

ОБОСОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЛИПСОВИДНОГО
ИГОЛЬЧАТОГО ДИСКА ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОРУДИЯ

И.И. Алиякберов, С.М. Яхин, Л.М. Нуриев

Реферат. Ротационные почвообрабатывающие орудия в силу известных преимуществ широко применяют при возделывании многих сельскохозяйственных культур. В конструктивном плане рабочие органы ротационных орудий располагаются (устанавливаются) на раме, как правило, последовательно один за другим. Это снижает маневренность почвообрабатывающего агрегата, увеличивает материалоемкость орудия и энергоёмкость технологической операции. В разработанном в Казанском ГАУ ротационном почвообрабатывающем орудии для предпосевной обработки почвы эти недостатки устранены путём установки спирально-винтового рабочего органа и секции активных эллипсовидных игольчатых дисков на раме коаксиально. В работе определены и обоснованы конструктивные параметры эллипсовидного игольчатого диска. Получена теоретическая зависимость для обоснования угла α наклона большой оси эллипсовидного диска к оси вращения. Рациональное его значение должно соответствовать условию: $\alpha > 44^\circ \dots 62^\circ$. Приведено выражение для определения количества игл на диске. Расчёт, выполненный при диаметре диска $D_{из} = 0,4$ м, угле $\alpha = 65^\circ$, показателе кинематического режима $\lambda = 2$, глубине мульчирования $a_{мл} = 0,04$ м, гребнистости $h_{гр} = 0,004$ м показал, что рациональное количество игл на диске $k_{игл} = 16$. Аналитическим способом выведено теоретическое выражение для определения угла наклона игл к оси вращения. Выполненный при $\alpha = 65^\circ$ расчёт показал, что первая игла наклонена к оси вращения под минимальным углом $j_{мин} = 65^\circ$, пятая и тринадцатая иглы наклонены к оси вращения под углом 90° , девятая – под максимальным углом $j_{макс} = 115^\circ$. Получены также теоретические зависимости для определения угла закрепления игл на ступице и длины игл по всему периметру диска. Каждая игла закрепляется на ступице диска под своим расчётным углом наклона, равным $29,0^\circ \dots 32,6^\circ$, а длина игл по периметру ступицы меняется в пределах $0,1372 \dots 0,1503$ м.

Ключевые слова: почвообрабатывающее орудие; эллипсовидный игольчатый диск; конструктивные параметры.

Введение. Игольчатые рабочие органы почвообрабатывающих машин и орудий обеспечивают меньшее распыление и истирание почвы, не забиваются растительными остатками и почвой даже при повышенной влажности, их тяговое сопротивление значительно меньше, чем у других рабочих органов [1, 2, 3]. Как правило, рабочие органы известных ротационных орудий устанавливают на раме последовательно один за другим. Однако в последние десятилетия наметилась и развивается тенденция их установки коаксиально [4, 5, 6]. Такие орудия более компактны, менее материалоемки, но вопросы взаимодействия их с почвой мало изучены.

Цель исследований – определение и обоснование основных конструктивных параметров эллипсовидного игольчатого диска почвообрабатывающего орудия.

Условия, материалы и методы. Методика исследований предусматривала разработку теоретических предпосылок для определения и обоснования основных конструктивных параметров эллипсовидного игольчатого диска и базировалась на положениях аналитической геометрии и законах классической механики.

Практические расчёты выполнены с использованием пакета прикладных программ Microsoft Excel из стандартного набора Microsoft Office.

Результаты и обсуждение. В ротационном почвообрабатывающем орудии [7, 8] секция эллипсовидных игольчатых дисков коаксиально установлена внутри спирально-винтового рабочего органа и снабжена актив-

ным приводом. Эллипсовидные игольчатые диски совершают в пространстве сложное перемещение и, в отличие от других подобных рабочих органов, деформируют почву не только прокалыванием и растяжением, но и растаскиванием, что обеспечивает эффективное мульчирование и выравнивание поверхности поля, а также уничтожение сорной растительности.

