

Н. Д. Лепешкин

*РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: mehposev@mail.ru*

К ВОПРОСУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛОСКОГО КЛИНА С ПОЧВОЙ

Аннотация. Работа посвящена теоретическому исследованию взаимодействия клина с почвой. Предложены аналитические зависимости для определения тягового сопротивления клина методом учета отдельных факторов, в том числе и боковых зон разрушения.

Ключевые слова: обработка почвы, взаимодействие клина с почвой, тяговое сопротивление, боковые зоны расширения.

N. D. Lepeshkin

*SUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: mehposev@mail.ru*

ON THE ISSUE OF INTERACTION OF A FLAT WEDGE WITH THE SOIL

Abstract. The work is devoted to a theoretical study of the interaction of the wedge with the soil. Analytical dependencies have been proposed for determining the traction resistance of a wedge by taking into account individual factors, including lateral zones of destruction.

Keywords: tillage, interaction of the wedge with the soil, traction resistance, lateral expansion zones.

Введение

Несмотря на давность существования почвообрабатывающих машин процесс взаимодействия рабочих органов с почвой остается недостаточно изученным. Справедливо и в наше время высказывание академика В. П. Горячкина [1], что «вопрос о деформации пласта до сих пор составляет камень преткновения для всякого рода теоретических исследований и до сих пор не может считаться разрешенным».

Классической формулой для определения тягового сопротивления плуга и других машин является рациональная формула В. П. Горячкина [1]:

$$P = fQ + kab + \varepsilon abv^2, \quad (1)$$

где fQ – сопротивление на перемещение плуга, кН; kab – сопротивление на отделение пласта от массива почвы и деформацию его, кН; εabv^2 – сопротивление на отбрасывание пласта в сторону, кН.

Однако в этой формуле не учитывается ряд факторов, влияющих на тяговое сопротивление рабочих органов: коэффициенты k и ε необходимо определять экспериментальным путем. Поэтому в настоящее время многие исследователи используют метод учета отдельных факторов, влияющих на величину тягового сопротивления рабочих органов, и предлагают многочисленные формулы. Это упрощает нахождение зависимостей взаимодействия рабочего органа с почвой.

При взаимодействии клина с почвой впереди него образуются три зоны деформации (рисунк 1) [2]:

- 1 – зона разрушения пласта, определяемая контуром клина $ABCD$;
- 2 – зона разрушения почвы за пределами контура клина;
- 3 – зона упругих пластических деформаций, которые не достигают предела разрушения.

После прохода клина почва в этой зоне остается монолитной (неразрушенной).



Рисунок 1 – Схема зон деформации почвы клином:
 а – в поперечно-вертикальной плоскости; б – в горизонтальной плоскости

Очевидно, чем больше энергии пойдет на разрушение почвы в зонах 1 и 2 (рисунок 1), тем будет выше КПД рабочего органа и ниже энергоемкость обработки почвы. КПД рабочего органа можно определить из уравнения:

$$\eta = (E_1 + E_2) / E, \quad (2)$$

где E_1 – энергия, затрачиваемая на разрушение пласта сечением ab , a – глубина хода клина, b – ширина захвата клина; E_2 – энергия, затрачиваемая на разрушение почвы за пределами сечения пласта ab ; E – полная энергия, затраченная на перемещение клина.

$$E = E_1 + E_2 + E_3, \quad (3)$$

где E_3 – энергия на совершение упругих и пластических деформаций за пределами зон разрушения.

Энергия E_2 при сплошной обработке почвы идет на совершение полезной работы, так как облегчает работу клина при последующем проходе. Энергия E_3 расходуется бесполезно на уплотнение почвы, а часть ее переходит в тепло.

Как абсолютные, так и относительные значения зон деформации будут меняться при различных схемах взаимодействия рабочего органа с почвой, при изменении геометрических параметров рабочего органа и физико-механических свойств почвы.

Зона 3 деформации без разрушения может распространяться на значительную величину. Так, при работе плугов деформации распространяются в сторону от полевого обреза плуга до 1,5 м на суглинистой старопахотной почве и до 3 м – на целинной торфяно-болотной почве низинного типа [2]. Эти данные показывают, что при взаимодействии рабочих органов на почву происходит деформация без разрушения значительных объемов последней, часто в несколько раз превосходящая размеры пласта, определяемого контуром рабочего органа.

