

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РОТАЦИОННОГО ОРУДИЯ
С ЭЛЛИПСОВИДНЫМИ ДИСКАМИ

Гайнутдинов Р. Х.

Реферат. Применяемые технические средства для поверхностной обработки почвы не в полной мере отвечают требованиям технологии по качественному крошению почвы и уничтожению сорной растительности. Для решения этой проблемы на более качественном уровне в последние годы разрабатываются ротационные орудия, рабочие органы которых совершают сложное перемещение в пространстве. Как показывает анализ, эти орудия работают неустойчиво и неравномерно обрабатывают почву. Для устранения этих недостатков в Казанском ГАУ разработано ротационное орудие с эллипсовидными дисками, которые наклонены к оси вращения строго под расчётным углом. В настоящей статье исходя из условия, обеспечивающего скользжащее вхождение ротационных рабочих органов в почву, рассматривается вопрос теоретического обоснования оптимального значения угла наклона эллипсовидного диска к оси вращения рабочей батареи. Определяются также отдельные технологические параметры, в частности, угол и величина вхождения эллипсовидного диска в почву, а также длина рабочей части его режущей кромки. Полученные зависимости позволяют более детально проанализировать процесс взаимодействия диска с обрабатываемой средой.

Ключевые слова: обработка почвы; ротационное орудие; эллипсовидный диск; конструктивные и технологические параметры.

Введение. Для обработки почвы как по классической, так и минимальной технологиям широко применяются ротационные орудия дискового типа [10, 11, 14]. Они более перспективны в части энерго и ресурсосбережения, просты по конструкции и имеют достаточно высокую производительность [2, 7, 13]. Диски выполняются круглыми, шестиугольными и сферическими [3]. Для улучшения крошения почвы и эффективного уничтожения сорняков в Казанском ГАУ ведутся активные исследования по разработке почвообрабатывающего орудия с эллипсовидными дисками, которые при поступательном движении агрегата совершают сложное перемещение в пространстве [4, 5]. Отличительной особенностью данного орудия является то, что эллипсовидные диски здесь наклонные, причём угол наклона большой оси дисков (в дальнейшем – угол наклона дисков) к оси вращения строго согласован с конструктивными их параметрами по следующей формуле:

$$\alpha = \arcsin(b/a), \quad (1)$$

где b , a – малая и большая полуоси эллипсовидных дисков.

Изучить процесс взаимодействия диска с обрабатываемой средой невозможно без теоретического определения и обоснования отдельных конструктивных и технологических параметров предлагаемого ротационного почвообрабатывающего орудия.

Анализ и обсуждение результатов. Анализ показывает, что для обеспечения работоспособности, а также минимизации тягового сопротивления почвообрабатывающего орудия, значение угла наклона эллипсовидного диска (в дальнейшем – диск) к оси вращения

должно быть оптимальным, а конструктивные, кинематические и технологические параметры орудия должны быть определены в дальнейшем исходя из этих оптимальных значений.

Обоснование оптимального значения угла наклона производим из условия, обеспечивающего скользжащее вхождение диска в почву (рисунок 1). Положение диска в расчётной схеме характеризуется углом вхождения β_{min} , поскольку, как показали исследования, оно вместе с положением диска, когда угол вхождения β_{max} является единственным, где требуется максимальное усилие для вхождения (внедрения) диска в почву. Диск входит в почву по оси Z под действием вертикального усилия P_z . Фронтальная реакция почвы Q_z на режущую кромку (лезвие) диска направлена противоположно оси Z и равна по модулю вертикальному усилию P_z . Согласно исследованиям проф. Канарёва Ф.М. [6] скользжащее вхождение ротационного рабочего органа в почву обеспечивается лишь в том случае, когда фронтальная реакция почвы на режущую кромку выходит за пределы так называемого конуса трения.

