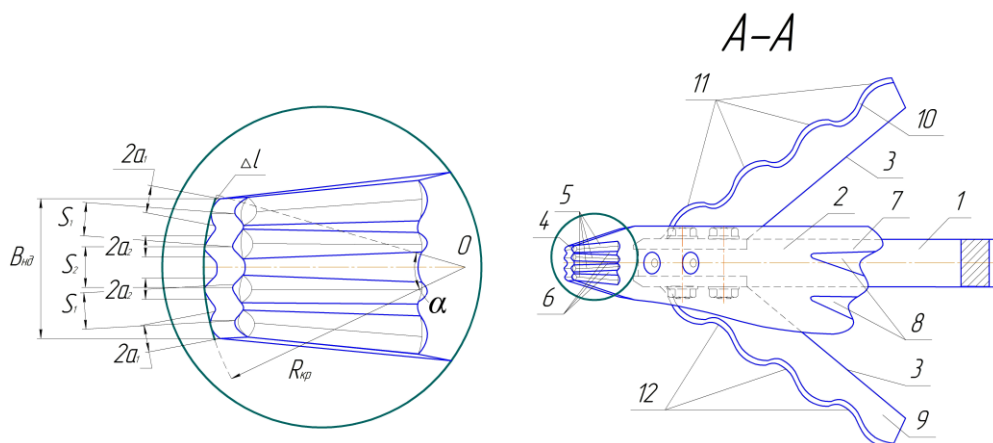


Рис. 2. Рабочий орган стерневого культиватора, сечение А-А

Fig. 2. Working body of a stubble cultivator, section A-A

Эту же длину дуги Δl выразим через радиус $R_{кр}$ и ширину носка $B_{нд}$:

$$\Delta l = 2R_{кр} \arcsin\left(\frac{B_{нд}}{2R_{кр}}\right). \quad (2)$$

Приравнявая выражения (1) и (2), а также учитывая, что $k_1 = \frac{a_1}{S_1}$, $k_2 = \frac{a_2}{S_2}$, получим зависимость для определения полуширины центральных зубьев:

$$a_1 = \frac{R_{кр} \arcsin\left(\frac{B_{нд}}{2R_{кр}}\right)}{\frac{1}{k_1} + \frac{k_3}{2k_2} + 1}. \quad (3)$$

Тогда полуширина боковых зубьев:

$$a_2 = k_3 \cdot a_1. \quad (4)$$

При этом шаг расстановки зубьев определяли как:

$$S_1 = \frac{a_1}{k_1}, \quad S_2 = \frac{a_2}{k_2}. \quad (5)$$

Высоту зубьев определили из выражения:

$$\text{- для центральных } H_{31} = k_{H1} \cdot a_1, \quad (6)$$

$$\text{- для боковых } H_{32} = k_{H2} \cdot a_2, \quad (7)$$

где k_{H1} и k_{H2} – коэффициенты высоты зубьев.

На обоснование формы долота существенно влияет величина угла крошения β , характеризующего взаимодействие рабочего органа с почвой. Чем меньше его значение, тем хуже долото крошит почву, но тем ниже величина его тягового сопротивления. На начальном этапе, когда происходит внедрение зубчатой режущей кромки в необработанные слои и первоначальное подрезание пласта, значение угла β должно быть небольшим и находиться в диапазоне $\beta_{нач} = 18...22^\circ$ (рис. 3), что обеспечивает достаточную заглубляемость рабочего

органа при минимально возможной энергоёмкости^{3,4}. При этом роющие зубы жука-скарабея, выбранного в качестве бионического прототипа, характеризуются значением $\beta_{нач} = 17...19^\circ$, что согласуется с приведенными данными.

Оптимальная криволинейная форма рабочей поверхности, выполненная в виде логарифмической спирали, обеспечивает постоянство угла между нормалью и радиус-вектором, и величина этого угла, равная углу внутреннего трения почвы φ_2 , будет обеспечивать скольжение почвы и растительных остатков с минимальной энергоёмкостью [9].