Цель статьи – теоретически исследовать процесс взаимодействия клинообразных рабочих органов с почвой и предложить аналитические зависимости для определения тягового сопротивления клина методом учета отдельных факторов, в том числе и боковых зон разрушения.

Основная часть

Исходя из деформации почвы тяговое сопротивление клина будет равно:

$$P = P_1 + P_2 + P_3, \quad (4)$$

где P_1 – сопротивление почвы разрушению по контуру клина (рисунок 1, зона 1), кН; P_2 – сопротивление почвы разрушению за пределами контура клина (рисунок 1, зона 2), кН; P_3 – сопротивление почвы деформации за пределами зон разрушения (рисунок 1, зона 3), кН.

Силу P_3 теоретически определить пока не представляется возможным, она может быть учтена поправочным коэффициентом. Чем меньше ширина захвата, тем большее относительное значение будет иметь эта составляющая.

Если не учитывать отдельно силу P_3 , а силы P_1 и P_2 заменить конкретными усилиями, учитывающими влияние отдельных факторов на величину тягового сопротивления, в том числе и боковых зон расширения почвы, то тяговое сопротивление клина можно определить по формуле:

$$P = P_{\text{л}} + P_{\text{с}} + P_{\text{п}} + P_{\text{г}}, \quad (5)$$

Рисунок 2 – Действие лезвия клина
на почву

Усилие, затрачиваемое на внедрение лезвия клина в почву $P_{\text{л}}$, зависит также от скорости движения клина, с увеличением которой возрастает динамическая нагрузка на лезвие. Однако, учитывая малый объем почвы, воздействующий на лезвие, влиянием скорости на усилие внедрения лезвия можно пренебречь.

Усилие для внедрения лезвия клина в почву P_{Π} можно представить выражением:

где k_s – удельное сопротивление почвы, приходящееся на единицу лобового сечения лезвия, Н/м²; $t_{л}$ – толщина лезвия, м; b – ширина клина, м; γ – угол расположения лезвия к направлению движения, град; ϕ – угол между равнодействующей $P_{л}$ и силой нормального давления $N_{л}$, град.

$$P_{\Pi(X)} = \frac{k_{st\pi} b \sin(\gamma + \varphi'')}{\sin \gamma \cos \varphi''}. \quad (7)$$

Второй член уравнения (5), т. е. усилие на преодоление сопротивления почвы сдвигу P_c , определим из условия, что при воздействии клина на почву происходит ее сдвиг в ортогональном сечении (рисунок 2).

В производственных условиях клиновидные рабочие органы при сплошной обработке почвы, как правило, работают в сплошной или полусплошной среде, т. е., с одной стороны, имеется почва, разрушенная при предыдущем проходе.

Боковая плоскость разрушения по данным ряда исследований [3–5] наклонена к подошве борозды под углом ψ_b около 45° .

Обозначим углы в ортогональном сечении к лемеху с индексом «штрих», площадь сдвига для сплошной среды – С, полусплошной – П.

Так как часть рабочих органов представляет собой два составленных косых клина, то для одного косого клина будем учитывать только одну боковую зону расширения.

$$S_C = \frac{a}{\sin \psi' \sin \gamma} \left(b + \frac{\text{actg} \psi_6}{2} \right), \quad (9)$$

где a – глубина рыхления, м; b – ширина клина, м.