Следовательно, для обеспечения скользжащего вхождения диска в почву направление фронтальной реакции почвы Q_z должно выходить за пределы конуса трения, а это возможно лишь при соблюдении следующего условия:

$$P_z \sin \alpha_z > F_{mp}. \quad (2)$$

В свою очередь сила трения определяется по известной формуле:

$$F_{mp} = N \operatorname{tg} \varphi_{mp} = P_z \cos \alpha_z \operatorname{tg} \varphi_{mp}, \quad (3)$$

где N – нормальная реакция почвы;

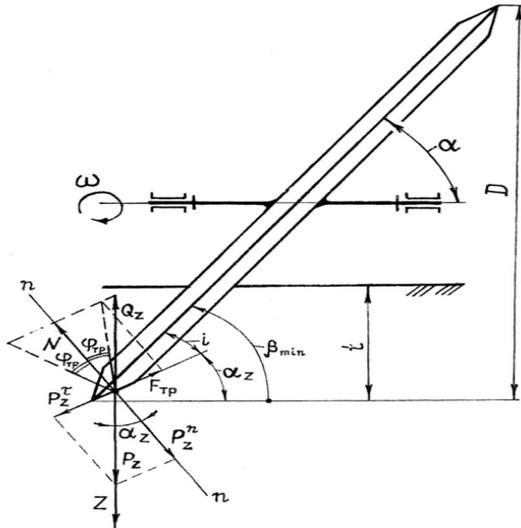


Рисунок 1 – Схема к обоснованию оптимального угла наклона эллипсовидного диска к оси вращения

φ_{mp} – угол трения скольжения почвы о режущую кромку диска.

После подстановки в формулу (2) значения силы трения, имеем:

$$P_z \sin \alpha_z > P_z \cos \alpha_z \operatorname{tg} \varphi_{mp}. \quad (4)$$

Разделив обе части данного неравенства на $\cos \alpha_z$ и после определённого сокращения, получим: $\operatorname{tg} \alpha_z > \operatorname{tg} \varphi_{mp}$. Следовательно,

$$\alpha_z > \varphi_{mp}. \quad (5)$$

Выражение (5) показывает, что скользящее вхождение диска в почву возможно лишь в том случае, когда угол α_z между усилием P_z и нормалью $n - n$ к поверхности режущей кромки больше угла φ_{mp} трения скольжения почвы о режущую кромку диска.

В свою очередь:

$$\alpha_z = \beta_{min} - i. \quad (6)$$

После подстановки в выражение (5) значений углов α_z и β_{min} из формул 6 и 9а соответственно, получим окончательную зависимость для обоснования оптимального значения угла наклона диска к оси вращения. Она имеет вид:

$$\alpha > \varphi_{mp} + i. \quad (7)$$

Коэффициент трения скольжения почвы о рабочую поверхность диска, следовательно, угол трения скольжения зависит от вида рабочей поверхности, механического состава почвы и её влажности. Угол трения скольжения связных песчаных и супесчаных почв о стальную поверхность рабочих органов равен $25^\circ \dots 35^\circ$, чернозёма – $24^\circ \dots 39^\circ$, а суглинистых и глинистых почв всех типов – $26^\circ \dots 42^\circ$ [6, 12]. В ротационных почвообрабатывающих машинах заточку дисков выполняют с учётом назначения орудия. Для дисковых борон угол заточки $i = 10^\circ \dots 20^\circ$ [4, 5]. Если взять за основу значений угла трения указанных

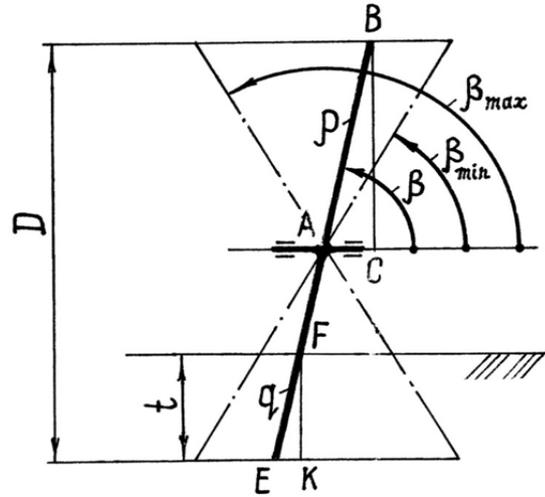


Рисунок 2 – Схема к определению отдельных параметров

выше почв о стальную поверхность рабочих органов и среднее значение угла заточки дисков $i = 15^\circ$, то в соответствии с формулой (7) оптимальный угол наклона диска к оси вращения для связных песчаных и супесчаных почв должен быть больше $40^\circ \dots 50^\circ$, чернозёма – больше $39^\circ \dots 54^\circ$, а суглинистых и глинистых почв всех типов – больше $41^\circ \dots 57^\circ$. При проектировании и изготовлении ротационного орудия угол наклона диска к оси вращения выбран нами равным 60° .