Дальнейшее крошение подрезанного пласта почвы можно обеспечить путем постепенного увеличения угла крошения β при сохранении режима скольжения частиц почвы и растительных остатков по рабочей поверхности, но при достижении критического значения угла $\beta_{кон}$ будет наблюдаться значительный рост тягового сопротивления рабочего органа, обусловленный прекращением скольжения и возникновением явления «сгуживания» почвы [10, 11].

Как видно из расчетной схемы (рис. 3), скольжение по рабочей поверхности возможно в случае, если величина касательной составляющей нормального давления \overline{N}_τ превышает силу внешнего трения \overline{F}_{mp} . Величину критического угла крошения $\beta_{кон}$ можно определить из равенства \overline{N}_τ и \overline{F}_{mp} (рис. 2):

$$N \cdot \operatorname{tg}(90 - \beta_{кон}) = N \cdot \operatorname{tg} \varphi_1. \quad (8)$$

Откуда:

$$\beta_{кон} = 90 - \varphi_1. \quad (9)$$

⁴Горячкин В.П. Собрание сочинений: в 3-х т. М.: Колос, 1965. Т.1. 720 с.; Т. 2. 459 с.

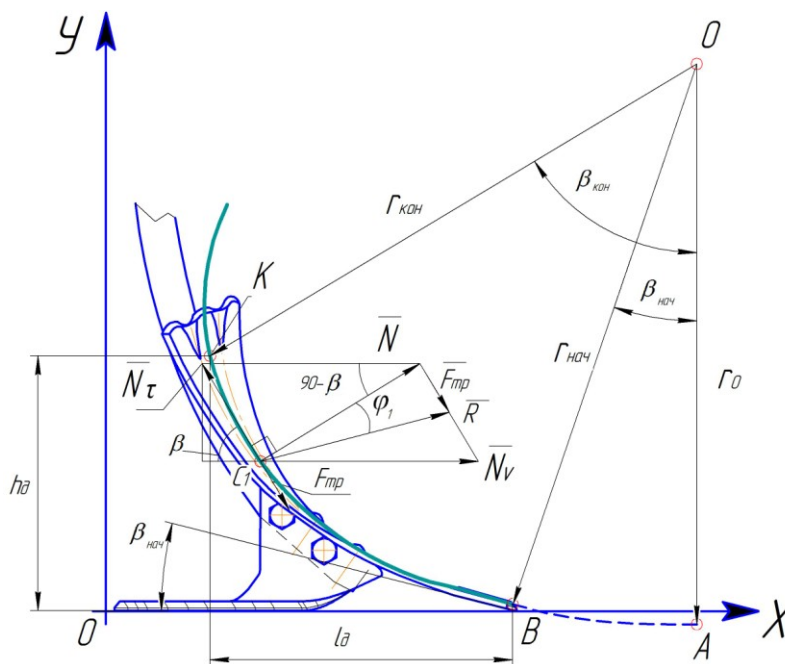


Рис. 3. Расчётная схема к обоснованию конструктивных параметров долота рабочего органа стерневого культиватора

Fig. 3. Calculation model to substantiate the design parameters of the bit of the stubble cultivator working body

Выше критической точки K будет начинаться оборот подрезанного пласта почвы, что недопустимо.

Уравнение логарифмической спирали, описывающей форму профиля рабочей поверхности в полярных координатах, имеет вид [5]:

$$r_i = r_0 \cdot e^{\theta_i \cdot \text{tg} \varphi_2}, \quad (10)$$

где r_0 – нулевой радиус-вектор; e – основание натурального логарифма; θ_i – текущий полярный угол; φ_2 – угол внутреннего трения почвы.

Располагая нулевой радиус-вектор вертикально в соответствии со схемой на рисунке 3 получили, что величина текущего полярного угла θ_i на участке BC_1K будет совпадать с углом крошения β профиля лапы. Точка B соответствует носку долота и определяется полярным углом $\beta_{нач}$, а точка K – точке окончания логарифмического профиля долота с соответствующим углом $\beta_{кон}$.