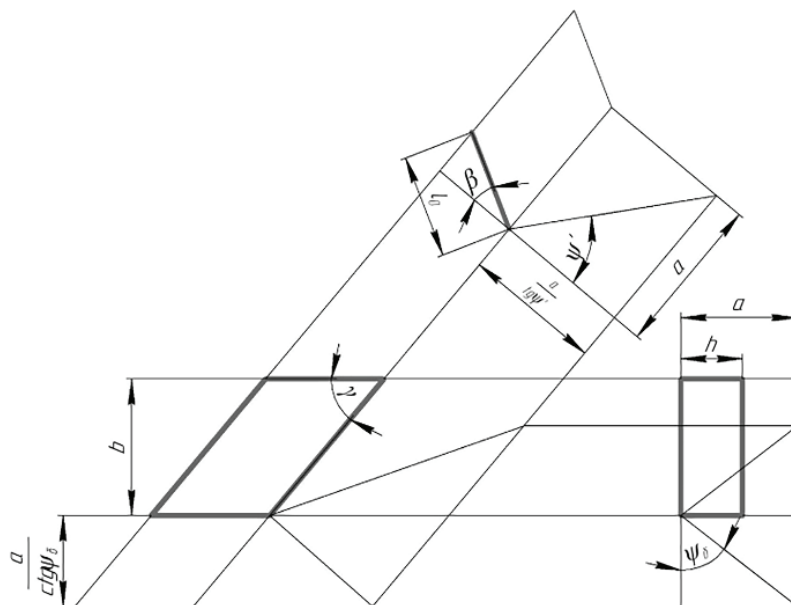


Рисунок 3 – Схема сдвига пласта косым клином

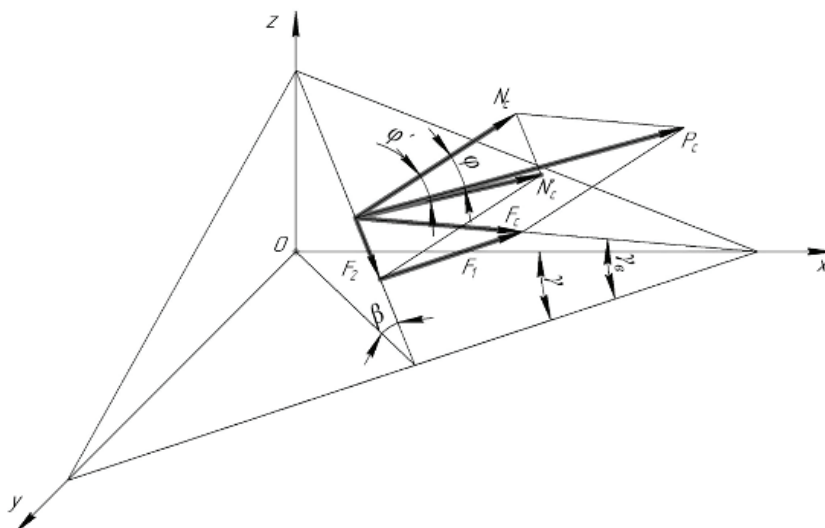


Рисунок 4 – Схема действия силы со стороны клина на почву при сдвиге

Объем почвы на клине составит:

$$V = \frac{al_0}{\sin \gamma} \left(b + \frac{\text{actg} \psi_{\delta}}{2} \right) + \frac{a^2}{\text{tg} \psi' \sin \gamma} + \left(\frac{b}{2} + \frac{\text{actg} \psi_{\delta}}{3} \right). \quad (11)$$

При взаимодействии косопоставленного клина с почвой более целесообразно действие нормальных и касательных сил учитывать отдельно [6] (рисунок 4).

Для анализа клин расположен так, чтобы направление его движения совпадало с осью OX , ширина пласта – с осью OY и высота – с осью OZ . В этом случае процесс деформации происходит как при действии на почву прямого клина: плоскость сдвига параллельна лезвию и с подошвой составляет угол ψ' . При определении усилия на преодоление сопротивления почвы сдвигу P_C , значение углов необходимо принимать в ортогональном сечении к лезвию клина [2], а именно:

$$\varphi' = \arctg(\text{tg} \varphi \sin \gamma_B), \quad (12)$$

$$\rho' = \arctg(\text{tg} \rho \sin \gamma_B), \quad (13)$$

$$\psi' = 90 - \frac{\beta + \varphi' + \rho'}{2}, \quad (14)$$

где φ' – угол трения почвы по металлу в ортогональном сечении к лезвию клина, град; ρ' – угол трения почвы по почве в ортогональном сечении к лезвию клина, град; ψ' – угол сдвига почвы в ортогональном сечении к лезвию клина, град; β – угол крошения, град.

Угол вступления пласта на рабочую поверхность клина:

$$\gamma_b = \arctg(\tg\gamma \cos\beta). \quad (15)$$

Нормальное давление на лицевую поверхность клина и силу трения определяем по формулам, предложенным академиком В. П. Горячкиным [1]:

$$N_C = \frac{K_4 S \cos \rho' \cos \varphi'}{\sin(\beta + \varphi' + \rho' + \psi')}. \quad (16)$$

$$F_C = N_C \tg \varphi. \quad (17)$$

Максимальное усилие на преодоление сопротивления почвы сдвигу:

$$P_C = \frac{N_C}{\cos \varphi} = \frac{K_4 S \cos \rho' \cos \varphi'}{\cos \varphi \sin(\beta + \varphi' + \rho' + \psi')}. \quad (18)$$

Средняя величина усилия на преодоление сопротивления почвы сдвигу в два раза меньше, так как процесс сдвига почвы циклический и усилие колеблется от нуля до максимума (в реальных условиях оно не достигает ни нуля, ни максимума).