Конструктивная особенность эллипсовидного игольчатого диска (далее – диска) – наклон его большой оси к оси вращения под углом, который вычисляется по формуле:

$$\alpha = \arcsin [(2a)], \quad (1)$$

где α – угол наклона большой оси диска к оси вращения, град;

$D_{из}$ – диаметр диска, м;

$2a$ – большая ось диска, м.

Соблюдение условия (1) обеспечивает стабильную и устойчивую динамику диска, поскольку в этом случае достигается постоянство расстояния конечных точек всех игл от оси вращения.

В процессе обработки почвы иглы под действием усилия $P_{иг}$ поочередно входят в почву (рис. 1). Их скользящее вхождение в вертикально-поперечной плоскости обеспечивается лишь в том случае, когда соблюдается следующее неравенство:

$$P_{иг} \cdot \sin \alpha > P_{иг} \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi_{mp} \quad (2)$$

где φ_{mp} – угол трения скольжения почвы о рабочую поверхность, град;

$P_{иг}$ – усилие, Н;

α – угол наклона большой оси диска к оси вращения, град.

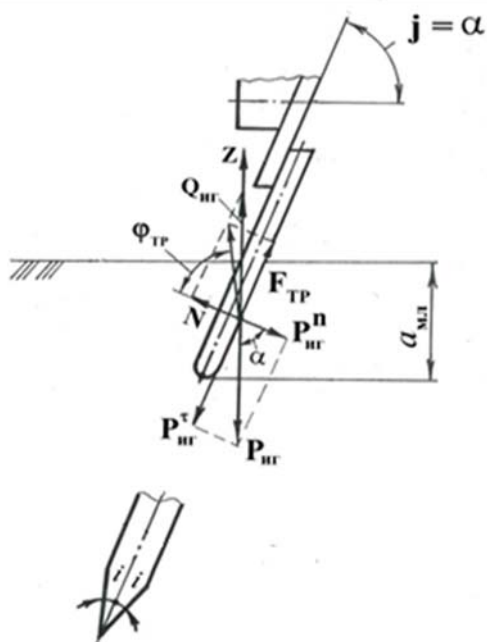


Рис. 1 – Схема к обоснованию угла наклона большой оси диска к оси вращения:

$P_{иг}$ – усилие, необходимое для внедрения игл в почву; $Q_{иг}$ – вертикальная реакция почвы; $F_{тр}$ – сила трения почвы; α – угол наклона игл к оси вращения; $a_{мл}$ – глубина мульчирования почвы; i – угол заточки игл

После определённых преобразований из выражения (2) можно получить: $\alpha > \varphi_{мп}$. В случае, когда концы игл затачивают с двух сторон или выполняют в виде конуса, выражение для определения угла наклона большой оси диска имеет другой вид:

$$\alpha > \varphi_{мп} + i,$$

где i – угол двухсторонней заточки иглы или половина угла при вершине конуса, град.

С учётом значений угла трения различных типов почв о стальную поверхность рабочих органов и при $i=20^\circ$, имеем: $\alpha > 44^\circ \dots 62^\circ$. Исходя из этого при проектировании орудия был выбран угол $\alpha=65^\circ$.

При оптимальном значении показателя кинематического режима количество игл на диске определяется из условия обеспечения заданной гребнистости подошвы по следующей формуле [8]:

$$k_{игл} = \pi D_{диск} / [2\lambda \sqrt{h_{сп}(D_{диск} - h_{сп})} \mp D_{диск} \arccos(1 - 2h_{сп} / D_{диск})]. \quad (3)$$

Перед вторым членом выражения (3) для диска, вращающегося «сверху вниз», необходимо использовать знак минус, для диска, вращающегося «снизу вверх» – плюс. В расчётах необходимо учесть, что допустимая гребнистость составляет 0,1...0,2 от заданной глубины $a_{мл}$ обработки почвы, а подача на одну иглу не должна превышать 0,1 м [9]. Выбирая режим вращения диска «сверху вниз», при исходных параметрах $D_{диск}=0,4$ м; $\alpha=65^\circ$; $\lambda=2$; $a_{мл}=0,04$ м; $h_{сп}=0,004$ м из выражения (3) имеем, что рациональное количество игл $k_{игл}=16$.