Подставив в уравнение (10) координаты точек B и K , получим:

$$\begin{cases} r_{нач} = r_0 \cdot e^{\beta_{нач} \cdot \text{tg} \varphi_2}; \\ r_{кон} = r_0 \cdot e^{\beta_{кон} \cdot \text{tg} \varphi_2}. \end{cases} \quad (11)$$

Исключая нулевой радиус-вектор r_0 из системы уравнений (11), будем иметь:

$$r_{кон} = r_{нач} \cdot e^{(\beta_{кон} - \beta_{нач}) \cdot \text{tg} \varphi_2}. \quad (12)$$

Высота криволинейного участка долота h_∂ должна быть равна глубине обработки $h_{обр}$ и, в соответствии с расчётной схемой, определяется:

$$h_\partial = h_{обр} = r_{нач} \cdot \cos \beta_{нач} - r_{кон} \cdot \cos \beta_{кон}. \quad (13)$$

С учетом выражения (11), получили:

$$h_{обр} = r_{нач} \cdot (\cos \beta_{нач} - e^{(\beta_{кон} - \beta_{нач}) \cdot \text{tg} \varphi_2} \cdot \cos \beta_{кон}). \quad (14)$$

Преобразовав выражение (14), получили начальный радиус-вектор:

$$r_{нач} = \frac{h_{обр}}{\cos \beta_{нач} - e^{(\beta_{кон} - \beta_{нач}) \cdot \text{tg} \varphi_2} \cdot \cos \beta_{кон}}. \quad (15)$$

Подставляя выражение (15) в (11) выразим нулевой радиус-вектор:

$$r_0 = \frac{h_{обр}}{(\cos \beta_{нач} - e^{(\beta_{кон} - \beta_{нач}) \cdot \text{tg} \varphi_2} \cdot \cos \beta_{кон}) \cdot e^{\beta_{нач} \cdot \text{tg} \varphi_2}}. \quad (16)$$

Таким образом, уравнение для построения формы профиля рабочей поверхности долота стерневого культиватора будет иметь вид:

при $\beta_{нач} < \beta < \beta_{кон}$

$$r_i = \frac{h_{обр}}{(\cos \beta_{нач} - e^{(\beta_{кон} - \beta_{нач}) \cdot \text{tg} \varphi_2} \cdot \cos \beta_{кон}) \cdot e^{\beta_{нач} \cdot \text{tg} \varphi_2}} \cdot e^{\beta \cdot \text{tg} \varphi_2}. \quad (17)$$

Длину проекции логарифмической части долота определили по выражению:

$$l_{\partial} = r_{\text{кон}} \cdot \sin \beta_{\text{кон}} - r_{\text{нач}} \cdot \sin \beta_{\text{нач}} \quad (18)$$

С учётом выражения (12):

$$l_{\partial} = r_{\text{нач}} \cdot (\sin \beta_{\text{кон}} - e^{(\beta_{\text{кон}} - \beta_{\text{нач}}) \cdot \text{tg } \varphi_2} \cdot \sin \beta_{\text{нач}}). \quad (19)$$

С учётом выражения (13):

$$l_{\partial} = \frac{h_{\text{обр}} (\sin \beta_{\text{кон}} - e^{(\beta_{\text{кон}} - \beta_{\text{нач}}) \cdot \text{tg } \varphi_2} \cdot \sin \beta_{\text{нач}})}{\cos \beta_{\text{нач}} - e^{(\beta_{\text{кон}} - \beta_{\text{нач}}) \cdot \text{tg } \varphi_2} \cdot \cos \beta_{\text{кон}}}. \quad (20)$$

Выполнение верхней части долота в виде зубчатого крошащего профиля обеспечит

создание знакопеременных нагрузок в поперечном сечении пласта и обеспечит минимальную энергоёмкость при наиболее интенсивном его крошении перед сходом с рабочего органа [12]. В соответствии с расчетной схемой (рис. 4, б) на участках АВ и ВС пласт почвы испытывает растягивающие напряжения, а на участках СД и ДЕ – сжимающие. В точках перегиба А, С и Е будут возникать разрушающие пласт почвы напряжения изгиба. По бионическому прототипу жука-скарабея (*Scarabaeus*) разработана конструкция стерневого культиватора (рис. 4, а) [13].