В уравнении (18) площадь S в зависимости от условий работы определяется по формулам (9) или (10). Для прямого клина уравнение (18) упрощается, так как $\gamma = 90^\circ$, а углы входят без индекса «штрих».

Далее определим усилие на подъем пласта по наклонной плоскости клина P_{Π} .

При подъеме пласта по передней грани косого клина он опирается также на плоскость сдвига. Чтобы найти нормальную реакцию передней плоскости клина, составим уравнение равновесия пласта в ортогональном сечении к лезвию (рисунок 5).

Вес пласта почвы G при отсутствии движения уравновешивается силами нормального давления лицевой поверхности клина N_{Π} и плоскостью сдвига Q_{Π} . При движении по плоскости клина развивается сила внешнего трения (угол трения почвы по металлу обозначен φ), на плоскости сдвига – сила внутреннего трения (угол трения почвы по почве – ρ).

Суммарная сила нормального давления и трения в ортогональном сечении к лезвию отклонена от нормалей к передней грани клина и плоскости сдвига на углы φ' и ρ' . Вес пласта в данном случае уравновешивается равнодействующими от нормальных давлений и сил трения: передней грани клина – N'_{Π} и плоскости сдвига – Q'_{Π} .

По теореме синусов можно записать:

$$\frac{N'_{\Pi}}{\sin(\rho' + \psi')} = \frac{G}{\sin(\beta + \varphi' + \rho' + \psi')}. \quad (19)$$

Откуда:

$$N'_{\Pi} = \frac{G \sin(\rho' + \psi')}{\sin(\beta + \varphi' + \rho' + \psi')}. \quad (20)$$

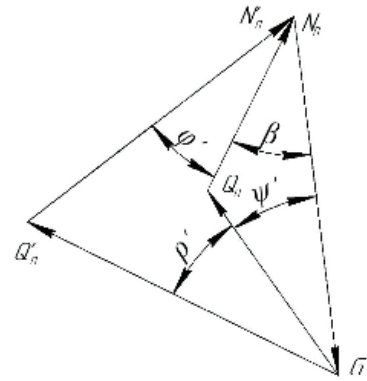


Рисунок 5 – Схема действия сил при подъеме пласта

Используя выражение (20), получим:

$$N_{\Pi} = \frac{G \sin(\rho' + \psi') \cos \varphi'}{\sin(\beta + \varphi' + \rho' + \psi')}. \quad (21)$$

$$F_{\Pi} = N'_{\Pi} \operatorname{tg} \varphi. \quad (22)$$

Вес почвы на клине:

$$G = V\delta, \quad (22)$$

где V – объем почвы на клине, м^3 ; δ – объемный вес почвы.

Усилие для подъема пласта:

$$P_{\Pi} = \frac{N_{\Pi}}{\cos \varphi} = \frac{V\delta \sin(\rho' + \psi') \cos \varphi'}{\sin(\beta + \varphi' + \rho' + \psi') \cos \varphi}, \quad (24)$$

Для прямого клина уравнение (24) значительно упрощается, так как угол $\gamma = 90^\circ$, а углы принимаются без индекса «штрих».

Определим усилие на преодоление динамического напора пласта P_g .

Нормальное давление передней грани на почву зависит не только от веса и деформации пласта, но также и от скорости перемещения клина. Выразим нормальное давление от сил инерции пласта N_g для случая деформации почвы клином перпендикулярно его передней грани с последующим сдвигом, используя выражение, полученное Г. Н. Синеоковым [6]:

$$N_g = \frac{\delta \left(ab + \frac{a^2 \operatorname{ctg} \psi_6}{2} \right) U^2 \sin 2\beta}{2g}. \quad (25)$$

где U – скорость движения, м/с^2 .

Сила трения:

$$F_g = N_g \operatorname{tg} \psi. \quad (26)$$

Усилие на преодоление динамического напора пласта:

$$P_g = \frac{N_g}{\cos \varphi} = \frac{\delta \left(ab + \frac{a^2 \operatorname{ctg} \psi_6}{2} \right) U^2 \sin 2\beta}{2g \cos \varphi}. \quad (27)$$

Определим суммарное продольное, боковое и вертикальное тяговое сопротивление прямого и косого клина.