Иглы по периметру диска наклонены к оси вращения под разными углами, определяемыми согласно уравнению:

$$j = \arcsin \sqrt{\sin^2 \psi_{игл}^n + (\sin \alpha \cos \psi_{игл}^n)^2} \quad (4)$$

где $\psi_{игл}^n$ – угол, характеризующий положение начальных точек игл, град.

Величина угла $\psi_{игл}^n$ зависит от профильного углового шага $\varphi_{игл}^n$, который определяется по формуле: $\varphi_{игл}^n = 360^\circ / k_{игл}$.

Особо отметим, что угол $\psi_{игл}^n$ рассчитывается для каждой иглы в отдельности согласно уравнению перевода угловых параметров из одной координатной системы в другую [10]:

$$\psi_{игл}^n = \arcsin \left(\sin \alpha \sin \varphi_{игл}^n / \sqrt{\cos^2 \varphi_{игл}^n + (\sin \alpha \sin \varphi_{игл}^n)^2} \right). \quad (5)$$

В связи с тем, что диск эллипсоидный, его иглы по периметру имеют разную длину. Определять длину игл удобнее путём фиксации их начальных и конечных точек соответствующими углами (рис. 2).

Начальные точки игл на профильной плоскости фиксирует угол ξ_2 . Угол фиксации конечных точек игл на этой же плоскости вычисляется согласно выражению:

$$\varphi_{игл}^k = \varphi_{игл}^n + \xi_2, \quad (6)$$

где ξ_2 – угол между радиусом OF диска и радиусом OT ступицы, град.

Для определения угла ξ_2 сначала нужно определить угол ξ_1 между профильной проекцией рассматриваемой иглы FT и радиусом OF диска. Из треугольника OFT на основании теоремы синусов имеем:

$$0,5 \cdot D_{диск} / \sin(180^\circ - \beta_n) = 0,5 \cdot D_{ст} / \sin \xi_1 \quad (7)$$

где $D_{ст}$ – диаметр ступицы.

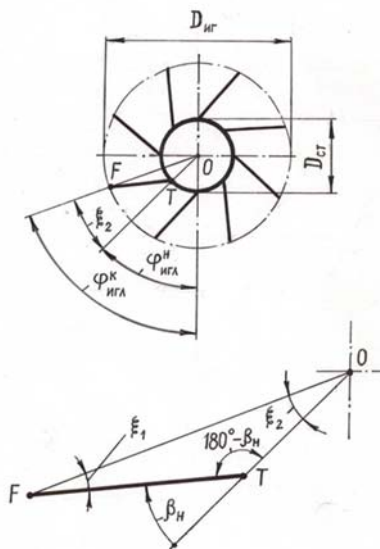


Рис. 2 – Схема к определению длины игл: $D_{диск}$ и $D_{ст}$ – диаметры диска и ступицы; β_n – угол наклона игл на профильной плоскости; $\varphi_{игл}^n$ и $\varphi_{игл}^k$ – углы фиксации начальной и конечной точек игл на профильной плоскости; ξ_2 – угол между радиусом OF диска и радиусом OT ступицы; ξ_1 – угол между профильной проекцией рассматриваемой иглы FT и радиусом OF диска

Из выражения (7) определяем угол ζ_1 , постоянный по всему периметру диска:

$$\zeta_1 = \arcsin(D_{cm} \cdot \sin \beta_n / D_{uz}) \quad (8)$$

Далее из упомянутого треугольника определяем угол ζ_2 :

$$\zeta_2 = 180^\circ - (180^\circ - \beta_n) - \zeta_1 = \beta_n - \zeta_1 \quad (9)$$

Таким образом, окончательно имеем:

$$\varphi_{игл}^k = \varphi_{игл}^n + \beta_n - \zeta_1. \quad (10)$$

Угол $\varphi_{игл}^k$ фиксирования конечной точки F иглы (рис. 3) вычисляется с учётом угла $\varphi_{игл}^n$ в соответствии с формулой перевода (5) согласно уравнению:

$$\psi_{игл}^k = \arcsin\left(\sin \alpha \sin \varphi_{игл}^k / \sqrt{\cos^2 \varphi_{игл}^k + (\sin \alpha \sin \varphi_{игл}^k)^2}\right). \quad (11)$$