В ходе технологического процесса обработки почвы диск из-за специфики конструкции входит в почву в течение одного оборота под разными углами β (рисунок 2).

В общем случае из прямоугольного треугольника ABC имеем:

$$\beta = \arcsin BC/AB = \arcsin [D/(2\rho)], \quad (8)$$

где $\rho = AB$ – полярный радиус диска.

Подставив в выражение (8) значение полярного радиуса диска

$$\rho = D / \left(2 \sqrt{\sin^2 \psi + (\sin \alpha \cos \psi)^2} \right) \quad [4],$$

получим формулу для определения искомого угла, которая имеет вид:

$$\beta = \arcsin / \sqrt{\sin^2 \psi + (\sin \alpha \cos \psi)^2}, \quad (9)$$

где ψ – угол, характеризующий положение полярного радиуса диска ρ в плоскости режущей кромки.

Анализ выражения (9) показывает, что рассматриваемый угол достигает минимального значения при $\psi = 0^\circ$, при этом

$$\beta_{min} = \alpha. \quad (9a)$$

Максимального значения он достигает при $\psi = 180^\circ$, тогда

$$\beta_{max} = (180^\circ - \alpha). \quad (9b)$$

Также выявлено, что за один оборот дважды при углах ψ , равных 90° и 270° , диск вхо-

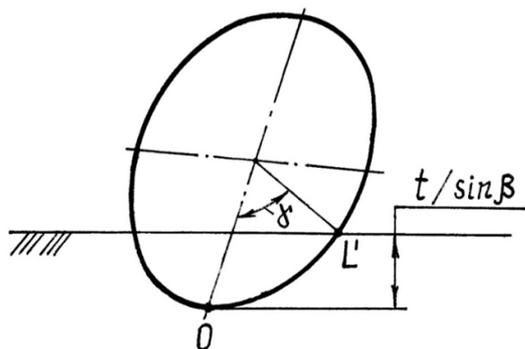


Рисунок 3 – Схема к определению длины рабочего участка режущей кромки эллипсоидного диска

дит в почву под углом 90°.

Исследование также показывает, что при постоянной глубине обработки диск в течение одного оборота входит в почву на различную величину q , которая вычисляется согласно уравнению:

$$q = FE = FK / \sin \beta = t / \sin \beta, \quad (10)$$

t – глубина обработки почвы.

С учётом выражения (9) формула (10) примет следующий вид:

$$q = t / \sqrt{\sin^2 \psi + (\sin \alpha \cos \psi)^2}. \quad (11)$$

Анализируя выражение (11), видим, что при $\psi = 0^\circ$ и 180° диск входит в почву на максимальную величину, вычисляемую согласно формуле: $q_{\max} = t / \sin \alpha$. Когда же $\psi = 90^\circ$ и 270° величина вхождения эллипсоидного диска в почву, наоборот, достигает минимального значения и равна глубине обработки почвы, т. е. $q_{\min} = t$. Например, при глубине обработки $t = 80$ мм и угле наклона диска $\alpha = 60^\circ$ имеем, что $q_{\max} = 92,4$ мм, а $q_{\min} = 80$ мм.

В процессе поверхностной обработки почвы участвует только определённая часть режущей кромки диска. Длина участка режущей кромки, разрезающего пласт, равна длине дуги OL' (рисунок 3). Для наглядности плоскость режущей кромки диска совмещена здесь с плоскостью чертежа.

В общем случае длина рабочего участка режущей кромки диска вычисляется согласно уравнению [9]:

$$dl_p = \sqrt{(dX_{L'})^2 + (dY_{L'})^2 + (dZ_{L'})^2}, \quad (12)$$

где X_L, Y_L, Z_L – координаты точки L' режущей кромки диска в системе координат $OXYZ$ (условно не показана).