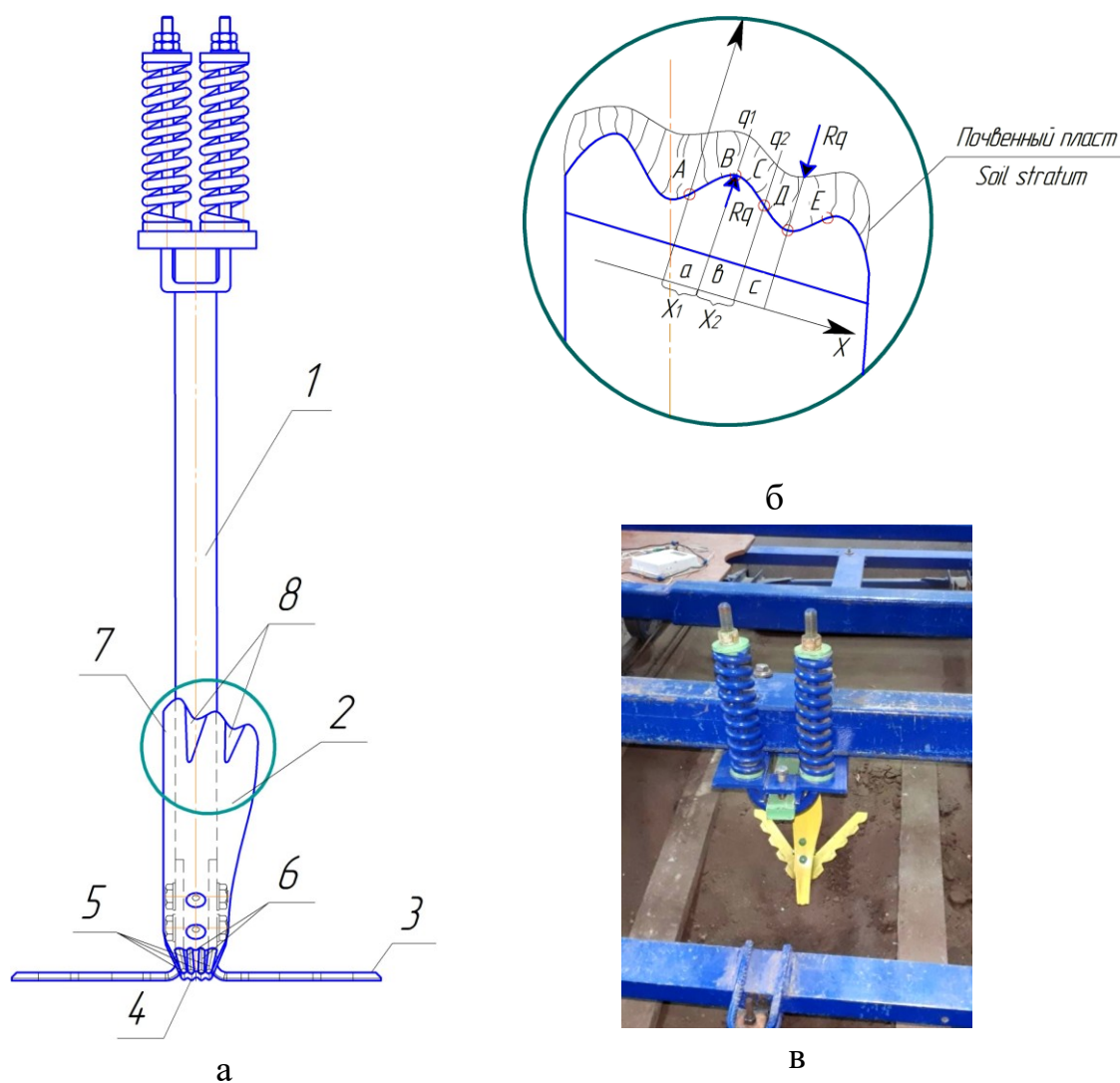


Рис. 4. Рабочий орган стерневого культиватора: а) вид спереди; б) схема движения почвенного пласта по верхней части долота; в) натурный образец рабочего органа стерневого культиватора в почвенном канале

Fig. 4. Working body of a stubble cultivator: a) front view; b) the scheme of movement of the soil layer along the upper part of the bit; c) full-scale sample of the working body of a stubble cultivator in the soil channel

Рабочий орган стерневого культиватора содержит С-образную стойку 1 (рис. 4 а, б) с долотом 2 и крыльями 3. Режуще-крошащее долото 2 расположено в нижней части стойки 1. Оно выполнено расширяющимся снизу вверх по форме логарифмической кривой и имеет в активной своей части зубчатую переднюю режущую кромку 4 (рис. 4, 2) с тремя продольными выступами 5 (рис. 2) округлой формы и двумя продольными впадинами 6 округлой формы.

Также долото имеет заднюю зубчатую крошащую кромку 7 с двумя продольными впадинами 8, имеющими коническую форму. На стойке 1 установлены крылья 3. Их рабочая поверхность 9 и режущая кромка 10 выполнены в виде четырёх зубьев 11 и трёх впадин 12 (рис. 2), имеющих формы синусоиды.

Экспериментальная проверка основных показателей работы пружинного выравнивателя почвы (рис. 4, в), выполненная в почвенном канале экспериментальной лаборатории ка-

федры «Механизация и технический сервис в АПК» АБиП КФУ им. В.И. Вернадского, подтвердила целесообразность его использования.