Истинное значение угла между полярным радиусом OF диска и полярным радиусом OT ступицы вычисляется из формулы:

$$\zeta_2^{ист} = \psi_{игл}^k - \psi_{игл}^n. \quad (12)$$

Наконец, из треугольника OFT на основании теоремы косинусов можно определить длину игл по всему периметру диска:

$$l_{игл} = \sqrt{(\rho_{ст}^n)^2 + (\rho_{игл}^k)^2 - 2 \rho_{ст}^n \rho_{игл}^k \cos \zeta_2^{ист}}. \quad (13)$$

Полярные радиусы диска и ступицы, которые проходят через начальные и конечные точки игл, рассчитываются на основании канонического уравнения эллипса согласно выражениям соответственно:

$$\rho_{ст}^n = OT = D_{cm} / (2 \sqrt{\sin^2 \psi_{игл}^n + (\sin \alpha \cos \psi_{игл}^n)^2}) \quad (14)$$

$$\rho_{игл}^k = OF = D_{uz} / (2 \sqrt{\sin^2 \psi_{игл}^k + (\sin \alpha \cos \psi_{игл}^k)^2}) \quad (15)$$

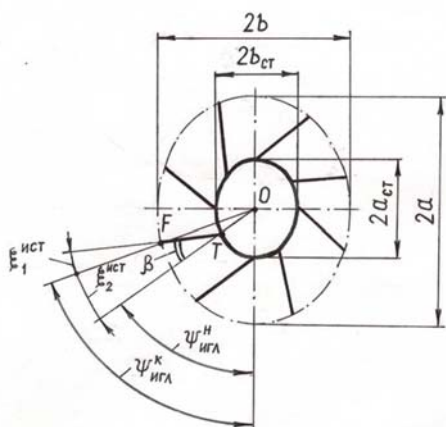


Рис. 3 – Схема к определению длины игл: $2a$ и $2b$ – большая и малая оси диска; $2a_{ст}$ и $2b_{ст}$ – большая и малая оси ступицы диска; $\psi_{игл}^n$ и $\psi_{игл}^k$ – истинные углы фиксирования начальной и конечной точек игл; β – истинный угол наклона игл; $\zeta_1^{ист}$ – истинный угол между рассматриваемой иглой FT и полярным радиусом OF диска; $\zeta_2^{ист}$ – истинный угол между полярным радиусом OF диска и полярным радиусом OT ступицы

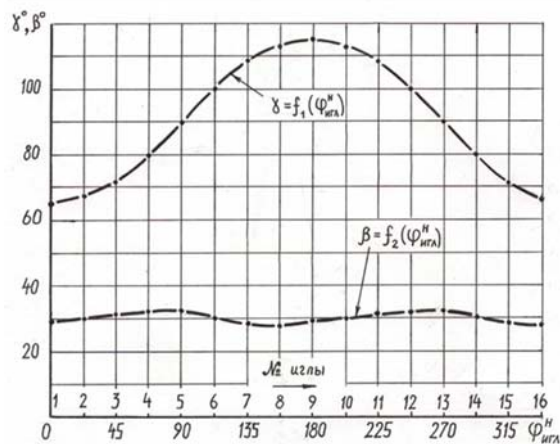


Рис. 4 – Графики изменения углов наклона игл к оси вращения и расположения игл на ступице диска