С другой стороны, дуга OL' является частью периметра эллипса, поэтому её длину можно вычислить по другой зависимости [1]:

$$l_p = a \int_0^\gamma \sqrt{1 - \varepsilon^2 \sin^2 \gamma} d\gamma, \quad (13)$$

где ε – эксцентриситет диска, γ – центральный угол эллиптического сектора.

Эксцентриситет диска определяется согласно формуле:

$$\varepsilon = \sqrt{a^2 - b^2} / a = \cos \alpha \quad (14)$$

При заданном значении диаметра диска $a = D / (2 \sin \alpha)$, $b = D / 2$ [4].

Верхний предел интегрирования выражения (13), т. е. центральный угол γ эллиптического сектора определяется по выражению [4]:

$$\gamma = \arcsin(\sin \alpha \sin \delta / \sqrt{\cos^2 \delta + (\sin \alpha \sin \delta)^2}), \quad (15)$$

где δ – угол, характеризующий положение точки L' в профильной плоскости. В свою очередь, $\delta = \arccos(1 - 2t/D)$.

При конструировании ротационного почвообрабатывающего орудия приняты $D = 400$ мм, $t = 80$ мм, $\alpha = 60^\circ$. Следовательно, согласно вышеуказанным формулам имеем, что большая ось диска $a = 231$ мм, эксцентриситет диска $\varepsilon = 0,5$, а профильный угол $\delta = 53,1^\circ$. Тогда в соответствии с формулой (15) получим, что центральный угол эллиптического сектора $\gamma = 49,1^\circ = 0,857$ радиан.

Интеграл выражения (13) относится к эллиптическим интегралам, для его решения используются табличные данные [9]. Однако, взяв за основу методику вычисления полных интегралов канонической формы [8], можно определить рабочую длину дуги диска по другой зависимости:

$$L_p = 0,5a\gamma \left[\sqrt{1 - \varepsilon^2 \sin^2 \gamma} + \arcsin(\varepsilon \sin \gamma) / (\varepsilon \sin \gamma) \right]. \quad (16)$$

При выбранных и найденных выше параметрах, например, рабочая длина дуги диска $l_p = 0,193$ м.

Вывод. Исследованием установлено, что оптимальное значение угла наклона эллипсоидного диска ротационного почвообрабатывающего орудия к оси вращения зависит от угла заточки диска и физико-механических свойств обрабатываемой почвы. Практический расчёт показал, что оптимальное значение этого параметра для характерных нашему региону типов почвы должно быть больше $39^\circ \dots 57^\circ$. Выполненное исследование одновременно позволило более детально проанализировать процесс взаимодействия диска с почвой. В частности, установлено, что в ходе поверхностной обработки угол и величина вхождения эллипсоидного диска в почву являются переменными параметрами, которые изменяются в течение одного оборота по синусоидальному закону. Это способствует активному крошению почвы и эффективному уничтожению сорной растительности.