Среднее значение твердости почвы составило $p = 180 \text{ Н/см}^2$, деформационного показателя почвы $-v = 2,27 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{Н}$.

В ходе проведения экспериментальных проходов исследовали характер взаимодействия экспериментального рабочего органа стерневого культиватора с почвой в сравнении с рабочим органом серийного культиватора КПЭ-3,8 [14].

На рисунке 5 показаны графические зависимости тягового сопротивления рабочего органа стерневого культиватора от скорости движения в сравнении с серийным рабочим органом.

Тип выравниваемой почвы – чернозем южный карбонатный среднесуглинистый. В процессе проведения испытаний в почвенном канале среднее значение влажности почвы составило 16%.

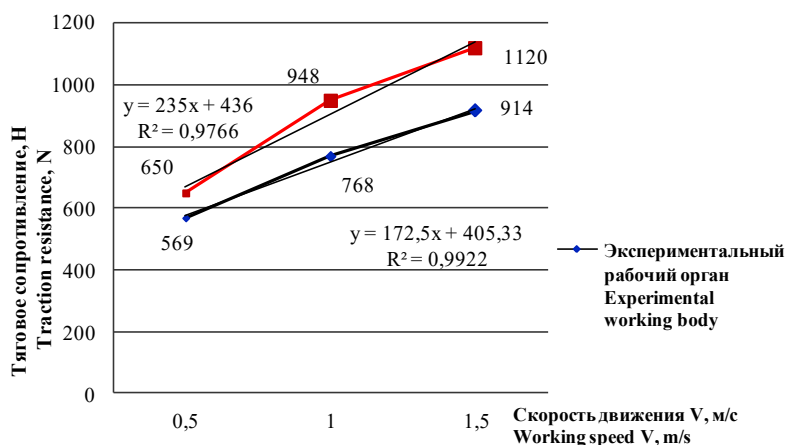


Рис. 5. График зависимости тягового сопротивления рабочих органов от скорости движения при глубине обработки 12 см

Fig. 5. Graph of dependence of traction resistance of the working bodies on the speed at a processing depth of 12 cm

Анализируя данные графической зависимости, можно сделать вывод, что на рост величины тягового сопротивления рабочего органа большее влияние оказывает скорость обработки почвы. Тяговое сопротивление предложенного рабочего органа меньше на 16,5%, чем тяговое сопротивление серийного образца. Это объясняется тем, что волнистые лезвия крыльев лапы и долота снижают тяговое сопротивление рабочего органа при работе.

