

## Методика определения внутренних усилий почвообрабатывающего диска

**Виктор Александрович Дробот, Анатолий Сергеевич Брусенцов, Светлана Олеговна Черняева**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», г. Краснодар, Россия.  
e-mail: viktor.drobot.85@mail.ru

**Аннотация:** прочность и надежность сельскохозяйственных машин и орудий являются основой рационального и своевременного ведения сельскохозяйственного производства. В работе рассмотрены вопросы прочности рабочих органов почвообрабатывающих рабочих органов на примере почвообрабатывающего диска посредством определения внутренних напряжений

**Ключевые слова:** почвообрабатывающие дисковые рабочие органы; пластина; механическое напряжение; условие прочности

**Для цитирования:** Дробот В. А., Брусенцов А. С., Черняева С. О. Методика определения внутренних усилий почвообрабатывающего диска // Аграрный научный журнал. 2023. № 4. С. 100–105. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i4pp100-105>.

## AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

## Methodology for determining the internal forces of the tillage disk

**Viktor A. Drobot, Anatoly S. Brusentsov, Svetlana O. Chernyaeva**  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin”, Krasnodar, Russia  
e-mail: viktor.drobot.85@mail.ru

**Abstract:** the strength and reliability of agricultural machines and implements is the basis of rational and timely agricultural production. The article considers the issues of the strength of the working bodies of tillage working bodies on the example of a tillage disk by determining internal stresses

**Keywords:** tillage disk working bodies; plate; mechanical stress; strength condition

**For citation:** Drobot V. A., Brusentsov A. S., Chernyaeva S. O. Methodology for determining the internal forces of the tillage disk // Agrarnyy nauchnyy zhurnal = The Agrarian Scientific Journal. 2023;(4):100–105. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i4pp100-105>.

**Введение.** В технологии возделывания зерновых культур на юге страны, под которые отводится более половины пахотных земель, с учетом эколого-мелиоративных особенностей, главное место отводится основной обработке почвы. Регулируя с ее помощью строение и структурный состав почвы, можно оказывать воздействие на весь комплекс условий жизни растений – тепловой, водный и пищевой режимы почвы [1].

В настоящее время уделяется большое внимание вопросу развития сельского хозяйства, успешному осуществлению продовольственной программы нашей страны. Наблюдается постоянное совершенствование средств комплексной механизации всех отраслей сельского хозяйства, внедрение более мощных энергетических средств и перевода работы машинно-тракторных агрегатов на повышенные скорости [2, 3].





Перевод работ машин на повышенные скорости сопровождается целым рядом нежелательных явлений: растут динамические нагрузки, сопротивление рабочего органа [6], снижается устойчивость работы агрегата [5, 9], возрастает скорость абразивного износа рабочих органов, ухудшаются условия работы механизаторов [4]. Быстрый износ деталей сельскохозяйственных машин приводит к существенному возрастанию сопротивления агрегата и перерасходу горючего, увеличению простоев агрегата, вызванных заменой изношенных рабочих органов новыми, росту расхода денежных средств на ремонт и переточку рабочих органов, особенно, работающих в условиях трения скольжения, ухудшению качества обработки возделываемых культур.

Как вариант устранения указанных ранее негативных факторов, нами предлагается, использование рабочих органов, работающих в условиях трения качения, например, дисковых рабочих органов, имеющих конструктивную возможность вращения либо за счет трения об обрабатываемую поверхность, либо принудительное вращения посредством вала отбора мощности и других устройств.

Расчет конструктивных параметров самого рабочего органа должен отвечать разноречивым условиям: с одной стороны должна быть обеспечена прочность диска, с другой – экономичность, снижение материалоемкости, применение более легких и дешевых материалов [7, 10]. Механические модели расчета позволяют более детально рассмотреть основу физического процесса работы конструкции [9], более правильно оценить влияние внутренних силовых факторов, жесткость и прочность самого диска, как основы рабочего органа, и, как следствие, позволяет снизить экономические затраты.

Цель работы состоит в исследовании основных механических характеристик прочности поверхности дискового почвообрабатывающего рабочего органа и анализе эффективности разработки и создания ротационных дисковых рабочих органов для основной обработки почвы.

Рассмотрение вышеизложенного материала создает необходимость постановки и решения следующих научных задач:

- 1) обосновать эффективность снижения тягового сопротивления путем замены трения скольжения трением качения;
- 2) выявить закономерности влияния силовых факторов при взаимодействии рабочих поверхностей диска с пластом почвы на главные напряжения на наружной и внутренней поверхностях диска в опасном сечении.

