

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИГЛЫ РОТАЦИОННОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА С ПОЧВОЙ

## THE INTERACTION OF THE ROTATION WORKING BODY NEEDLE WITH THE SOIL

к.т.н., доцент, С.А. Твердохлебов<sup>1</sup>, инженер А.В. Пономарев<sup>2</sup> студент А.В. Беляев<sup>3</sup>  
ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ имени И.Т. Трубилина<sup>1</sup>, Краснодар, Россия tsa200862@rambler.ru

Candidate of Technical Sciences, associate professor, S. A. Твердохлебов<sup>1</sup>, An engineer, A. V. Ponomarev<sup>2</sup>  
A student, A. V. Беляев<sup>3</sup>

KUBAN STATE AGRARIAN UNIVERSITY named after I. T. Trubilin<sup>1,3</sup>, Krasnodar, Russia tsa200862@rambler.ru

**АННОТАЦИЯ:** В данной статье представлено теоретическое решение по определению тягового сопротивления борозы зубовой разработанной и изготовленной по патенту [4]. На основании теоретических предпосылок, сформулирована рабочая гипотеза, получившая теоретическое решение в виде нового концептуального подхода по определению тягового сопротивления почвообрабатывающих орудий, на основании общепринятых положений и законов математики и теоретической механики.

**ABSTRACT:** this article presents a theoretical solution to determining the traction resistance of the tooth harrow designed and manufactured according to the patent [4]. The working hypothesis based on the theoretical assumptions is formulated. It has received the theoretical solution in the form of a new conceptual approach to determining the traction resistance of the tillage implements being based on the internationally accepted regulations and laws of mathematics and theoretical mechanics.

**Ключевые слова:** тяговое сопротивление, сила сопротивления почвы, рабочий орган, почвообрабатывающее орудие, теоретическая зависимость.

**Key words:** traction resistance, soil resistance force, working body, tillage implement, theoretical dependence.

### 1 Введение

Во время работы ротационный рабочий орган перекачивается по поверхности почвы приствольной полосы, при этом иглы поочередно заглубляются до 8 см, тем самым осуществляя процесс рыхления, проделывая в почве определённую траекторию до момента выхода из неё, описывает в воздухе дугу и процесс повторяется [4,5] (рисунок 1).

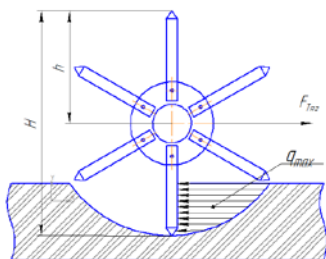
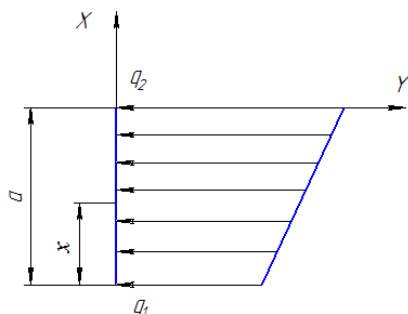


Рисунок 1 – Реакция почвы на движущийся ротационный игольчатый рабочий орган

Так как затраты энергии на деформацию пласта игла производит в период своего движения в почве [3] можно сделать вывод, что тяговое сопротивление рабочего органа зависит от объёма почвы, вынесенного на поверхность.

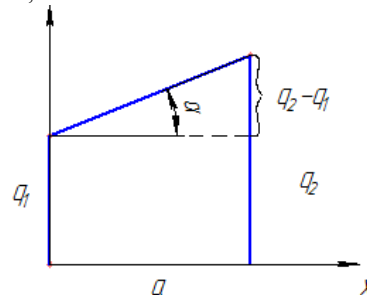
### 2 Предпосылки и средства решения проблемы

Рассмотрим случай, когда игла ротационного рабочего органа находится на максимальной глубине в почве [6] (рисунок 2).



$$q = q_1 + k \cdot x \quad (1)$$

где  $q$  – интенсивность нагрузки на единицу длины, кН/м;  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $x$  – текущая координата.  $a$  – глубина обработки, м



при  $x = 0$ ,  $q = q_1$  при  $x = a$ ,  $q = q_2$   $k = tg \alpha = \frac{q_2 - q_1}{a}$