Выводы. 1. В соответствии с биосистемным подходом, а также на основании усовершенствованной в результате теоретических исследований функциональной схемы, разработана новая конструкция стерневого культиватора (заявка на изобретение РФ № 2017107589).

2. На основе анализа особенностей строения бионического прототипа жука-скарабея аналитически обоснованы: количество ($n = 4$), высота ($h = 10...14 \text{ мм}$) и шаг расстановки ($S = 14...16 \text{ мм}$) зубьев носка долота

3. При анализе лобовой части головы жука-скарабея аналитически обоснована форма профиля рабочей поверхности долота стерневого культиватора в виде логарифмической спирали с переменным углом крошения.

3. Экспериментальные исследования показали снижение тягового сопротивления предложенного рабочего органа стерневого культиватора на 16,5% в сравнении тяговым сопротивлением серийного образца.

Список литературы

1. Шапоров А.Н., Трубилин Е.И. Обзор конструкций серийных культиваторов для стерневой обработки почвы. Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сб. статей по материалам X Всероссийского конф. молодых ученых, посвящ. 120-летию И.С. Косенко. 2017. С. 654-655. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29131296>.
2. Маслов Г.Г., Юдина Е.М., Журий И.А. Эффективность поверхностной обработки почвы стерневым многофункциональным культиватором. Тракторы и сельхозмашины. 2018;(3):7-11.
3. Бекетов В.Г. Повышение урожайности яровой пшеницы с применением ресурсосберегающей сеялки-культиватора точного высева. Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2013;(5):122-125. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19012049>.
4. Бабицкий Л.Ф., Москалевич В.Ю., Соболевский И.В. Развитие бионического направления в земледельческой механике. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2017;(4):68-74. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29739684>.
5. Пикмуллин Г.В., Булгариев Г.Г. Методика проектирования формы рабочего органа культиватора для предпосевной обработки почвы. Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2011;6(1):107-109. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15618929>.
6. Бабицкий Л.Ф., Соболевский И.В., Яланузян А.А. Обоснование параметров стерневого культиватора по бионическому подобию. Дни науки крымского федерального университета им. В. И. Вернадского: сб. тр. III научной конф. профессорско-преподавательского состава, аспирантов, студентов и молодых ученых. Симферополь: Крымский ФУ, 2018. С. 117-119. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32599667>.
7. Jianqiao L., Yunpeng Y., Benard C., Xuejiao W., Zhaoliang W., Meng Z. Bionic Design for Reducing Adhesive Resistance of the Ridger Inspired by a Boar's Head. Applied Bionics and Biomechanics. 2017. Article ID 8315972, 10 p. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/8315972>.
8. Liu R., Yao J.H., Zhang Q.L., Collier R. Sliding wear and solid-particle erosion resistance of a novel high-tungsten Stellite alloy. Wear. 322–323 (2015) 41–50.
9. Слободян С.М., Романишин А.Е., Романишина С.А. Скольжение почвы по режущему элементу рабочего органа. Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014;(7):146-153. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21812965>.
10. Сыромятников Ю.Н. Повышение эффективности технологического процесса движения почвы по лемеху почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины. Сельское хозяйство. 2017;(1): 48-55. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28880486>.
11. Chirende B, Li J Q, Wen L G, et al. Effects of bionic non-smooth surface on reducing soil resistance to disc ploughing. Sci China Tech Sci. 2010(53): 2960–2965. DOI: 10.1007/s11431-010-4128-8.
12. Шовкопьяс А.В. Теоретическое обоснование формы рабочего органа. Инновации в сельском хозяйстве. 2015;(4):90-96. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25379969>.
13. Бабицкий Л.Ф., Соболевский И.В., Яланузян А.А. Рабочий орган стерневого культиватора: пат. на полезную модель № 173203 Рос. Федерация. № 2017107589; заявл. 07.03.2017; опубл. 16.08.2017. Бюл. № 23. 8 с. Режим доступа: http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=RUPM&rn=1872&DocNumber=173203&TypeFile=html.
14. Сравнительные испытания сельскохозяйственной техники: науч. издание. Под общ. ред. В.М. Пронина. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2013. 416 с.

