

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЯГОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РОТАЦИОННОГО ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОРУДИЯ

Л.М. Нуриев

Реферат. Исследования проводили с целью теоретического определения тягового сопротивления ротационного почвообрабатывающего орудия для предпосевной обработки почвы. При разработке теоретических предпосылок использовали результаты предыдущих исследований различных авторов, а также рациональную формулу, предложенную академиком В.П. Горячкиным, для определения тягового сопротивления плуга. Тяговое сопротивление P_t ротационного почвообрабатывающего орудия складывается из тягового сопротивления спирально-винтового рабочего органа ($P_{спр}^{ce}$) и тягового сопротивления секции эллипсоидных игольчатых дисков ($P_{спр}^{uz}$). В свою очередь тяговое сопротивление $P_{спр}^{ce}$ зависит от сил сопротивления почвы перекатыванию, трению и смятию, тяговое сопротивление $P_{спр}^{uz}$ складывается из сил сопротивления почвы трению, резанию и отбрасыванию. Согласно итоговому уравнению, тяговое сопротивление ротационного почвообрабатывающего орудия зависит от конструктивных (сила тяжести спирально-винтового рабочего органа, диаметры спирально-винтового рабочего органа и эллипсоидных игольчатых дисков, угол наклона образующей поверхности спирально-винтового рабочего органа к поверхности почвы, количество игл на эллипсоидном диске, угол наклона ступицы эллипсоидного игольчатого диска к оси вращения, количество эллипсоидных игольчатых дисков в секции), кинематических (поступательная скорость орудия, скорость резания почвы, показатель кинематического режима), технологических (ширина захвата орудия, глубина мульчирования почвы, ширина почвенной стружки, количество игл, одновременно находящихся в почве, коэффициент, учитывающий неровности поверхности спирально-винтового рабочего органа) параметров, а также физико-механических и технологических свойств почвы (плотность, коэффициент сопротивления перекатыванию, коэффициент трения скольжения, коэффициент удельного сопротивления резанию, коэффициент объёмного смятия, коэффициент отбрасывания). Полученное выражение может быть использовано при определении тягового сопротивления аналогичных почвообрабатывающих машин и орудий ротационного типа.

Ключевые слова: ротационное почвообрабатывающее орудие, спирально-винтовой и игольчатые рабочие органы, тяговое сопротивление, конструктивные параметры, кинематические параметры.

Введение. Обоснование конструктивных и кинематических параметров, обеспечение прочности деталей конструкции, сокращение энергетических затрат, а также выявление условий устойчивости движения агрегата – неотъемлемые этапы проектирования любого почвообрабатывающего орудия. Без определения тягового сопротивления, то есть силы, необходимой для перемещения почвообрабатывающего орудия по поверхности обрабатываемого поля выполнить указанные этапы проектирования орудия не представляется возможным [1, 2, 3].

Следует отметить, что динамическая система «рабочий орган – почва» очень сложна [4], а раздельное определение составляющих сил сопротивления почвы графоаналитическим методом представляет значительные трудности и может быть выполнено только при принятии отдельных допущений [5]. В связи с этим, при рассмотрении тягового сопротивления ротационных рабочих органов используют различные методики [6, 7], разработанные на основе рациональной формулы, предложенной академиком В.П. Горячкиным [8] для определения тягового сопротивления плуга.

Цель исследований – разработка теоретических предпосылок к определению тягового сопротивления ротационного почвообрабатывающего орудия с коаксиальным расположением рабочих органов.

Условия, материалы и методы. Методика определения тягового сопротивления ротационного почвообрабатывающего орудия базировалась на законах классической механики.

Ротационное почвообрабатывающее орудие для предпосевной обработки почвы [9] содержит коаксиально установленные на раме пассивный спирально-винтовой рабочий орган и секцию активных эллипсоидных игольчатых дисков. Следовательно, его тяговое сопротивление определяется согласно следующему уравнению:

$$P_m = P_{спр}^{ce} + P_{спр}^{uz}, \quad (1)$$

где P_m – тяговое сопротивление ротационного почвообрабатывающего орудия, Н;

$P_{спр}^{ce}$ – тяговое сопротивление спирально-винтового рабочего органа, Н;

$P_{спр}^{uz}$ – тяговое сопротивление секции эллипсоидных игольчатых дисков, Н.