Направление движения клина осуществляется по оси X , ширина и высота его совпадает соответственно с осью Y и Z . Как указывает Г. Н. Синеоков [6] целесообразно учитывать нормальные и касательные (трение) силы раздельно. Полное продольное, боковое и вертикальное тяговое сопротивление клина выразится проекцией всех сил ($P_{\Pi} + P_C + P_{\Pi} + P_g$) на оси X, Y, Z .

Применяя зависимости, полученные Г. Н. Синеоковым и, учитывая, что угол вступления пласта на клин γ_b не равен углу постановки лезвия к направлению движения клина γ , находим проекции тягового сопротивления клина с учетом боковой зоны расширения почвы:

– на ось X :

$$P_{(X)} = P_{\Pi(X)} + P_{C(X)} + P_{\Pi(X)} + P_{g(X)} = \frac{k_s t_{\Pi} b \sin(\gamma + \varphi'')}{\sin \gamma \cos \varphi''} + \left[\frac{0,5 K_4 S \cos \rho' \cos \varphi' + V \delta \sin(\rho' + \psi') \cos \varphi'}{\sin(\beta + \varphi' + \rho' + \psi')} + \frac{\delta \left(ab + \frac{a^2 \operatorname{ctg} \psi_6}{2} \right) U^2 \sin 2\beta}{2g \cos \varphi} \right] \times [\sin \beta \sin \gamma - \operatorname{tg} \varphi (\cos \beta \sin \gamma \sin \gamma_b + \cos \gamma \cos \gamma_b)]. \quad (28)$$

– на ось Y:

$$P_{(Y)} = P_{Л(Y)} + P_{С(Y)} + P_{П(Y)} + P_{g(Y)} = \frac{k_{st} b \sin(\gamma + \varphi'')}{\sin \gamma \cos \varphi''} +$$

$$+ \left[\frac{0,5 K_4 S \cos \rho' \cos \varphi' + V \delta \sin(\rho' + \psi') \cos \varphi'}{\sin(\beta + \varphi' + \rho' + \psi')} + \frac{\delta \left(ab + \frac{a^2 \operatorname{ctg} \psi_6}{2} \right) U^2 \sin 2\beta}{2g} \right] \times$$

$$\times [\sin \beta \cos \gamma + \operatorname{tg} \varphi (\cos \beta \cos \gamma \sin \gamma_{\text{в}} + \sin \gamma \cos \gamma_{\text{в}})]. \quad (29)$$

– на ось Z:

$$P_{(Z)} = P_{С(Z)} + P_{П(Z)} + P_{g(Z)} =$$

$$= \left[\frac{0,5 K_4 S \cos \rho' \cos \varphi' + V \delta \sin(\rho' + \psi') \cos \varphi'}{\sin(\beta + \varphi' + \rho' + \psi')} + \frac{\delta \left(ab + \frac{a^2 \operatorname{ctg} \psi_6}{2} \right) U^2 \sin 2\beta}{2g} \right] \times$$

$$\times \operatorname{tg} \varphi \sin \beta \sin \gamma_{\text{в}}. \quad (30)$$

Величины, входящие в уравнение (28), (29), (30), применяются в зависимости от вида клина и схемы его работы.

Заключение

Теоретическое исследование процесса взаимодействия клинообразных рабочих органов с почвой позволило получить аналитические зависимости для определения величины продольного, бокового и вертикального тягового сопротивления клина методом учета отдельных факторов, в том числе и боковых зон разрушения.

Список использованных источников

1. Горячкин, В. П. Собрание сочинений : в 3 т. / В. П. Горячкин. – Т. 2. – М. : Колос, 1968. – 455 с.
2. Механизация защиты почв от водной эрозии в Нечерноземной полосе ; под ред. А. Т. Вагина. – Л. : Колос, 1977. – 272 с.
3. Зеленин, А. Н. Основы разрушения грунтов механическими способами / А. Н. Зеленин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1968. – 376 с.
4. Кострицын, А. К. О сопротивлении почвы рабочим органам почвообрабатывающих машин / А. К. Кострицын. – Труды ВИМ. – М. – 1965. – Т. 35.
5. Лепешкин, Н. Д. Исследование влияния ширины долота на критическую глубину рыхления чизельными рабочими органами / Н. Д. Лепешкин, В. В. Мижурин // Механизация и электрификация сельского хозяйства : темат. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск : Беларус. навука, 2024. – Вып. 57. – С. 132–135.
6. Синеоков, Г. Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г. Н. Синеоков, И. М. Панов. – М. : Машиностроение, 1977. – 328 с.