Рисунок 2 – Схемы для определения коэффициента  $k$

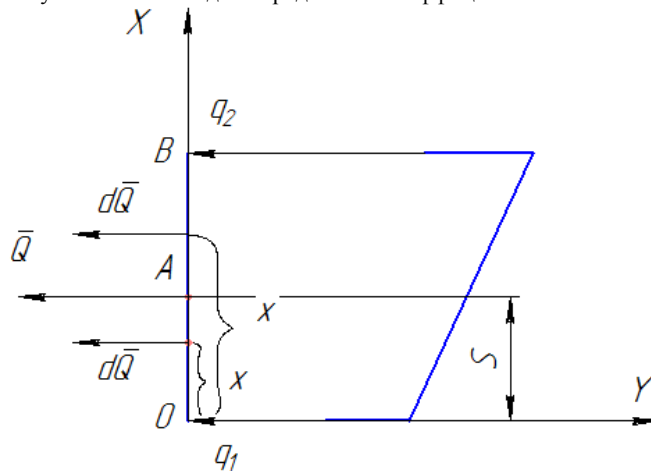


Рисунок 3 – Схемы для определения реакции почвы  $q_1$  и  $q_2$  на ротационный игольчатый рабочий орган,  $Q$  – результирующая сила, Н;  $S$  – координата точки приложения результирующей силы  $Q$ , м;  $dQ$  – элементарная сила действующая на участке  $dx$ .

$$dQ = q(x)dx \tag{2}$$

где  $dQ$  – элементарная сила действующая на участке  $dx$ ;

На участке  $0 \leq x \leq d$  интегрированием получим:

$$dQ \cdot (S - x) = q(x) \cdot (S - x)dx, \int_0^S q(x) \cdot (S - x)dx, \\ \int_S^a q(x) \cdot (x - S)dx,$$

### 3 Решение рассматриваемой проблемы

Для равновесия стержня  $OB$  составляем уравнение моментов относительно точки  $A$

$$\int_0^S q(x) \cdot (S - x)dx = \int_S^a q(x) \cdot (x - S)dx,$$

После преобразования получим:

$$\int_0^S \left( q_1 + \frac{q_2 + q_1}{a} \cdot x \right) (S - x)dx = \int_S^a \left( q_1 + \frac{q_2 + q_1}{a} \cdot x \right) (x - S)dx, \\ \int_0^S \left[ q_1 S + \frac{q_2 + q_1}{a} S \cdot x - q_1 x + \frac{q_2 + q_1}{a} x^2 \right] dx = \\ = \int_S^a \left[ q_1 x - q_1 S + \frac{q_2 + q_1}{a} \cdot x^2 - \frac{q_2 + q_1}{a} \cdot Sx \right] dx, \\ \left( q_1 Sx + \frac{q_2 + q_1}{a} S \frac{x^2}{2} - q_1 \frac{x^2}{2} - \frac{q_2 + q_1}{a} \frac{x^3}{3} \right) \Big|_0^S = \\ = \left( q_1 \frac{x^2}{2} - q_1 Sx + \frac{q_2 + q_1}{a} \cdot \frac{x^3}{3} - \frac{q_2 + q_1}{a} S \cdot \frac{x^2}{2} \right) \Big|_S^a, \\ q_1 S^2 + \frac{q_2 - q_1}{a} \cdot \frac{S^3}{2} - \frac{q_1}{2} S^2 - \frac{q_2 - q_1}{a} \cdot \frac{S^3}{3} = \\ = \frac{q_1 a^2}{2} - q_1 Sa + \frac{q_2 - q_1}{a} \cdot \frac{a^3}{3} - \frac{q_2 - q_1}{a} S \cdot \frac{a^2}{2} - \\ \left( \frac{q_1 S^2}{2} - q_1 S^2 + \frac{q_2 - q_1}{a} \cdot \frac{S^3}{3} - \frac{q_2 - q_1}{a} \cdot \frac{S^3}{2} \right), \\ \frac{q_1 a^2}{2} - q_1 Sa + \frac{q_2 - q_1}{3} a^2 - \frac{q_2 - q_1}{2} Sa = 0, \\ \frac{q_1 a^2}{2} + \frac{q_2 - q_1}{3} a^2 = S \left( q_1 a + \frac{q_2 - q_1}{2} a \right), \\ S = \frac{q_1 + 2q_2}{3(q_1 + q_2)} a \tag{3}$$

Определение реакции почвы  $q_1$  и  $q_2$ , действующих на участке  $OB$  (рисунок 3), достаточно сложно и требует дополнительных экспериментальных исследований, поэтому при выводе теоретических зависимостей допустим, что их среднее значение подчиняется распределению усилий по закону треугольника. Следовательно, усилие на участке  $OB$  будет определяться по формуле [8]:

$$Q = \frac{q_{max} \cdot a}{2} \tag{4}$$

где  $Q$  – сила действующая на участке  $OB$ , Н;  $q_{max}$  – интенсивность распределенной нагрузки, Н/м;  $a$  – длина участка на котором действует распределенная нагрузка, м.