Результаты и обсуждение. Зависимость для определения тягового сопротивления спирально-винтового рабочего органа имеет вид (рис. 1):

$$P_{спр}^{ce} = P_{спр}^{nep} + P_{ce}^d, \quad (2)$$

где $P_{спр}^{nep}$ – сила сопротивления почвы перекатыванию, Н;

P_{ce}^d – сила сопротивления почвы различным видам деформации, Н.

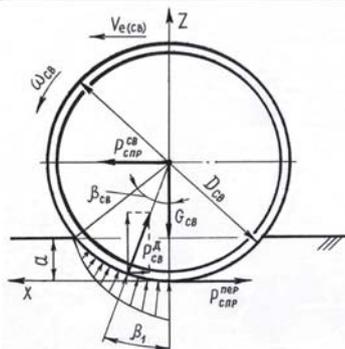


Рис. 1 – Схема к определению тягового сопротивления спирально-винтового рабочего органа: $V_{e(uc)}$ – поступательная скорость орудия, $\omega_{св}$ – угловая скорость рабочего органа, $P_{св}^{пер}$ и $P_{св}^д$ – силы сопротивления почвы на перекачивание и различным видам деформации, $P_{св}^{тр}$ и $P_{св}^{см}$ – силы сопротивления почвы на трение и на смятие, $\beta_{св}$ – угол контакта рабочего органа с почвой; β_1 – угол приложения силы $P_{св}^д$; a – глубина обработки почвы; $D_{св}$ – диаметр рабочего органа.

Сила сопротивления почвы перекачиванию спирально-винтового рабочего органа вычисляется по известной формуле:

$$P_{св}^{пер} = k_{пер} G_{св}, \quad (3)$$

где $k_{пер}$ – коэффициент сопротивления почвы перекачиванию (например, при движении колёсных тракторов по стерне $k_{пер} = 0,08 \dots 0,1$; по вспаханному полю $k_{пер} = 0,12 \dots 0,18$); $G_{св} = mg$ – сила тяжести спирально-винтового рабочего органа и приходящаяся на его долю сила тяжести ротационного орудия, включая силу тяжести секции игольчатых дисков, Н (m – масса рабочего органа и масса орудия, которая приходится на его долю, кг; g – ускорение силы тяжести, m/c^2).

Сила сопротивления почвы $P_{св}^д$ различным видам деформации зависит от сил сопротивления почвы трению и смятию. Выражение для её определения имеет вид:

$$P_{св}^д = P_{св}^{тр} + P_{св}^{см}, \quad (4)$$

где $P_{св}^{тр}$ – сила сопротивления почвы трению, Н; $P_{св}^{см}$ – сила сопротивления почвы смятию, Н.

Сила сопротивления почвы трению о рабочую поверхность спирально-винтового рабочего органа определяется согласно выражению:

$$P_{св}^{тр} = f_{мп} \cdot G_{св} \cos \delta \quad (5)$$

где $f_{мп}$ – коэффициент трения скольжения почвы;

δ – угол наклона образующей поверхности спирально-винтового рабочего органа к поверхности почвы, град.

Силу сопротивления почвы смятию можно определить по так называемой формуле Грандвуане-Горячкина:

$$P_{св}^{см} = 0,86 k_{нр} [(G_{св})^{4/3} / (k_{см}^{1/3} B_{св}^{1/3} D_{св}^{2/3})] \quad (6)$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий рост сопротивления из-за неровности поверхности рабочего органа ($k_{нр} = 1,1 \dots 1,3$);

$k_{см}$ – коэффициент объёмного смятия почвы, H/M^3 (для вспаханного поля

$k_{см} = (2 \dots 5) \cdot 10^6$ H/M^3 , для стернового фона.