Поступила: 12.11.2018 Принята к публикации: 28.03.2019

Опубликована онлайн: 30.04.2019

Сведения об авторах:

Бабицкий Леонид Федорович, доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой механизации и технического сервиса в АПК, Академия биоресурсов и природопользования ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», п. Аграрное, г. Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация, 295492, e-mail: rectorat@abip.cfuv.ru, **ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8540-7229>**, e-mail: kaf-meh@rambler.ru,

Соболевский Иван Витальевич, кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедры механизации и технического сервиса в АПК, Академия биоресурсов и природопользования ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», п. Аграрное, г. Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация, 295492, e-mail: rectorat@abip.cfuv.ru, **ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1338-9065>**,

Куклин Владимир Алексеевич, кандидат техн. наук, доцент кафедры механизации и технического сервиса в АПК, Академия биоресурсов и природопользования ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», п. Аграрное, г. Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация, 295492, e-mail: rectorat@abip.cfuv.ru, **ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6692-9523>**.

References

1. Shaporev A.N., Trubilin E.I. *Obzor konstruksiy seriynykh kul'tivatorov dlya sternevoy obrabotki pochvy*. [Review of designs of serial cultivators for stubble tillage]. *Nauchnoe obespechenie agropromyshlennogo kompleksa: sb. statey po materialam Kh Vseross. konf. molodykh uchenykh, posvyashch. 120-letiyu I. S. Kosenko*. [Collection of articles on the materials of the 10th All-Russian Conference of young scientists devoted to the 120th anniversary of I. S. Kosenko]. 2017. pp. 654-655. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29131296>.
2. Maslov G.G., Yudina E.M., Zhuriy I.A. *Effektivnost' poverkhnostnoy obrabotki pochvy sternevyim mnogofunktional'nym kul'tivatorom*. [Efficiency of surface tillage with a multipurpose stubble cultivator]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2018;(3):7-11. (In Russ.).
3. Beketov V.G. *Povyshenie urozhaynosti yarovoy pshenitsy s primeneniem resursosberegayushchey seyalki-kul'tivatora tochnogo vyseva*. [Increase of spring wheat yield with the use of resource-saving seeder-cultivator of precise sowing]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2013;(5):122-125. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19012049>.
4. Babitskiy L.F., Moskalevich V.Yu., Sobolevskiy I.V. *Razvitie bionicheskogo napravleniya v zemledel'cheskoy mekhanike*. [Development of bionic approach in agricultural mechanics]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*. 2017;(4):68-74. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29739684>.
5. Pikmullin G.V., Bulgariyev G.G. *Metodika proektirovaniya formy rabocheho organa kul'tivatora dlya predposevnoy obrabotki pochvy*. [Methods of designing the form of the cultivator working body for the secondary tillage]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2011;6(1):107-109. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15618929>.
6. Babitskiy L.F., Sobolevskiy I.V., Yalanuzyan A.A. *Obosnovanie parametrov sternevoogo kul'tivatora po bionicheskomu podobiyu*. [Substantiation of the parameters of the stubble cultivator in bionic similarity]. *Dni nauki krymskogo federal'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo: sb. tr. III nauchnoy konf. professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov, studentov i molodykh uchenykh*. [Proceedings of the 3d scientific Conference of the teaching staff, graduate students and young scientists "Days of science of the Crimean Federal University. V. I. Vernadsky"]. Simferopol': *Krymskiy FU*, 2018. pp. 117-119. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32599667>.