При определении силы сопротивления рабочего органа бороны игольчатой приняли рабочую гипотезу, что вес вытесненной почвы – есть сила сопротивления почвы действующей на элемент рабочего органа и с учетом физико-механических свойств почвы это будет искомая величина.

Сила в свою очередь это произведение массы (вытесненной почвы) на ускорение свободного падения.

Рассмотрим участок, где игла при движении встречает сопротивление вытесненной почвы, то есть преодолевает силу сопротивления.

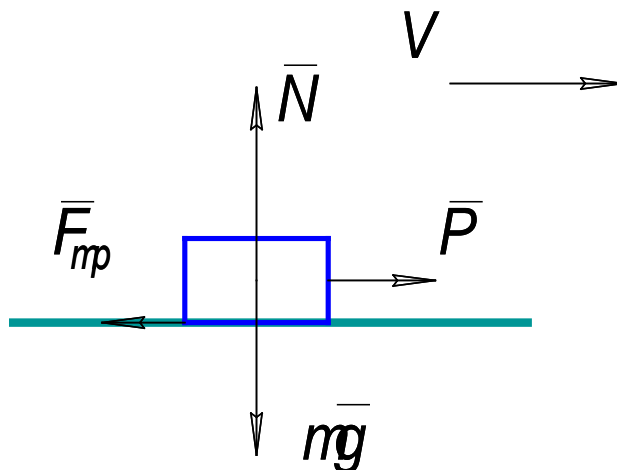


Рисунок 4 – Силы, действующие на вытесняемую почву

Тогда эту силу определим так:

$$P = \rho V f g, \tag{5}$$

где  $\rho$  – плотность почвы, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – объем вытесненной почвы, м<sup>3</sup>;  $f$  – коэффициент трения почвы о металл;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Из анализа формулы (5) для определения силы, необходимо определить объем вытесненной почвы.

Для вычисления объема тела используется в математике формула [2]:

$$V = \iiint_D dV = \int_a^b dx \int_{f_3(x)}^{f_4(x)} dy \int_{f_1(x,y)}^{f_2(x,y)} dz \tag{6}$$

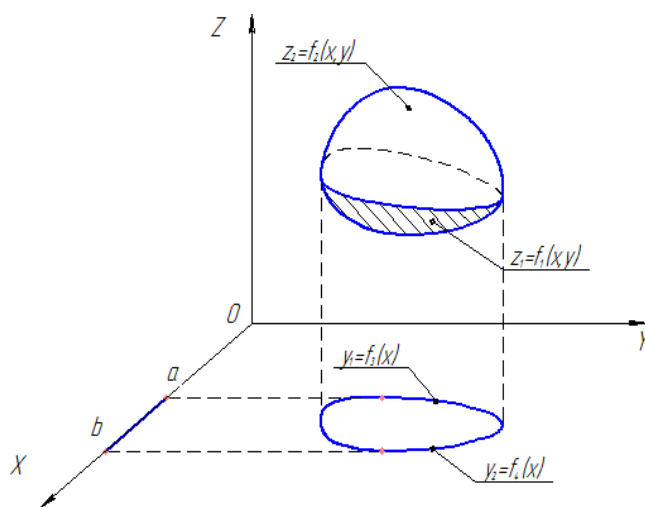


Рисунок 5 – Схема для определения объема лунки

Лунка, которая образуется в результате деформации почвы иглой ротационного рабочего органа, имеет форму, представленную на рисунке 6.