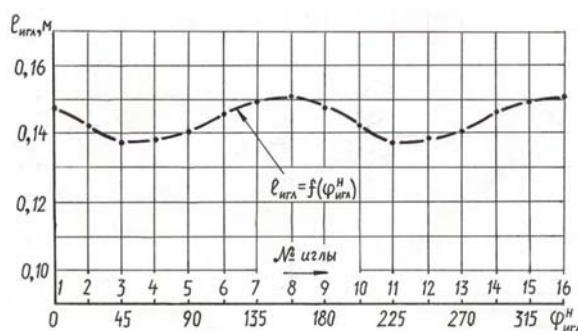


Рис. 5 – График изменения длины игл по периметру ступицы

Конструктивная особенность диска заключается в том, что его иглы закрепляются на ступице не радиально, а с наклоном назад на угол β_n . Этот параметр зависит от угла наклона игл на профильной плоскости, значение которого выбирается согласно зависимости:

$$\beta_n < 90^\circ - \varphi_{мп}. \quad (16)$$

Учитывая среднее значение угла трения скольжения почвы, равное 30° , из этого неравенства имеем, что $\beta_n < 60^\circ$. При проектировании орудия мы выбрали угол $\beta_n = 30^\circ$. Для определения самого угла рассмотрим треугольник OFT (см. рис. 3). На основании теоремы синусов можно записать:

$$OF / \sin(180^\circ - \beta) = FT / \sin \zeta_2^{ист} \quad (17)$$

С учётом того, что $OF = \rho_{игл}^k$; а $FT = l_{игл}$, из выражения (17) окончательно получим:

$$\beta = \arcsin(\rho_{игл}^k \cdot \sin \zeta_2^{ист} / l_{игл}) \quad (18)$$

Из выражения (18) видно, что каждая игла закрепляется на ступице диска под своим расчётным углом наклона.

Для проверки достоверности теоретических предпосылок был выполнен практический расчёт параметров при следующих исходных данных: $D_{uz} = 0,4$ м; $D_{cm} = 0,14$ м, $k_{игл} = 16$; $a_{мл} = 0,04$ м; $\alpha = 65^\circ$, $\beta_n = 30^\circ$. Под номером один выбрана игла, начальная точка T которой занимает крайнее нижнее положение, причём через эту точку проходит большая ось

2а диска. Далее нумерация игл идёт по часовой стрелке. Профильный угловой шаг игл: $\varphi_{игл}^n = 360^\circ / 16 = 22,5^\circ$. Поскольку начальная точка первой иглы совпадает с началом системы отсчёта, то для неё $\varphi_{игл}^n = 0^\circ$. Для второй иглы $\varphi_{игл}^n = 22,5^\circ$, для третьей $\varphi_{игл}^n = 45^\circ$ и так далее. Промежуточные расчётные углы в профильной плоскости: $\zeta_1 = 10^\circ$; $\zeta_2 = 20^\circ$. В соответствии с выражением (12) угол фиксирования конечной точки первой иглы $\varphi_{игл}^x = 20^\circ$. Для второй иглы $\varphi_{игл}^x = 42,5^\circ$, для третьей – $\varphi_{игл}^x = 65^\circ$ и так далее.

Первая игла наклонена к оси вращения под минимальным углом $j_{min} = 65^\circ$, при этом угол закрепления иглы на ступице $\beta = 29,0^\circ$ (рис. 4). Пятая и тринадцатая иглы наклонены к оси вращения под углом 90° , в этом случае угол их закрепления на ступице $\beta = 32,6^\circ$. Девятая игла наклонена к оси вращения под максимальным углом $j_{max} = 115^\circ$, а угол закрепления иглы на ступице $\beta = 29,0^\circ$.

Изменение длины игл по периметру ступицы носит синусоидальный характер (рис. 5). Наибольшая (0,1503 м) она у восьмой и шестнадцатой иглы, минимальная (0,1372 м) – у третьей и одиннадцатой иглы. Длина пятой и тринадцатой игл равна значению диаметра ступицы диска, то есть 0,14 м.

Выводы. Выполненное исследование и проведённые расчёты позволяют спроектировать секцию эллипсоидных игольчатых дисков активного действия почвообрабатывающего орудия с рациональными конструктивными параметрами: диаметр диска $D_{uz} = 0,4$ м, угол наклона большой оси диска к оси вращения $\alpha = 65^\circ$, количество игл на диске $k_{игл} = 16$, профильный угловой шаг игл $\varphi_{игл}^n = 22,5^\circ$, угол закрепления игл на ступице $\beta = 29,0^\circ \dots 32,6^\circ$, длина игл по периметру ступицы $l_{uzl} = 0,1372 \dots 0,1503$ м.

