

# РАВНОВЕСИЕ РОМБОВИДНОГО ПЛУГА В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

## THE BALANCE OF THE DIAMOND-SHAPED PLOW IN THE HORIZONTAL PLANE

**П.В. ЧУПИН**, к.т.н.  
**А.С. СОЮНОВ**, к.т.н.  
**А.Ю. ГОЛОВИН**  
**О.М. КИРАСИРОВ**, к.т.н.  
**Е.В. ДЕМЧУК**, к.т.н.

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Омский государственный аграрный университет  
им. П.А. Столыпина», Омск, Россия, pv.chupin@omgau.org

**P.V. CHUPIN**, PhD in Engineering  
**A.S. SOYUNOV**, PhD in Engineering  
**A.YU. GOLOVIN**  
**O.M. KIRASIROV**, PhD in Engineering  
**E.V. DEMCHUK**, PhD in Engineering

Omsk State Agrarian University, Omsk, Russia,  
pv.chupin@omgau.org

Ромбовидный плуг, открывая борозду с наклонной стенкой, уменьшает площадь боковой опоры, что рождает проблему сохранения устойчивого хода плуга. В то же время более широкая борозда ромбовидного корпуса позволяет энергонасыщенному трактору двигаться правыми колесами по ней и благодаря этому, сместить линию тяги плуга вправо, что в свою очередь разгружает боковую опору и уменьшает тяговое сопротивление плуга. Замена полевых досок на всех корпусах общей полевой доской, установленной на последнем корпусе, изменяет место приложения уравновешивающей реакции стенки борозды и ее величину, вследствие чего изменяется и тяговое сопротивление плуга. В вертикальной плоскости проекций это соответствует смещению силы трения полевой доски по линии действия. У ромбовидного корпуса, вследствие иной формы отрезаемого пласта, точка приложения равнодействующей давления почвы на него смещается в горизонтальной плоскости ближе к носку лемеха по сравнению с обычным корпусом. Исследуемый ромбовидный плуг навешивается на трактор по двухточечной схеме с прохождением горизонтальной проекции центральной тяги через точку присоединения нижних тяг к трактору. Эта точка является мгновенным центром вращения плуга в горизонтальной плоскости. При рассмотрении схемы плуга с полевыми досками, одинаковыми на всех корпусах (производственная), будем условно представлять ее с одной полевой доской на среднем корпусе, что облегчает теоретический анализ. Неотрывное изменение во времени сил, действующих на рабочие и дополнительные органы – специфическая особенность условий работы сельскохозяйственных агрегатов. На данном основании эти усилия рассматривают как стационарные случайные функции времени, а для изучения динамических объектов, находящихся под их воздействием, используют статистический метод, базирующийся на представлениях теории стационарных случайных процессов.

**Ключевые слова:** плуг, ромбовидный, сопротивление, тяга, колебания, опора, борозда, доска.

Diamond-shaped plow, opening the furrow with an inclined wall, reduces the area of the side support, which gives rise to the problem of maintaining a stable course of the plow. At the same time, the wider groove of the diamond-shaped case allows the energy-saturated tractor to move the right wheels on it and thereby shift the line of the plow thrust to the right, which in turn unloads the side support and reduces the traction resistance of the plow. Replacing field boards on all cases with a common field board installed on the last case changes the location of the balancing reaction of the furrow wall and its size and, as a result the plow's traction resistance also changes. In the vertical plane of the projections, this corresponds to the displacement of the friction force of the field board along the line of action. In a diamond case, due to a different shape of the cut layer, the point of application of the resultant soil pressure on it is shifted in a horizontal plane closer to the toe of the plowshare compared to a conventional case. The studied diamond-shaped plow is hung on the tractor in a two-point scheme with the passage of the horizontal projection of the central rod through the point of attachment of the lower rods to the tractor. This point is the instantaneous center of rotation of the plow in the horizontal plane. When considering the plow scheme with field boards, identical on all cases (production), we will conditionally present it with one field board on the middle case, which facilitates the theoretical analysis. The continuous change in time of the forces acting on the working and additional bodies is a specific feature of the working conditions of agricultural units. On this basis, these efforts are considered as stationary random functions of time, and for studying dynamic objects under their influence, they use a statistical method based on the concepts of the theory of stationary random processes.