$k_{св} = (10 \dots 20) \cdot 10^6$ H/M^3); $B_{св}$ – длина рабочего органа, м;

$D_{св}$ – диаметр рабочего органа, м.

Подставив в выражение (2) значения найденных ранее слагаемых, получим уравнение для определения тягового сопротивления спирально-винтового рабочего органа:

$$P_{св}^д = (k_{нр} + f_{мп} \cos \delta) G_{св} + 0,86 k_{нр} [(G_{св})^{4/3} / (k_{см}^{1/3} B_{св}^{1/3} D_{св}^{2/3})]. \quad (7)$$

Теоретическая зависимость для определения тягового сопротивления секции эллипсоидных игольчатых дисков (рис. 2) имеет вид:

$$P_{св}^{иэ} = P_{св}^{тр} + P_{св}^{рез} + P_{св}^{отб}, \quad (8)$$

где $P_{св}^{тр}$ – сила сопротивления почвы трению, Н;

$P_{св}^{рез}$ – сила сопротивления почвы резанию, Н;

$P_{св}^{отб}$ – сила сопротивления почвы отбрасыванию, Н.

С учётом того, что диск вращается «сверху вниз», направление горизонтальной составляющей P_x равнодействующей $P_{иэ}^д$ всех элементарных сил сопротивления почвы различным

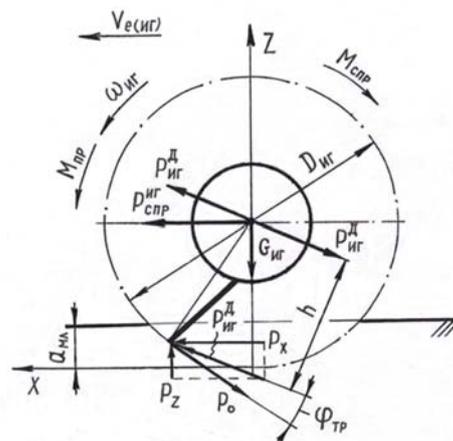


Рис. 2 – Схема к определению тягового сопротивления эллипсоидного игольчатого диска: $V_{e(иг)}$ – поступательная скорость орудия, $\omega_{иг}$ – угловая скорость диска, $D_{иг}$ – диаметр диска, $G_{иг}$ – сила тяжести диска, $P_{иэ}^д$ – равнодействующая всех элементарных сил сопротивления почвы различным видам деформации, $P_{св}^{тр}$ – сила сопротивления трению почвы, $P_{св}^{рез}$ и $P_{св}^{отб}$ – силы сопротивления почвы резанию и отбрасыванию, $M_{св}$ – момент сопротивления, $M_{пр}$ – приводной момент, $\phi_{тр}$ – угол трения почвы, h – плечо приложения силы $P_{иэ}^д$, $a_{мл}$ – глубина мульчирования почвы.

видам деформации совпадает с направлением поступательной скорости $V_{e(иг)}$ агрегата. Сила сопротивления почвы создает на валу игольчатого диска момент сопротивления:

$$M_{cnp} = P_{uc}^0 h, \quad (9)$$

где h – плечо приложения силы сопротивления почвы, м.

Момент сопротивления уравновешивается приводным моментом:

$$M_{np} = 2P_o / D_{иг}, \quad (10)$$

где P_o – окружное усилие, Н;

$D_{иг}$ – диаметр эллипсовидного игольчатого диска, м.

Если приводной момент известен по экспериментальным данным, то из формулы (10) можно легко определить окружное усилие.

Сила сопротивления почвы трению зависит от нормальной реакции N_n и коэффициента $f_{тр}$ трения скольжения почвы и определяется по известной формуле: $P_{cnp}^{mp} = N_n f_{mp}$. В качестве нормальной реакции почвы в данном случае принимается сила тяжести снимаемой одной иглой почвенной стружки, вычисляемая по формуле:

$$N_n = F_{cnp} l_{cnp} \rho g \quad (11)$$

где F_{cnp} – площадь бокового сечения почвенной стружки, м²;

l_{cnp} – ширина почвенной стружки, м;

ρ – плотность почвы, кг / м³;

g – ускорение силы тяжести, м / с².