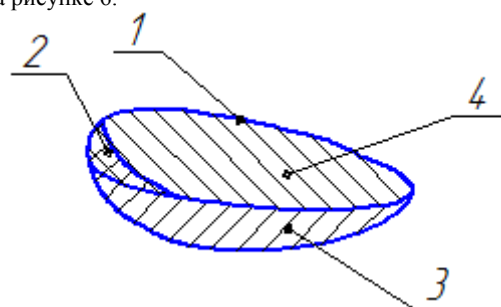


Рисунок 6 – Схема лунки:

1 – плоская поверхность; 2 – часть цилиндрической поверхности; 3 и 4 – боковые симметричные относительно друг другу поверхности, имеющие сложную выпуклую форму

Форма поверхностей 3 и 4 достаточно сложная, формируется в зависимости от физико-механических свойств почв, но они будут наиболее близкими к плоскости, поэтому для упрощения вычисления объема перейдем к средним величинам этих поверхностей (рисунок 7).

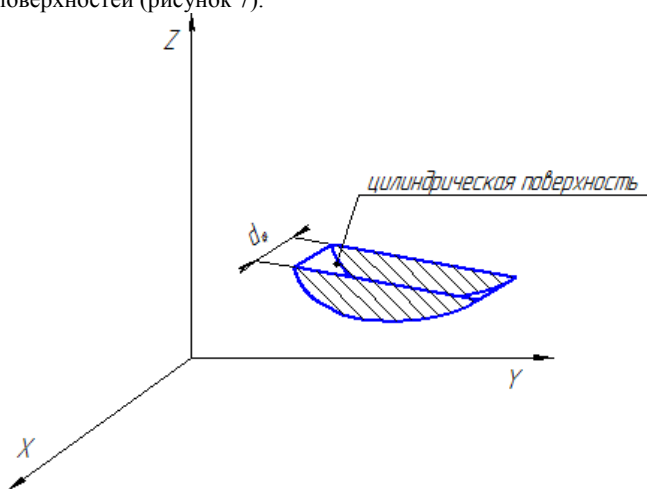


Рисунок 7 – Усредненная схема лунки

Переходим к цилиндрической системе координат и определяем объем сектора (рисунок 8).

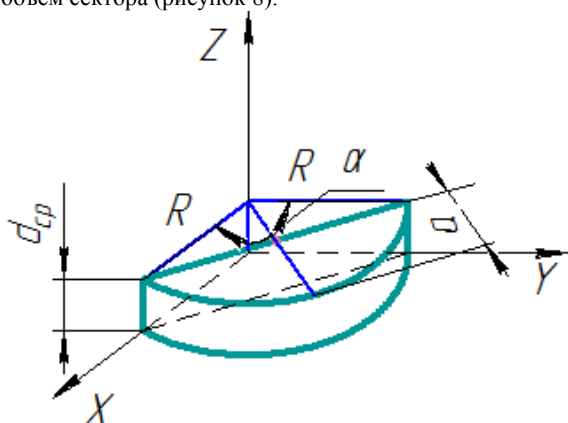


Рисунок 8 – Сектор:

$R$ -длина иглы, м;  $\alpha$ -угол поворота иглы, рад;  $d_{ср}$ - среднее значение ширины лунки, м;  $a$  – глубина обработки, м.

$$V_{сек} = \iiint_D dV = \iiint_D r dr \cdot d\varphi \cdot dz \quad (7)$$

$$V_{сек} = \int_0^R r dr \int_0^\alpha d\varphi \int_0^{d_{ср}} dz,$$

$$V_{сек} = \int_0^R r dr \int_0^\alpha d\varphi z \Big|_0^{d_{ср}},$$

$$V_{сек} = \left( \frac{R^2}{2} - 0 \right) \cdot (\alpha - 0) \cdot (d_{ср} - 0),$$

$$V_{сек} = \frac{\alpha \cdot R^2}{2} \cdot d_{ср}, \quad (8)$$

Для определения количества вытесненной почвы иглой ротационного рабочего органа, необходимо из объема сектора исключить призму.

$$V_D = V_{сек} - V_{призмы}$$

Объем призмы находим по формуле

$$V_{призмы} = S_{осн} \cdot H,$$

$$S_{осн} = \frac{1}{2} \cdot 2R \sin \frac{\alpha}{2} \cdot R \cos \frac{\alpha}{2},$$

$$V_{призмы} = \frac{1}{2} \cdot R^2 \sin \alpha \cdot H, \quad (10)$$

Полученные выражения (8) и (10) подставим в (9)

$$V_D = \frac{\alpha \cdot R^2}{2} \cdot d_{ср} - \frac{1}{2} \cdot R^2 \sin \alpha \cdot H,$$

$$V_D = \frac{R^2 \cdot d_{ср}}{2} (\alpha - \sin \alpha), \quad (11)$$

Исследованиями Труфанова В.В. [7] установлено, что ширина лунки от воздействия рабочего органа определяется как:

$$d_{ср} = 2a \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\beta}{2} \right) + d, \quad (12)$$