**Keywords:** plow, diamond, resistance, rod, oscillations, support, furrow, board.

### Введение

При отвальной вспашке к показателям качества предъявляются более жесткие агротребования, чем к другим видам обработки почвы. Несоблюдение установленной глубины вспашки в сторону увеличения может привести к выносу неплодородного слоя почвы на поверхность поля, что приведет к уменьшению урожайности. При колебаниях плуга в горизонтальной плоскости происходит изменение ширины его захвата. По агротребованиям фактическая ширина захвата не должна отклоняться от конструктивной более, чем на 10 %. Изменение ширины захвата в сторону увеличения приводит к снижению крошению почвы, увеличению гребнистости поля, ухудшению заделки растительных остатков. Уменьшение фактической ширины захвата приводит к уменьшению производительности пахотного агрегата. Поэтому важно добиваться устойчивого движения плуга в горизонтальной плоскости.

### Цель исследований

Целью исследований является анализ факторов, влияющих на равновесие ромбовидного плуга в горизонтальной плоскости.

### Методы и средства проведения исследований

Для описания движения ромбовидного плуга как динамической системы составим упрощенную схему сил и перемещений (рис. 1). При этом примем, что линия тяги проходит через носок среднего корпуса и совпадает со следом центра масс плуга. В этой же точке (O) приложены возмущающая сила тягового сопротивления (R) и сила сопротивления протаскиванию плуга в борозде (F<sub>п</sub>) [1].

Наиболее полно динамика системы с идеальными голономными связями (то есть не нарушающимися при движении) описывается уравнениями Лагранжа второго рода [2, 3, 4]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия системы; q<sub>i</sub> – обобщенная координата; Q<sub>i</sub> – обобщенная сила.

За обобщенную координату примем угол поворота (перекоса) (φ) плуга в горизонтальной плоскости относительно точки прицепа (C).

Определим величины, входящие в уравнение (1).

Кинетическая энергия системы

$$T = \frac{mV_c^2}{2} + \frac{J_o \dot{\phi}^2}{2} = \frac{m}{2} (V_c^2 + (k+r)^2 \dot{\phi}^2) + \frac{J_o \dot{\phi}^2}{2}, \quad (2)$$

где m – масса плуга; V<sub>c</sub> – скорость точки C; J – момент инерции плуга относительно вертикальной оси, проходящей через точку C; J<sub>o</sub> – центральный момент инерции плуга; k – длина навески трактора; r – геометрический параметр плуга (рис. 1).

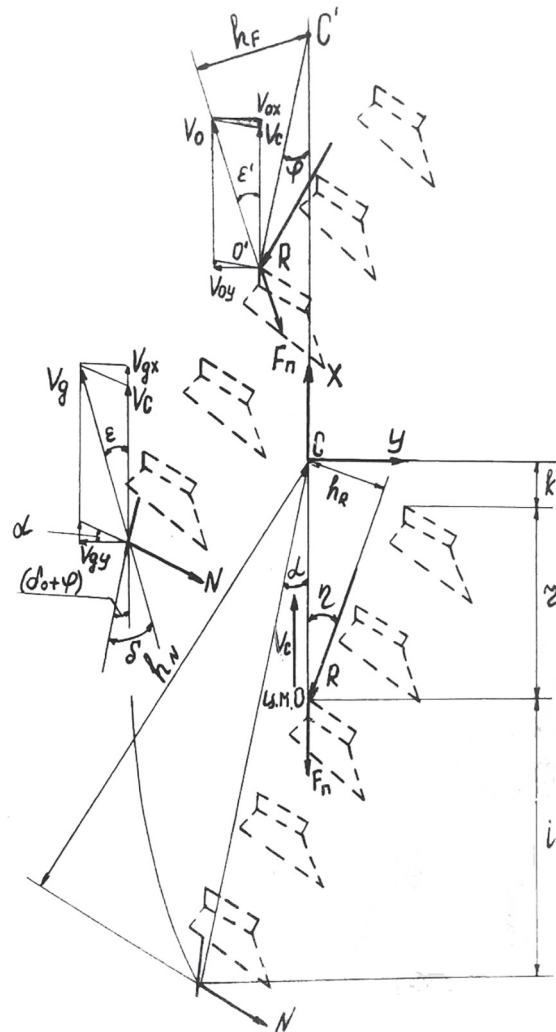


Рис. 1. Силы, действующие на ромбовидный плуг в горизонтальной плоскости

После преобразований получим

$$\left( m(k+r)^2 + J_o \right) \frac{d^2 \phi}{dt^2} = Q. \quad (3)$$

Более характерным для работы плуга является его поворот по часовой стрелке. Это направление примем за положительное значение угла (φ) и составим уравнение элементарной работы:

$$\delta A = \delta \phi \cdot \sum M_C. \quad (4)$$

Откуда

$$Q = \sum M_C = R \cdot h_R + F_{\Pi} \cdot h_F + N \cdot h_N, \quad (5)$$

где  $h_R, h_F, h_N$  – плечи соответствующих сил (рис. 1). Плечи сил ( $h_R$ ) и ( $h_N$ ) при малых перемещениях почти не изменяются и могут быть определены через геометрические параметры плуга (рис. 1)

$$h_R = (k+r) \sin \eta;$$

$$h_N = (k+r+i) \cdot \frac{\cos(\delta_0 + \varphi_T - \alpha)}{\cos \alpha}.$$

Определим  $h_F$

$$h_F = (k+r) \cdot \sin(\varepsilon' + \varphi),$$

где  $\varepsilon'$  – угол между направлением абсолютной скорости центра масс и  $\vec{V}_C$ .

Ввиду малости углов  $\varepsilon'$  и  $\varphi$  для дальнейших расчетов примем

$$\sin \varepsilon'; \varepsilon'; \operatorname{tg} \varepsilon', \quad \sin \varphi; \varphi; \operatorname{tg} \varphi.$$

Отсюда

$$\varepsilon' = \frac{V_{oY}}{V_{oX}} \cdot \frac{V_{oY}}{V_C}; \frac{(k+r)}{V_C} \cdot \frac{d\varphi}{dt};$$

$$h_F = (k+r) \cdot (\varepsilon' + \varphi) =$$

$$= \frac{(k+r)^2}{V_C} \cdot \frac{d\varphi}{dt} + (k+r) \cdot \varphi. \quad (6)$$

При повороте плуга на угол  $\varphi$  изменяется величина реакции стенки борозды  $N$  за счет изменения угла  $\delta$  между направлением движения и плоскостью полевой доски.

$$N = \frac{q \cdot d \cdot \lg \cdot h}{2 \cos(\delta + \varphi_T)} = \frac{q \cdot d \cdot \lg^2 \cdot \sin \delta}{2 \cos(\delta + \varphi_T)},$$

$$\delta = \delta_0 + \varphi + \varepsilon, \quad (7)$$

где  $\delta_0$  – конструктивный угол установки полевой доски;  $\varepsilon$  – угол между направлением абсолютной скорости полевой доски и  $\vec{V}_C$ .

Поскольку  $\delta$  мало и  $\varphi_T$  намного превышает  $\delta$ , выражение (7) с достаточной степенью точности принимает вид:

$$N = \frac{q \cdot d \cdot \lg^2 \cdot \delta}{2 \cos(\delta + \varphi_T)} = D \cdot \delta. \quad (8)$$

Ввиду малого угла  $\varepsilon$ , можно записать

$$\varepsilon; \operatorname{tg} \varepsilon; \frac{V_{gY}}{V_{gX}}; \frac{(k+r+i)}{V_C} \cdot \frac{d\varphi}{dt}.$$

На основании этого

$$\delta = \delta_0 + \varphi + \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{k+r+i}{V_C}.$$

Тогда выражение (8) примет вид:

$$N = D \cdot \left( \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{k+r+i}{V_C} + \varphi + \delta_0 \right). \quad (9)$$

Подставим найденные выражения (6) и (9) в формулу (5)

$$Q = \sum M_C = R \cdot h_R + F_{\Pi} \frac{(k+r)^2}{V_C} \cdot \frac{d\varphi}{dt} +$$

$$+ F_{\Pi} (k+r) \varphi + D \cdot h_N \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{k+r+i}{V_C} + D \cdot h_N \cdot \varphi +$$

$$+ D \cdot h_N \cdot \sin \delta_0 = \frac{F_{\Pi} (k+r)^2 + D \cdot h_N (k+r+i)}{V_C} \times$$

$$\times \frac{d\varphi}{dt} + (F_{\Pi} (k+r) + D \cdot h_N) \varphi + R \cdot h_R + D \cdot h_N \cdot \sin \delta_0. \quad (10)$$

Подставляя это выражение в уравнение (3) получим

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + A \frac{d\varphi}{dt} + B\varphi = M(t), \quad (11)$$