Литература

1. Бермант А.Ф. Краткий курс математического анализа / А.Ф. Бермант, И.Г. Араманович. – Санкт-Петербург: «Лань», 2005. – 735с.
2. Валиев А.Р. Совершенствование бесприводных ротационных рабочих органов для поверхностной обработки почвы / Ю.И. Матяшин, А.Р. Валиев, Л.Ф. Сиразиев, К.В. Федулкина // Вестник Казанского ГАУ. – 2012. – № 1 (23). – с. 93 – 97.
3. Валиев А.Р. Классификация ротационных рабочих органов почвообрабатывающих машин / Ф.Ф. Яруллин, А.Р. Валиев // Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы / Труды международной научно-практической конференции. – Казань: Казанского ГАУ, – 2015. – С.147-154.
4. Гайнутдинов Р.Х. Ротационное орудие для поверхностной обработки почвы с эллипсоидными дисками / Р.Х. Гайнутдинов, С.М. Яхин, И.И. Алиакберов // Вестник Казанского ГАУ. – 2016. – № 2 (40). – с. 64 – 67.
5. Гайнутдинов Р.Х. Кинематика эллипсоидного диска ротационного орудия для поверхностной обработки почвы / Р.Х. Гайнутдинов, С.М. Яхин, И.И. Алиакберов, Г.В. Пикмуллин // Техника и оборудование для села. – 2016. – № 8 (230). с.10-14.
6. Канарёв Ф.М. Ротационные почвообрабатывающие машины и орудия / Ф.М. Канарёв. – М.: Машиностроение, 1983. – 142 с.
7. Кашапов И.И. Энергосберегающие технологии в АПК / И.И. Кашапов, Б.Г. Зиганшин, Н.А. Корсаков, А.Р. Валиев // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VI международной научно-практической конференции. – Саратов: ООО «ЦеСАин», 2015. – с. 88 – 90.
8. Кузьмич Л.С. Эллиптические функции. Эллиптические интегралы: Алгоритмы точного решения / Л.С. Кузьмич. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 48 с.
9. Матяшин Ю.И. Расчёт и проектирование ротационных почвообрабатывающих машин / Ю.И. Матяшин, И.М. Гринчук, Г.М. Егоров. – М.: Агропромиздат, 1988. – 174 с.
10. Современные почвообрабатывающие машины: регулировка, настройка и эксплуатация / Р.Р. Валиев, Б.Г. Зиганшин Ф.Ф. Мухамадьяров, С.М. Яхин, Д.Т. Халиуллин, И.И. Файзрахманов. – Санкт-Петербург: «Лань», 2016.–208с.
11. Сохт К.А. Дисковые бороны и лущильники / К.А. Сохт, Е.И. Трубилин, В.И. Кисилев. – Краснодар: Кубанский ГАУ, 2014. – 164 с.
12. Теория, конструкция и расчёт сельскохозяйственных машин / Е.С. Босой, О.В. Верняев, И.И. Смирнов, Е.Г. Султан – Шах. – М.: Машиностроение, 1978. – 568 с.
13. Яруллин Ф.Ф. Разработка и обоснование параметров ротационного орудия для поверхностной обработки почвы: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Ф.Ф. Яруллин. – Казань: Казанский ГАУ, 2015. – 191 с.
14. Valiev, A. Improvement of rotary tools for the pre-sowing soil cultivation conditions / A. Valiev, J. Matjashin, B. Ziganshin, L. Siraziev // Proceedings of XX International scientific and technical conference on transport, road-building, agricultural, hosting & hauling and military technics and technologies «TRANS & MOTAUTO'12». – Varna, Bulgaria: Scientific-technical union of mechanical engineering, 2012. – p.94-96.

Сведения об авторе:

Гайнутдинов Рамиль Халилович – ст. преподаватель, e-mail: grh1978@mail.ru
 ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», г. Казань, Россия.

SUBSTANTIATION OF THE OPTIMAL INCLINATION ANGLE OF ELLIPSOID DISC OF ROTATION SOIL-PROCESSING EQUIPMENT

Gaynutdinov R.Kh.

Abstract. The technical means, used for surface tillage, do not fully meet the requirements of the technology for the qualitative crumbling of the soil and the destruction of weed vegetation. To solve this problem, on a more qualitative level, rotational tools have been developed in recent years, the working organs of which perform complex movement in space. As the analysis shows, these tools are unstable and unevenly treating the soil. To eliminate these drawbacks, a rotary tool with elliptical disks was developed in Kazan State Agrarian University, which are inclined to the axis of rotation strictly at the calculated angle. In this article, based on the condition, ensuring the sliding entry of rotational working units into the soil, the question of the theoretical justification of the optimal value of the inclination angle of ellipsoid disks to the axis of rotation of the working battery is considered.

Key words: soil cultivation, rotational ellipsoid disk, the angle of the disc.

References

1. Bermant A.F. Kratkiy kurs matematicheskogo analiza [Brief course of mathematical analysis] / A.F. Bermant, I.G. Aramanovich.–Sankt-Peterburg:«Lan», 2005.– p.735