где  $\beta$  – угол деформации почвы при образовании лунки;  $d$  – диаметр зуба, м;

$$V_D = \left( \frac{\alpha \cdot R^2 \cdot \left( 2a \operatorname{tg} \left( \frac{\beta}{2} \right) + b \right)}{2} (\alpha - \sin \alpha) \right) n \quad (13)$$

Полученные выражения (2.24) подставим в (2.16)

$$P = \left( \frac{\alpha \cdot R^2 \cdot \left( 2a \operatorname{tg} \left( \frac{\beta}{2} \right) + b \right)}{2} (\alpha - \sin \alpha) \right) n p f g \quad (14)$$

где  $P$  – сила сопротивления действующая на ротационную борону при обработке почвы, Н;  $n$  – количество игл одновременно находящихся в почве, шт.

#### 4 Результаты и дискуссия

Таким образом, из анализа полученной зависимости (14) следует, что на изменение силы сопротивления действующей на ротационную борону при обработке почвы наибольшее влияние оказывает глубина обработки.

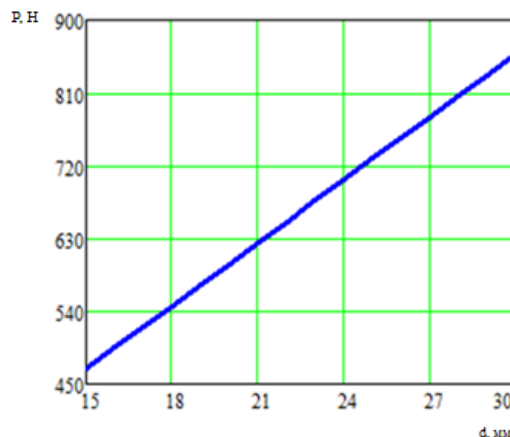


Рисунок 9 – Изменение тягового сопротивления в зависимости от диаметра иглы d

Из анализа рисунка 9 следует, что с увеличением диаметра иглы  $d$  тяговое сопротивление орудия  $P$  возрастает. Принимаем диапазон изменения диаметра  $d=15-30$  мм.

Из анализа рисунка 10 следует, что с увеличением радиуса диска  $R$  тяговое сопротивление орудия  $P$  возрастает. Принимаем диапазон изменения радиуса  $R=150-300$  мм.

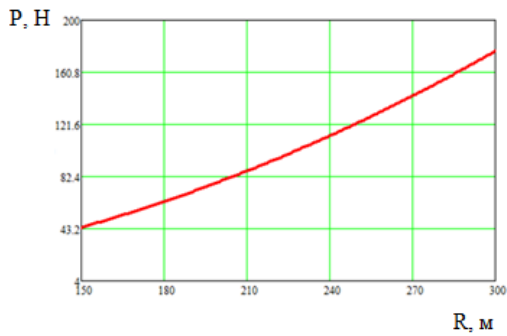


Рисунок 10 – Изменение тягового сопротивления в зависимости от радиуса диска  $R$

Так же можно наблюдать, что представление о влиянии на тяговое сопротивление радиуса диска  $R$  и диаметра иглы  $d$  не нарушает классического представления, полученного другими учеными, но для более детального сравнения необходимо получить экспериментальные результаты.

### 5 Список литературы

1 Аушев, М.Х. Математическое моделирование процесса работы комбинированного почвообрабатывающего агрегата. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 99. С. 266-295

2 Бронштейн И.Н., Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, 1981. – 720 с.

3 Конищев А.А. Обоснование параметров рабочих органов игольчатой бороны для обработки почвы на стерневых фонах : диссертация ... кандидата тех. н-к : 05.20.01 Шортанды, 1983 219 с. : 61 85-5/51

4 Медовник, А.Н. Устройство для обработки почвы. патент на полезную модель RUS 125013 07.03.2012.

5 Медовник, А.Н. Устройство для обработки почвы. патент на изобретение RUS 2537905 26.08.2013.

6 Пономарев, А.В. Кинематика игольчатого диска. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 97. С. 533-542.

7 Труфанов, В.В. Глубокое чизелевание почвы. – М.: Агропромиздат, 1989. – 137 с.г

8 Яблонский, А.А. Курс теоретической механики. – М.: Высшая школа, 1966. – 439 с.