где  $J$  – коэффициент инерции плуга,

$$J = J_0 + m(k+r)^2; \quad (12)$$

$A$  – коэффициент, учитывающий сопротивление изменению положения плуга,

$$A = \frac{F_{\Pi} (k+r)^2 + D \cdot h_N (k+r+i)}{V_C}; \quad (13)$$

$B$  – коэффициент жесткости связей,

$$B = F_{\Pi} (k+r) + D \cdot h_N; \quad (14)$$

$M(t)$  – возмущающий момент,

$$M(t) = R \cdot h_R - D \cdot h_N \cdot \sin \delta_0. \quad (15)$$

Выражение (11) представляет собой уравнение вынужденных колебаний плуга с затуханием под действием составляющей силы  $R(t)$  (15).

Подставив в выражения (11)–(15) параметры производственной схемы плуга, получим уравнение его движения с учетом динамических свойств.

Для определения характера затухания колебаний плуга представим коэффициенты сопротивления, жесткости и возмущающий момент следующим образом:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2h\frac{d\varphi}{dt} + \omega_0^2\varphi = \frac{M(t)}{J}, \quad (16)$$

где  $h = \frac{A}{2J}$  – постоянная затухания;  $\omega_0 = \sqrt{\frac{B}{J}}$  –

частота собственных колебаний плуга.

Например, колебания плуга в горизонтальной плоскости зависят от отношения ( $h / \omega_0$ ), которое называется коэффициентом затухания [5, 6].

При  $h / \omega_0 < 1$  (малый коэффициент сопротивления по отношению к коэффициенту инерции) движение плуга будет иметь характер периодических затухающих колебаний с амплитудой и частотой, значения которых зависят от коэффициента инерции. При  $h / \omega_0 > 1$  (большой коэффициент сопротивления) колебательное движение плуга совершается при аperiodическом затухании и в меньшей степени зависит от коэффициента инерции, а определяется, главным образом, характером функции  $R(t)$ .

Подставляя необходимые параметры плуга в выражения (12)–(14), получим для экспериментального ромбовидного плуга с  $L = 600$  мм и одной полевой доской на последнем корпусе  $h / \omega_0 = 8...10$ , а для производственной схемы с  $L = 800$  мм и обычными корпусами, отрезающими вертикальную стенку борозды  $h / \omega_0 = 6...7$  и для производственной схемы с  $L = 800$  мм и ромбовидными корпусами, оставляющими только часть стенки борозды вертикальной ( $d = 50$  мм),  $h / \omega_0 = 3...4$ .

Видно, что коэффициенты затухания колебаний  $h / \omega_0 \gg 1$  как для экспериментальной, так и для производственной схем. То есть характер их колебаний определяется главным образом изменением  $R(t)$ .

Результаты экспериментов показывают, что эти колебания не приводят к отклонениям ширины захвата плуга больше допустимых требованиям.

Даже в тех опытах, где фактическая ширина захвата (средняя за опыт) отклоняется от расчетной больше, чем на 10 %, коэффициент вариации не превышает 6 %. То есть плуг шел сравнительно устойчиво, но колебания его при этом совершались не около расчетного среднего положения, а около нового равновесного состояния. Это происходит потому, что при развороте плуга плечи сил изменяются, пока не наступает новое равновесное состояние. Около него и происходят колебания под действием  $R(t)$ , которые не превышают допустимые агротребованиями. Чтобы исключить начальный

угол поворота плуга, нужно определить положение его линии тяги в зависимости от положения других сил, действующих на плуг.

Результаты экспериментальной проверки работы плуга при различных (рассматриваемых выше) вариантах агрегатирования подтверждают оптимальность выбранных теоретических вариантов агрегатирования.

Экспериментальная проверка возможности работы 5 корпусного ромбовидного плуга с межкорпусным расстоянием 600 мм и удлиненной полевой доской (500 мм) на последнем корпусе при смещении трактора в борозду подтвердила работоспособность этого плуга.

Для возможности агрегатирования 6 корпусного ромбовидного плуга с Т-150К по варианту его движения по борозде нужно линию тяги сместить не на 370 мм, а только на 270 мм [7, 8]. При этом реакция стенки борозды  $N$  и требуемая длина полевой доски  $lg$  будут такими же, как и для 5 корпусного в варианте движения трактора по борозде. А для слитности пашни между проходами навеску на тракторе необходимо сместить влево на 100 мм, что в свою очередь будет компенсировать разворачивающий трактор момент от силы  $R_y$ . Для осуществления этого варианта агрегатирования нужно иметь на тракторе конструкцию навески, позволяющую ее смещение левее оси симметрии на указанную или близкую к ней величину.