7. Jianqiao L., Yunpeng Y., Benard C., Xuejiao W., Zhaoliang W., Meng Z. Bionic Design for Reducing Adhesive Resistance of the Ridger Inspired by a Boar's Head. *Applied Bionics and Biomechanics*. 2017. Article ID 8315972, 10 p. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/8315972>.
8. Liu R., Yao J.H., Zhang Q.L., Collier R. Sliding wear and solid-particle erosion resistance of a novel high-tungsten Stellite alloy. *Wear*. 322–323 (2015) 41-50.
9. Slobodyan S.M., Romanishin A.E., Romanishina S.A. *Skol'zhenie pochvy po rezhushchemu elementu rabocheho organa*. [Sliding of soil along the cutting element of the working body]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2014;(7):146-153. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21812965>.
10. Syromyatnikov Yu.N. *Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa dvizheniya pochvy po lemku pochvoobratyvyayushchey rykhlytel'no-separiruyushchey mashiny*. [Improving the efficiency of the technological process of soil movement along the ploughshare of the tillage loosening-separating machine]. *Sel'skoe khozyaystvo*. 2017;(1):48-55. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28880486>.
11. Chirende B, Li J Q, Wen L G, et al. Effects of bionic non-smooth surface on reducing soil resistance to disc ploughing. *Sci China Tech Sci*. 2010(53): 2960-2965. DOI: 10.1007/s11431-010-4128-8.
12. Shovkoplyas A.V. *Teoreticheskoe obosnovanie formy rabocheho organa*. [Theoretical substantiation of the shape of the working body]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2015;(4):90-96. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25379969>.
13. Babitskiy L.F., Sobolevskiy I.V., Yalanuzyan A.A. *Rabochiy organ sternevoogo kul'tivatora*. [The working body of the stubble cultivator]. Patent RF, № 173203, 2017. (In Russ.). URL: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPM&rn=1872&DocNumber=173203&TypeFile=html.
14. *Sravnitel'nye ispytaniya sel'skokhozyaystvennoy tekhniki: nauch. izdanie*. [Comparative tests of agricultural machinery: scientific. edition]. Pod obshch. red. V.M. Pronina. Moscow: *FGBNU «Rosinformagrotekh»*, 2013. 416 p.

Received: 12.11.2018

Accepted for publication: 28.03.2019

Published online: 30.04.2019

Information about authors:

Leonid F. Babitskiy, DSc in Engineering, professor, Head of the Department of Mechanization and Technical Service in the AIC, Academy of Bioresources and Environmental Management (Academic Unit) of V.I. Vernadsky Crimean Federal University, vil. Agrarnoe, Simferopol, Republic of Crimea, Russian Federation, 295492, e-mail: rektorat@abip.cfuv.ru, **ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8540-7229>**, e-mail: kaf-meh@rambler.ru,

Ivan V. Sobolevskiy, PhD in Engineering, associate professor, Associate Professor of the Department of Mechanization and Technical Service in the AIC, Academy of Bioresources and Environmental Management (Academic Unit) of V.I. Vernadsky Crimean Federal University, vil. Agrarnoe, Simferopol, Republic of Crimea, Russian Federation, 295492, e-mail: rektorat@abip.cfuv.ru, **ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1338-9065>**,

Vladimir A. Kuklin, PhD in Engineering, associate professor of the Department of Mechanization and Technical Service in the AIC, Academy of Bioresources and Environmental Management (Academic Unit) of V.I. Vernadsky Crimean Federal University, vil. Agrarnoe, Simferopol, Republic of Crimea, Russian Federation, 295492, e-mail: rektorat@abip.cfuv.ru, **ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6692-9523>**.