Площадь бокового сечения почвенной стружки вычисляется из следующего уравнения:

$$F_{cnp} = \pi D_{иг} a_{мл} / (\lambda k_{игл} \sin \alpha), \quad (12)$$

где $a_{мл}$ – глубина мульчирования почвы, м;

λ – показатель кинематического режима;

$k_{игл}$ – количество игл на диске, шт.;

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

Следовательно, окончательно имеем:

$$P_{cnp}^{mp} = \pi D_{иг} a_{мл} l_{cnp} \rho g f_{mp} / (\lambda k_{игл} \sin \alpha), \quad (13)$$

Силу сопротивления почвы резанию можно вычислить из зависимости:

$$P_{cnp}^{рез} = F_{cnp} k_{cnp}^{y0} = \pi D_{иг} a_{мл} k_{cnp}^{y0} / (\lambda k_{игл} \sin \alpha), \quad (14)$$

где k_{cnp}^{y0} – коэффициент удельного сопротивления почвы резанию, Н/м² (по данным Ф.М. Канарёва [4], который анализировал различные литературные источники, включая зарубежные, $k_{cnp}^{y0} = (0,03 \dots 0,05)$ (МПа).

Сила сопротивления почвы отбрасыванию определяется по формуле:

$$P_{cnp}^{отб} = k_{отб} m_n V_{рез}, \quad (15)$$

где $k_{отб}$ – коэффициент отбрасывания почвы;

m_n – масса почвы, отбрасываемой иглой за одну секунду, кг/с;

$V_{рез}$ – скорость резания в момент входа иглы в почву, м/с.

Скорость резания почвы вычисляется согласно уравнению [10]:

$$V_{рез} = D_{иг} \omega_{иг} \sqrt{(1/\lambda - \sin \beta_{сег})^2 + \cos^2 \beta_{сег} (1/\text{tg}^2 \alpha + 1)} / 2, \quad (16)$$

где $\beta_{сег}$ – половина центрального угла сегмента окружности, в котором иглы поочерёдно погружаются в почву, град.;

$\omega_{иг}$ – угловая скорость диска, с⁻¹.

Величина $\beta_{сег}$ определяется по формуле:

$$\beta_{сег} = \arccos(1 - 2a_{мл} / D_{иг}), \quad (17)$$

Коэффициент отбрасывания почвы зависит от скорости резания и скорости поступательного движения почвообрабатывающего орудия, $k_{отб} = 0,7 \dots 0,75$. В свою очередь, масса почвы, отбрасываемой иглой за одну секунду, вычисляется согласно зависимости:

$$m_n = a_{мл} l_{cnp} \rho (V_{рез} - V_{e(иг)}), \quad (18)$$

где $V_{e(иг)}$ – поступательная скорость орудия, м / с.

Таким образом,

$$P_{cnp}^{отб} = k_{отб} a_{мл} l_{cnp} \rho (V_{рез} - V_{e(иг)}) V_{рез}, \quad (19)$$

После подстановки в уравнение (7) значений составляющих слагаемых с учетом количества k_d игольчатых дисков в секции и количество $k_{игл}^{раб}$ игл, одновременно находящихся в почве, получим выражение для определения тягового сопротивления секции эллипсовидных игольчатых дисков в целом:

$$P_{cnp}^{uc} = k_d k_{игл}^{раб} \{ [\pi D_{иг} a_{мл} / (\lambda k_{игл} \sin \alpha)] (l_{cnp} \rho g f_{mp} + k_{cnp}^{y0}) + k_{отб} a_{мл} l_{cnp} \rho (V_{рез} - V_{e(иг)}) V_{рез} \}, \quad (20)$$