**Методика исследований.** Рассмотрим диск как пластину. При этом должно выполняться условие

$$\frac{1}{40} < \frac{\delta}{d} < \frac{1}{5},$$

где  $\delta$  – толщина пластины (диска), м;  $d$  – диаметр диска, м.

Под действием сил, перпендикулярных к срединной плоскости, диск изгибается, но вследствие достаточной жесткости прогиб  $\omega$  не превосходит толщины диска  $\delta$ .

Условия закрепления диска можно рассмотреть по схеме (рис. 1), как для кольцевой пластины, внутренний контур которой защемлен.

Граничные условия для такого случая следующие:

- 1)  $x = b, M_r = 0$ ;
- 2)  $x = a, \varphi = 0$ ;
- 3)  $x = a, \omega = 0$ .

где  $a$  – радиус внутреннего контура, м;  $b$  ( $r_1$ ) – радиус дискового рабочего органа, м;  $M_r$  – радиальный момент, Н·м;  $\omega$  – прогиб срединной поверхности пластины, м;  $\varphi$  – угол наклона прямой  $TT$ , касательной к изогнутой срединной поверхности пластины, проведенной в рассматриваемой точке  $A$ .

Выражения для сосредоточенной силы, в месте взаимодействия пласта почвы с диском:

$$P = q \cdot A = q \frac{r_1^2}{2} (2\alpha - \sin 2\alpha).$$

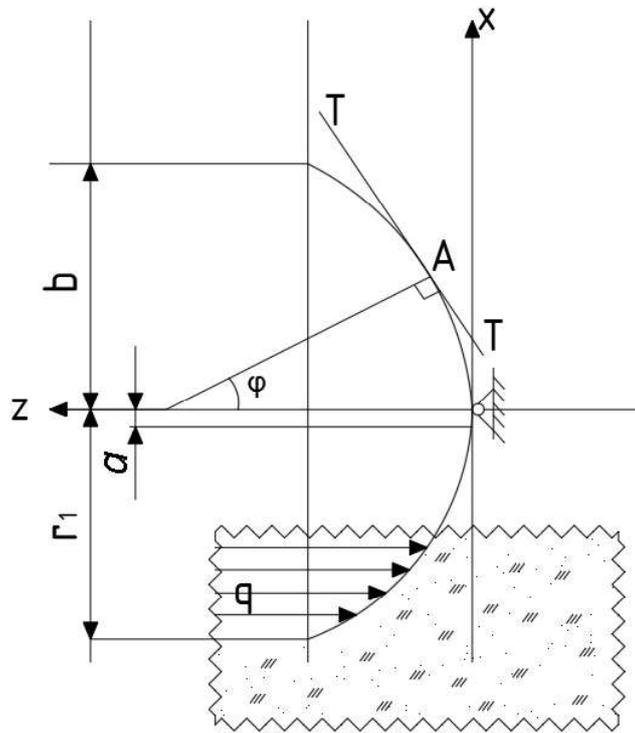


Рис. 1. Схема закрепления диска относительно почвенного пласта

Уравнение углов поворота нормали к изогнутой срединной поверхности и уравнение изогнутой срединной поверхности пластины получаем последовательным интегрированием дифференциального уравнения:

$$\varphi = -\frac{P}{8\pi D} x(2\ln x - 1) - \frac{q}{16D} x^3 + \frac{C_1}{2} x + C_2 \frac{1}{x}, \quad (1)$$

$$\omega = \frac{P}{8\pi D} x^2(\ln x - 1) + \frac{q}{64D} x^4 - \frac{C_1}{4} x^2 - C_2 \ln x + C_3, \quad (2)$$

$$D = \frac{E \cdot \delta^3}{12(1-\mu^2)},$$

где  $P$  – сосредоточенная сила, Н;  $q$  – усредненная распределенная нагрузка, действующая со стороны пласта на поверхность диска, Н/м<sup>2</sup>;  $A$  – площадь поверхности контакта диска с пластом почвы (рис. 2), м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – угол между осью диска и радиусом, проведенным из центра сферы к рассматриваемой точке;  $D$  – цилиндрическая жесткость пластины, Н·м;  $E$  – модуль продольной упругости, МПа;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\delta$  – толщина пластины, м;  $C_1, C_2, C_3$  – постоянные интегрирования.