2. Valiev, A.R. Sovershenstvovanie besprivodnyh rotacionnyh rabochnih organov dlja poverkhnostnoj obrabotki pochvy / Ju.I. Matjashin, A.R. Valiev, L.F. Siraziev, K.V. Fedulkina // Vestnik Kazanskogo GAU. – 2012. – № 1 (23). – s. 93 – 97.
3. Valiev, A.R. Klassifikacija rotacionnyh rabochnih organov pochvoobrabatyvajushhij mashin / F.F. Jarullin, A.R. Valiev // Agrarnaja nauka XXI veka. Aktual'nye issledovanija i perspektivy / Trudy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. – Kazan': Kazanskogo GAU, – 2015. – S.147-154.
4. Gainutdinov R. Kh. Rotary tool for surface treatment of the soil with elliptical discs [Rotatsionnoe orudie dlja poverkhnostnoj obrabotki pochvy s illipsovidnymi diskami] / R. Kh. Gainutdinov, S.M. Yakhin, I.I. Aliakberov // Vestnik Kazanskogo GAU. – 2016. – № 2(40). – p.64–67.
5. Gajnutdinov R.H. Kinematika jellipsovidnogo diska rotacionnogo orudija dlja poverkhnostnoj obrabotki pochvy / R.H. Gajnutdinov, S.M. Jahin, I.I. Aliakberov, G.V. Pikhullin // Tehnika i oborudovanie dlja sela. – 2016. – № 8 (230). s.10-14.
6. Kanarev, F.M. Rotatsionnye pochvoobrabatyvajushie mashiny i orudya [Rotary tillage machines and tools] / F.M.Kanarev. –M.: Engineering, 1983. – p.142
7. Kashapov, I.I. Jenergosberegajushhie tehnologii v APK / I.I. Kashapov, B.G. Ziganshin, N.A. Korsakov, A.R. Valiev // Aktual'nye problemy jenergetiki APK: materialy VI mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. – Saratov: OOO «CeSAin», 2015. – s. 88 – 90.
8. Kuzmich L.S. Illipticheskie funktsii. Illipticheskie integraly: Algoritmy tochnogo resheniya [Elliptic functions. Elliptic integrals: Algorithms exact solution] / L.S. Kuzmich.– M.: Knizhnyidom«LIBROKOM», 2013.– p. 48
9. Matjashin, Yu.I. Raschet i proektirovanie rotatsionnykh pochvoobrabatyvajushhij mashin [Calculation and design of rotary tillers] / Yu.I.Matjashin, I.M. Grinchuk, G.M. Egorov. – M.: Agropromizdat, 1988. – p.174.
10. Sovremennye pochvoobrabatyvajushie mashiny: regulirovka, nastrojka i iksploatatsiya [Modern tillage machines: adjustment, adjustment and operation] / R.R.Valiev, B.G. Ziganshin, F.F. Mukamedyarov, S.M. Yakhin, D.T. Khaliullin, I.I. Fayzrakhmanov. – Sankt-Peterburg: “Lan”, 2016. – p.208.
11. Soht K.A. Diskovye borony i lushilniki [Harrows and Cultivators] / K.A.Soht, E.I.Trubilin, V.I.Kiselev. – Krasnodar: Kuban State Agrarian University, 2014. –p.164.
12. Teoriya, konstruksiya i raschet selskokhosaistvennykh mashin [The theory, design and calculation of agricultural machinery] / E.S. Bosoi, O.V. Vernyaev, I.I. Smirnov, E.G. Sultan-Shakh.– M.: Mashinostroenie, 1978. – p. 568.
13. Yarullin F.F. Rasrabotka i obosnovanie parametrov rotatsionnogo orudija dlja poverkhnostnoj obrabotki pochvy: diss. Kand. Tekhn.Nauk: 05.20.01 [Development and substantiation of the parameters of rotary tools for surface processing of soil: diss. ... Cand.tehn. Sciences: 05.20.01]: / F.F. Yarullin. – Kazan: Kasanskiy GAU, 2015. – p. 191.
14. Valiev, A. Improvement of rotary tools for the pre-sowing soil cultivation conditions / A. Valiev, J. Matjashin, B. Ziganshin, L. Siraziev // Proceedings of XX International scientific and technical conference on transport, road-building, agricultural, hosting & hauling and military technics and technologies «TRANS & MOTAUTO'12». – Varna, Bulgaria: Scientific-technical union of mechanical engineering, 2012. – p.94–96.

Authors:

Gaynutdinov Ramil Khalilovich – senior lecturer, e-mail: grh1978@mail.ru
Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.