Количество игл, одновременно находящихся в почве, определяется из зависимости:

$$k_{игл}^{раб} = \beta_{сег} k_{игл} / \pi, \quad (21)$$

Окончательное уравнение для определения тягового сопротивления ротационного почвообрабатывающего орудия примет следующий вид:

$$P_m = (k_{нр} + f_{нр} \cos \delta) G_{св} + 0,86 k_{ф} [(G_{св})^{4/3} / (k_{см}^{1/3} B_{св}^{1/3} D_{св}^{2/3})] + k_d k_{игл}^{раб} \{ [\pi D_{иг} a_{мл} / (\lambda k_{игл} \sin \alpha)] (l_{cnp} \rho g f_{mp} + k_{cnp}^{y0}) + k_{отб} a_{мл} l_{cnp} \rho (V_{рез} - V_{e(иг)}) V_{рез} \}, \quad (22)$$

Уравнение (22) показывает, что тяговое сопротивление ротационного почвообрабатывающего орудия зависит от конструктивных, кинематических и технологических параметров спирально-винтового рабочего органа и эллипсовидных игольчатых дисков, а также от физико-механических и технологических свойств почвы.

Вывод. Проведенное исследование позволяет решить задачу теоретического определения тягового сопротивления ротационного почвообрабатывающего орудия и выработать практические меры по его снижению. Теоре-

тические предпосылки могут быть использованы при определении тягового сопротивления аналогичных почвообрабатывающих машин и орудий ротационного типа.

Литература

1. Borissov B. Resistance of operating equipment and agricultural machinery during progressive and rotary motion // Bulgarian of Journal of agricultural science. 2007. No 13, P. 141–149.
2. Traction resistance of a ripper with a current distribution line / Z. Batirov, Sh. Sharipov, Y. Mahmudov, et al. // E3S Web of Conferences. 2021. No. 264. 04050. URL: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> (дата обращения: 21.06.2021).
3. Results of experiments to determine the traction resistance of a disk working body / R. Sakhapov, R. Gainutdinov, M. Mahmutov, et al. // E3S Web of Conferences. 2021. No. 222. 03006. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022203006> (дата обращения: 21.06.2021).
4. Канарёв Ф.М. Ротационные почвообрабатывающие машины и орудия. М.: Машиностроение, 1983. 142 с.
5. Тягово-приводные комбинированные почвообрабатывающие машины: монография / В.И. Ветохин, И. М. Панов, В.А. Шмонин и др. Киев: «Феникс», 2009. 263 с.
6. Аушев М.Х. Параметры и режимы работы комбинированного почвообрабатывающего агрегата для предпосевной обработки почвы: дисс. ... канд. техн. наук. Нальчик, 2018. 141 с.
7. Капустин А.Н. Основы теории и расчета машин для основной и поверхностной обработки почв, посевных машин и машин для внесения удобрений. Томск: Томский политехнический университет, 2013. 134 с.
8. Горячкин В.И. Собрание сочинений. М.: Колос, 1968. Т. 3. 360 с.
9. Яхин С.М., Алиакберов И.И., Нуриев Л.М. Ротационное комбинированное орудие для предпосевной обработки почвы // Патент РФ №195364, 23.01.2020.
10. 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. С. 12– 5.

Сведения об авторе:

Нуриев Ленар Мидхатович – соискатель, e-mail: nurlm@mail.ru
Казанский государственный аграрный университет, Казань. Россия