Принимаем, что на сегмент диска действует только распределенная нагрузка  $q$ , тогда уравнения (1) и (2) принимают следующий вид:

$$\varphi = -\frac{q}{16D} x^3 + \frac{C_1}{2} x + C_2 \frac{1}{x}, \quad (3)$$

$$\omega = \frac{q}{64D} x^4 - \frac{C_1}{4} x^2 - C_2 \ln x + C_3. \quad (4)$$

Для определения постоянных интегрирования воспользуемся граничными условиями:

при  $x = 0$  принимаем  $C_3 = 0$  (при  $x = 0$  нет пластины);

при  $x = a$  получаем, что  $\varphi = 0$ ;  $\omega = 0$ .

Подставим граничные условия в уравнения (3) и (4) имеем:

$$0 = -\frac{q}{16D} a^3 + \frac{C_1}{2} a + \frac{C_2}{a}, \quad (5)$$



$$0 = \frac{q}{64D} a^4 - \frac{C_1}{4} a^2 - C_2 \cdot \ln a. \quad (6)$$

Из выражения (6) получаем:

$$C_2 = \frac{\frac{q}{64D} a^4 - \frac{C_1}{4} a^2}{\ln a}.$$

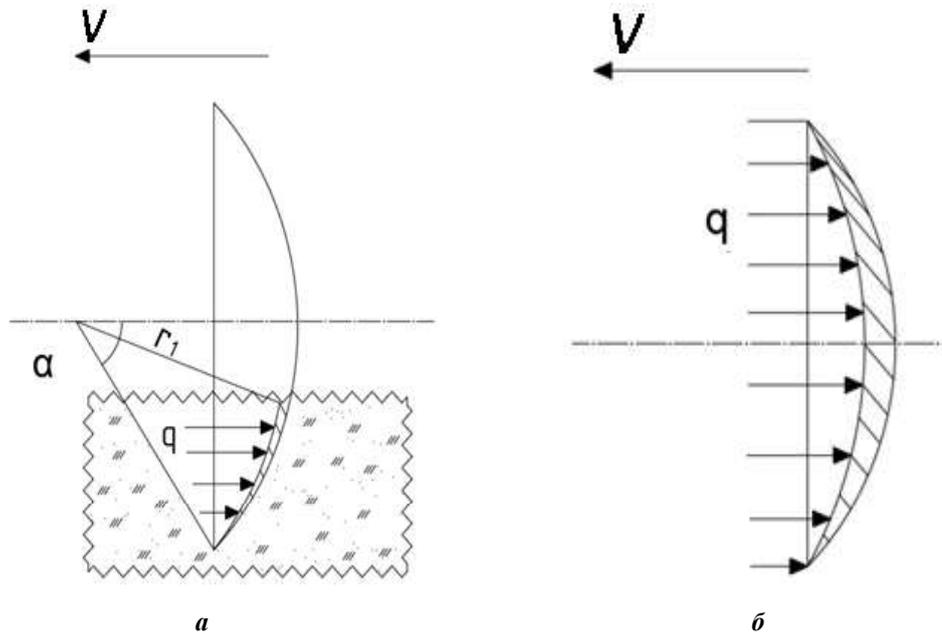


Рис. 2. Схема к определению площади поверхности контакта диска с пластом почвы: а – сегмент диска; б – вид сверху сегмент диска, расположенный в почве

Далее, подставляя найденное выражение для постоянной интегрирования  $C_2$  в уравнение (5), находим  $C_1$ :

$$0 = -\frac{q}{16D} a^3 + C_1 \frac{a}{2} + \frac{1}{a} \left( \frac{\frac{q}{16D} a^4 - \frac{C_1}{4} a^2}{\ln a} \right),$$

откуда

$$C_1 = \frac{\frac{q}{16D} a^3 \left( -1 + \frac{1}{\ln a} \right)}{\frac{a}{2} + \frac{a}{4 \ln a}}.$$

Беря за основу выражения (7) и (8), определим радиальный  $M_r$  и окружной  $M_\tau$  изгибающие моменты, приходящиеся на единицу поверхности:

$$M_r = -D \left( \frac{d^2 \omega}{dx^2} + \frac{\mu}{x} \cdot \frac{d\omega}{dx} \right), \quad (7)$$

$$M_\tau = -D \left( \frac{1}{x} \cdot \frac{d\omega}{dx} + \mu \frac{d^2 \omega}{dx^2} \right). \quad (8)$$