Литература

1. Samadalashvili A. The batch-combined minimum tillage farming machine // International scientific, scientific applied and informational journal. Sofia. 2015. No. 3. P. 6–10.
2. Petrov A. M. Justification of optimal design and technological parameters of discs of the combined working body // Bio web of conferences. 2020. Vol. 17. 00016 URL: https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2020/01/bioconf_fies2020_00016/bioconf_fies2020_00016.html (дата обращения: 10.04.2021).
3. Rzaliev A. S. Combined tool for main strip tillage by strip – till technology in the conditions of south Kazakhstan // Advances in current natural sciences. 2019. No. 7. P. 26–32.
4. Кузьмин М. В. Нетрадиционные рабочие органы для технико-технологической модернизации сельскохозяйственного производства: автореферат дисс. ... докт. техн. наук. М.: ФГОУ ВПО РГАЗУ, 2009. 24 с.
5. Яхин С. М., Валиев А. Р., Зиганшин Б.Г., Семушкин Н.И., Камалиев А.А. Борона ротационная мульчирующая // Патент РФ № 2492606, 20.09.2013.
6. Теличкина Н.А. Обоснование параметров комбинированного культиватора с тросовым и катковым рабочими органами для предпосевной обработки почвы: дисс. ... канд. техн. наук. Троицк: Южно-Уральский ГАУ, 2018. 153 с.
7. Яхин С. М., Алиакберов И. И., Нуриев Л. М. Ротационное комбинированное орудие для предпосевной обработки почвы // Патент РФ № 195364, 23.01.2020.
8. Кинематика игольчатого эллипсоидного диска ротационного почвообрабатывающего орудия / С. М. Яхин, И. И. Алиакберов, Л. М. Нуриев и др. // Техника и оборудование для села. 2020. № 2 (272). С. 12–15.
9. Матяшин Ю. И. Теория сельхозмашин с ротационными рабочими органами // Вестник Казанского ГАУ. 2009. № 2(12). С. 179–185.
10. Гайнутдинов Р. Х. Обоснование параметров и разработка ротационного орудия с эллипсоидными дисками для поверхностной обработки почвы: дисс. ... канд. техн. наук. Казань: Казанский ГАУ, 2019. 146 с.

Сведения об авторах:

Алиакберов Ильфат Ирфанович – кандидат технических наук, e-mail: aliakberovii@mail.ru
 Яхин Сергей Мирбатович – доктор технических наук, профессор, e-mail: jcm61@mail.ru
 Нуриев Ленар Мидхатович – соискатель, e-mail: nurilm@mail.ru
 Казанский государственный аграрный университет, Казань. Россия

DESCRIPTION OF THE PARAMETERS OF THE ELLIPSE NEEDLE DISC OF THE SOIL PROCESSING TOOL I.I. Aliakberov, S.M. Yakhin, L.M. Nuriev

Abstract. Due to the well-known advantages, rotary tillage implements are widely used in the cultivation of many agricultural crops. Structurally, the working units of rotary implements are located (installed) on the frame, as a rule, sequentially one after the other. This reduces the maneuverability of the tillage unit, increases the material consumption of the implement and the energy consumption of the technological operation. In the rotary tillage tool developed at Kazan State Agrarian University for pre-sowing soil cultivation, these disadvantages are eliminated by installing a spiral-screw working unit and a section of active ellipsoidal needle disks on the frame coaxially. The research was carried out in order to determine and substantiate the design parameters of the elliptical needle disk. A theoretical dependence is obtained to substantiate the angle α of inclination of the major axis of the ellipsoid disk to the axis of rotation. It was revealed that its rational value must correspond to the condition: $\alpha > 44^\circ \dots 62^\circ$. An expression for determining the number of needles on a disk is given. The calculation carried out with a disk diameter $D_{uz} = 0.4$ m, an angle $\alpha = 65^\circ$, an indicator of a kinematic mode $\lambda = 2$, a mulching depth $a_{mi} = 0.04$ m, a ridging $h_{rp} = 0.004$ m showed that a rational number of needles per disc $k_{uzl} = 16$. Analytically, a theoretical expression for determining the angle of inclination of the needles to the axis of rotation has been derived. The calculation performed at $\alpha = 65^\circ$ revealed that the first needle is inclined to the axis of rotation at a mini-