TO DETERMINING TRACTION RESISTANCE ROTARY TILLAGE TOOL L.M. Nuriev

Abstract. The research was carried out with the aim of theoretically determining the traction resistance of a rotary tillage tool for pre-sowing soil cultivation. When developing theoretical prerequisites, we used the results of previous studies by various authors, as well as a rational formula proposed by Academician V.P. Goryachkin to determine the traction resistance of the plow. The traction resistance P_t of the rotary tillage tool is made up of the traction resistance of the spiral-screw working body (P_{sp}^{pr}) and the traction resistance of the section of ellipsoidal needle discs (P_{sp}^{ig}). In turn, the traction resistance P_{sp}^{pr} depends on the forces of resistance of the soil to rolling, friction and crushing, the traction resistance P_{sp}^{ig} consists of the forces of resistance of the soil to friction, cutting and throwing away. According to the final equation, the traction resistance of the rotary tillage tool depends on the design (the gravity of the spiral-screw working body, the diameters of the spiral-screw working body and ellipsoidal needle disks, the angle of inclination of the forming surface of the spiral-screw working body to the soil surface, the number of needles on the ellipsoidal disk, the angle of inclination of the hub of the elliptical needle disc to the axis of rotation, the number of elliptical needle discs in the section), kinematic (translational speed of the implement, cutting speed of the soil, the indicator of the kinematic mode), technological (width of the tool grasp, depth of soil mulching, width of soil shavings, number of needles simultaneously in the soil, the coefficient taking into account the surface roughness of the spiral-screw working body) parameters, as well as the physical, mechanical and technological properties of the soil (density, rolling resistance coefficient, sliding friction coefficient, coefficient of resistivity to cutting, coefficient of volumetric crushing, coefficient of rejection). The resulting expression can be used to determine the traction resistance of similar tillage machines and rotary-type implements.

Key words: rotary tillage tool, spiral-screw and needle working bodies, traction resistance, design parameters, kinematic parameters.

References

1. Borissov B. Resistance of operating equipment and agricultural machinery during progressive and rotary motion. Bulgarian of Journal of agricultural science. 2007; 13. 141-149 p.
2. Batirov Z, Sharipov Sh, Makhmudov Y. Traction resistance of a ripper with a current distribution line. [Internet]. E3S Web of Conferences. 2021; 264. 04050. [cited 2021, June 21]. Available from: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.
3. Sakhapov R, Gainutdinov R, Makhmutov M. Results of experiments to determine the traction resistance of a disk working unit. [Internet]. E3S Web of Conferences. 2021. 222. 03006. [cited 2021, June 21]. Available from: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022203006>.
4. Kanarev FM. Rotatsionnye pochvoobrabatyvayushchie mashiny i orudiya. [Rotary tillage machines and implements]. Moscow: Mashinostroenie. 1983; 142 p.
5. Vetokhin VI, Panov IM, Shmonin VA. Tyagovo-privodnye kombinirovannye pochvoobrabatyvayushchie mashiny: monografiya. [Traction-drive combined tillage machines: monograph]. Kiev: "Feniks". 2009; 263 p.
6. Aushev MKh. Parametry i rezhimy raboty kombinirovannogo pochvoobrabatyvayushchego agregata dlya predposevnoi obrabotki pochvy: diss. ... kand. tekhn. nauk. [Parameters and modes of operation of the combined tillage unit for pre-sowing tillage: dissertation for a degree of Ph.D. of Technical sciences]. Nal'chik. 2018; 141 p.
7. Kapustin AN. Osnovy teorii i rascheta mashin dlya osnovnoi i poverkhnostnoi obrabotki pochv, posevnykh mashin i mashin dlya vnesheniya udobrenii. [Fundamentals of the theory and calculation of machines for basic and surface tillage, sowing machines and machines for fertilizing]. Tomsk: Tomskii politekhnicheskii universitet. 2013; 134 p.
8. Goryachkin VP. Sbranie sochinenii. [Collection of articles]. Moscow: Kolos. 1968; 3. 360 p.
9. Yakhin SM, Aliakberov II, Nuriev LM. [Rotary combined tool for pre-sowing tillage]. Patent RF №195364. 23.01.2020.
10. Yakhin SM, Aliakberov II, Nuriev LM. [Kinematics of a needle-shaped elliptical disk of a rotary tillage tool]. Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2020; 2. 12-25 p.

Author:

Nuriev Lenar Midkhatovich - applicant, e-mail: nurlm@mail.ru
Kazan State Agrarian University, Kazan. Russia