Выполним дифференцирование уравнения (4):

$$\frac{d\omega}{dx} = \frac{q}{16D} x^3 - \frac{C_1}{2} x - C_2 \frac{1}{x},$$

$$\frac{d^2 \omega}{dx^2} = \frac{3q}{16D} x^2 - \frac{C_1}{2} + C_2 \frac{1}{x^2},$$





$$M_r = -D \left( \frac{3q}{16D} x^2 - \frac{C_1}{2} + C_2 \frac{1}{x^2} + \frac{\mu q}{16D} x^2 - \frac{\mu C_1}{2} - \frac{\mu C_2}{x^2} \right),$$

$$M_r = -D \left( \frac{3q}{16D} x^2 - \frac{C_1}{2} + \frac{C_2}{x^2} + \frac{\mu q}{16D} x^2 - \frac{\mu C_1}{2} - \frac{\mu C_2}{x^2} \right) =$$

$$= -D \left( \frac{3+\mu}{16} \cdot \frac{q}{D} x^2 - \frac{1+\mu}{x^2} C_1 + \frac{1-\mu}{x^2} C_2 \right);$$

$$M_T = -D \left( \frac{1}{x} \cdot \frac{3q}{16D} x^3 - \frac{1}{x} \cdot \frac{C_1}{2} x - C_2 \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{x} + \frac{3q}{16D} \mu x^2 - \frac{C_1 \mu}{2} + C_2 \frac{1}{x^2} \mu \right)$$

$$M_T = -D \left( \frac{q}{16D} x^2 - \frac{C_1}{2} - C_2 \frac{1}{x^2} + \frac{3q}{16D} \mu x^2 - C_1 \frac{1}{2} \mu + C_2 \frac{1}{x^2} \mu \right).$$

**Результаты исследований.** Используя законы механики твердого деформируемого тела, составим выражения для определения так называемых главных напряжений, возникающих на наружной и внутренней поверхностях дискового рабочего органа в наиболее напряженном сечении:

$$\sigma_{r \max} = \pm \frac{M_r \cdot 6}{h^2},$$

$$\sigma_{T \max} = \pm \frac{M_T \cdot 6}{h^2}.$$

Мы имеем плоское напряженное состояние, при котором два из главных напряжения отличны от нуля, третье напряжение, действующее по площадке, параллельной срединной поверхности, равно нулю. Напряжение, применяемое для расчетов и имеющее близкое значение к допускаемому, напрямую зависит от знака определенных выше главных напряжений и определится по одной из теорий прочности. Учитывая конструктивные особенности рассматриваемого дискового рабочего органа, принимаем, что опасное сечение расположено в заземлении ( $x = a$ ). Изгибающие моменты, радиальный  $M_r$  и окружной  $M_T$  вызывают растяжение волокон внутренней поверхности рабочего органа и сжатие волокон внешней. При этом радиальный момент в рассматриваемом сечении имеет значение большее, чем окружной.

Рассматривая материал диска как пластичный, напряженное состояние оценим, применяя третью теорию прочности, согласно которой:

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma].$$

Волокна в точке внутренней поверхности растянуты, т.е. напряжения положительны, поэтому следует обозначить:  $\sigma_1 = \sigma_r$ ,  $\sigma_2 = \sigma_T$ ,  $\sigma_3 = 0$ .

Условие прочности для рассматриваемого диска равно:

$$\sigma_{r \max} = \frac{M_r \cdot 6}{h^2} \leq [\sigma].$$

**Заключение.** На основе представленного материала можно сделать следующие выводы.

Замена трения скольжения трением качения снижает тяговое сопротивление агрегата в целом, уменьшает износ лезвия рабочего органа, тем самым увеличивая его ресурс.

Вращение дисковых рабочих органов, способствует переносу частиц почвы, что улучшает качество перемешивания обрабатываемого слоя почвы.