mum angle $j_{min} = 65^\circ$, the fifth and thirteenth needles are inclined to the axis of rotation at an angle of 90° , the ninth needle is inclined to the axis of rotation at a maximum angle $j_{max} = 115^\circ$. Also obtained are theoretical dependences for determining the angle of attachment of the needles on the hub and the length of the needles along the entire perimeter of the disk. The calculation showed that each needle is fixed on the disc hub at its calculated angle of inclination, equal to $29.0^\circ \dots 32.6^\circ$, and the length of the needles along the perimeter of the hub varies within $0.1372 \dots 0.1503$ m.

Key words: tillage tool; elliptical needle disc; design parameters.

References

1. Samadalashvili A. [The batch-combined minimum tillage farming machine]. International scientific, scientific applied and informational journal. Sofia. 2015; 3. 6-10 p.
2. Petrov AM. Justification of optimal design and technological parameters of discs of the combined working unit. [Internet]. Bio web of conferences. 2020; Vol. 17. 00016 [cited 2021 April 10]. Available from: https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2020/01/bioconf_fies2020_00016/bioconf_fies2020_00016.html.
3. Rzaliev AS. [Combined tool for main strip tillage by strip – till technology in the conditions of south Kazakhstan]. Advances in current natural sciences. 2019; 7. 26-32 p.
4. Kuz'min MV. Netraditsionnye rabochie organy dlya tekhniko-tekhnologicheskoi modernizatsii sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva: avtoreferat diss. ... dokt. tekhn. nauk. [Non-traditional working units for technical and technological modernization of agricultural production: abstract of thesis for a degree of Doctor of Technical sciences]. Moscow: FGOU VPO RGAZU. 2009; 24 p.
5. Yakhin SM, Valiev AR, Ziganshin BG, Semushkin NI, Kamaliev AA. Borona rotatsionnaya mul'chiruyushchaya. [Rotary mulching harrow]. Patent RF № 2492606. 20.09.2013.
6. Telichkina NA. Obosnovanie parametrov kombinirovannogo kul'tivatora s trosovym i katkovym rabochimi organami dlya predposevnoi obrabotki pochvy: diss. ... kand. tekhn. nauk. [Substantiation of the parameters of a combined cultivator with cable and roller working units for pre-sowing soil cultivation: dissertation for a degree of Ph.D. of Technical sciences]. Troitsk: Yuzhno-Ural'skii GAU. 2018; 153 p.
7. Yakhin SM, Aliakberov II, Nuriev LM. Rotatsionnoe kombinirovanoe orudie dlya predposevnoi obrabotki pochvy. [Combined rotary tool for pre-sowing soil cultivation]. Patent RF № 195364. 23.01.2020.
8. Yakhin SM, Aliakberov II, Nuriev LM. [Kinematics of the needle ellipsoidal disc of a rotary tillage tool]. Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2020; 2 (272). 12-15 p.
9. Matyashin YuI. [Theory of agricultural machines with rotary working units]. Vestnik Kazanskogo GAU. 2009; 2 (12). 179-185 p.
10. Gainutdinov RKh. Obosnovanie parametrov i razrabotka rotatsionnogo orudiya s ellipsoidnymi diskami dlya poverkhnostnoi obrabotki pochvy: diss. ... kand. tekhn. nauk. [Substantiation of parameters and development of a rotary tool with ellipsoidal disks for surface tillage: dissertation for a degree of Ph.D. of Technical sciences]. Kazan': Kazanskii GAU. 2019; 146 p.

Authors:

Aliakberov Ilfat Irfanovich – Ph.D. of Technical sciences, e-mail: aliakberovii@mail.ru
 Yakhin Sergey Mirbatovich – Doctor of Technical sciences, Professor, e-mail: jcm61@mail.ru
 Nurliev Lenar Midkhatovich – applicant, e-mail: nurilm@mail.ru
 Kazan State Agrarian University, Kazan. Russia