## Выводы

Подводя итог можно сделать следующие выводы.

Экспериментальный ромбовидный плуг с уменьшенным межкорпусным расстоянием и одной полевой доской на последнем корпусе имеет большое сопротивление изменению его положения в горизонтальной плоскости, и вследствие этого его колебания совершаются с аperiodическим затуханием.

Смещение линии тяги вправо уменьшает боковое давление плуга  $N$  и его тяговое сопротивление  $P_x$ .

Уменьшение длины плуга (межкорпусного расстояния) приводит к более интенсивному изменению тягового сопротивления от смещения линии тяги, а вынос боковой опоры на последний корпус – к менее интенсивному.

Получены теоретические зависимости тягового сопротивления  $P_x$ , бокового давления  $N$  и длины полевой доски  $lg$  от смещения линии

тяги  $m$ , которые позволяют производить выбор оптимальных параметров и вариантов агрегатирования ромбовидного плуга.

### Литература

1. Горячкин, В.П. Собрание сочинений. 2-е изд. М.: Колос, 1968. Т. 2. 455 с.
2. Карпов В.П. Исследование и обоснование параметров рациональной схемы многокорпусного плуга: дисс. ... канд. техн. наук. М., 1969. 179 с.
3. Бледных В.В. Исследование динамических свойств полунавесных плугов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01. Челябинск, 1967. 161 с.
4. Любимов А.И., Бледных В.В. Динамические свойства полунавесного плуга при движении в неоднородной среде // Почвообрабатывающие машины и динамика агрегатов: науч. тр. ЧИМЭСХ. Вып. 33, 1970. С. 118–137.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1984. 831 с.
6. Чупин П.В. Обоснование схемы плуга для ромбовидной вспашки: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01. Челябинск, 1987. 175 с.
7. Чупин П.В., Союнов А.С., Демчук Е.В. Устойчивость хода плуга для ромбовидной вспашки и определение рациональных способов его уравнивания // Сборник материалов Национальной научно-практической конференции «Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития». 2017. С. 132–138.
8. Чупин В.П., Головин А.Ю., Демчук Е.В., Союнов А.С. Расстановка корпусов плуга // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2017. № 2 (26). С. 126–131.
2. Karpov, V.P. Issledovanie i obosnovanie parametrov racional'noj skhemy mnogokorpusnogo pluga: dis. ... kand. tekhn. nauk [Research and justification of the parameters of a rational scheme of multi-body plow: Dissertation for degree of Ph.D. in Engineering]. Moscow, 1969. 179 p.
3. Blednyh, V.V. Issledovanie dinamicheskikh svojstv polunavesnyh plugov: Dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.01 [Study of the dynamic properties of semi-mounted plows: Dissertation for degree of Ph.D. in Engineering]: CHelyabinsk, 1967. 161 p.
4. Lyubimov A.I., Blednyh V.V. Dynamic properties of a semi-mounted plow when moving in a heterogeneous environment. Pochvoobrabatyvayushchie mashiny i dinamika agregatov: nauch. tr. CHIMESHKH. Vyp. 33, 1970, pp. 118–137 (in Russ.).
5. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike [Handbook of mathematics]. Moscow: Nauka Publ., 1984. 831 p.
6. CHupin P.V. Obosnovanie skhemy pluga dlya rombovidnoj vspashki: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.01 [Justification of the plow pattern for diamond plowing: Dissertation for degree of Ph.D. in Engineering]: CHelyabinsk, 1987. 175 p.
7. CHupin P.V., Soyunov A.S., Demchuk E.V. Stability of the plow for diamond plowing and the definition of rational ways to balance it. Sbornik materialov Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii «Nauchnoe i tekhnicheskoe obespechenie APK, sostoyanie i perspektivy razvitiya» [Collection of materials of the National Scientific and Practical Conference «Scientific and technical support of the agroindustrial complex, state and development prospects»]. 2017, pp. 132–138 (in Russ.).
8. CHupin P.V., Golovin A.YU., Demchuk E.V., Soyunov A.S. Plow body placement. Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017. No 2 (26), pp. 126–131 (in Russ.).

### References

1. Goryachkin, V.P. Sbranie sochinenij [Works collection]. 2-е изд. Moscow: Kolos Publ., 1968. Vol. 2. 455 p.