Изученная методика расчета позволяет составить условие прочности дискового рабочего органа, в зависимости от действующих внешних нагрузок и его конструктивных особенностей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплекс для обработки почвы, внесения удобрений и сева семян травосмесей: пат. 2626170 С Рос. Федерация. № 2016116169 / Тарасенко Б.Ф., Оськин С.В., Руднев С.Г., Пищиков И.С., Семенов А.С., Богатырев Н.И.; заявл. 25.04.2016; опубл. 21.07.2017.
2. Маслов Г. Г., Юдина Е. М., Вовк В. В. Эффективность оборотных плугов без полевой доски // Сельский механизатор. 2018. № 10. С. 14–15. EDN YRPEIP.
3. Маслов Г. Г., Юдина Е. М., Журий И. А. Эффективность поверхностной обработки почвы стерневым многофункциональным культиватором // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 3. С. 7–11. EDN XSEMIH.
4. Магущенко А. Е., Глазков Д. В., Бондаренко А. А. О возможных причинах снижения надежности комбинированных агрегатов для поверхностной обработки почвы // Материалы III Нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Керчь, 2022. С. 198–200.
5. Петунина И. А., Руднев С. Г. Устойчивость движения плуга // Теория и практика современной аграрной науки: сб. III нац. (Всерос.) науч. конф. с междунар. участием. Новосибирск, 2020. С. 80–83.
6. Петунина И. А., Руднев С. Г. Сопrotивление плуга при вспашке // Год науки и технологий 2021: сб. тезисов по материалам Всерос. науч.-практ. конф. Отв. за выпуск А. Г. Коцаев. Краснодар, 2021. С. 154.
7. Плуг ярусный-рыхлитель: пат. 193870 U1 Рос. Федерация. № 2019119747 / Петунина И.А., Руднев С.Г.; заявл. 24.06.2019 ; опубл. 19.11.2019, Бюл. № 32. С. 6.
8. Построение развёртки Г-образного ножа ротационного культиватора / В.В. Драгуленко [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022. № 2 (94). С. 79–82.
9. Юдина Е. М. Совершенствование приемов обработки почвы // Проблемы и перспективы инновационного развития агротехнологий: материалы XX Междунар. науч.-произв. конф. Белгород, 2016. С. 141–142. EDN NGHHGP.
10. Юдина Е. М., Юдин М. О., Журий И. А. Перспективы создания отечественных комбинированных агрегатов для обработки почвы // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 1. С. 46–50. EDN TNVQHD.

## REFERENCES

1. Complex for tillage, fertilization and sowing seeds of grass mixtures: Pat. 2626170 C Ros. Federation. № 2016116169 / Tarasenko B.F., Oskin S.V., Rudnev S.G., Pitsykov I.S., Semenov A.S., Bogatyrev N.I.; dec. 04/25/2016; publ. 07/21/2017.
2. Maslov G. G., Yudina E. M., Vovk V. V. Efficiency of reversible plows without a field board. *Rural machine operator*. 2018; 10: 14-15. EDN YRPEIP.
3. Maslov G. G., Yudina E. M., Zhuriy I. A. Efficiency of surface tillage with a multifunctional stubble cultivator. *Tractors and agricultural machines*. 2018; 3: 7–11. EDN XSEMIH.
4. Matushchenko A. E., Glazkov D. V., Bondarenko A. A. On the possible reasons for the decrease in the reliability of combined aggregates for surface tillage. Kerch, 2022: 198–200.
5. Petunina I. A., Rudnev S. G. Stability of the plow movement. *Theory and practice of modern agrarian science*. Novosibirsk, 2020: 80–83.
6. Petunina I. A., Rudnev S. G. Plow resistance during plowing. *Year of Science and Technology 2021*. Krasnodar, 2021: 154.
7. Longline plow-ripper: Pat. 193870 U1 Ros. Federation. No. 2019119747 / Petunina I.A., Rudnev S.G.; dec. 06/24/2019; publ. 11/19/2019, Bull. No. 32. p. 6.
8. Construction of a sweep of the L-shaped knife of a rotary cultivator / V.V. Dragulenko et al. *Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*. 2022; 2 (94): 79–82.
9. Yudina E. M. Improving the methods of tillage. *Problems and prospects of innovative development of agricultural technologies*. Belgorod, 2016: 141–142. EDN NGHHGP.
10. Yudina E. M., Yudin M. O., Zhuriy I. A. Prospects for the creation of domestic combined aggregates for tillage. *Proceedings of the Velikiye Luki State Agricultural Academy*. 2015; 1: 46–50. EDN TNVQHD.

Статья поступила в редакцию 2.10.2022; одобрена после рецензирования 21.10.2022; принята к публикации 8.11.2022.  
The article was submitted 2.10.2022; approved after reviewing 21.10.2022; accepted for publication 8.11.2022.

