

Расчетная схема технологического процесса крошения почвы почвообрабатывающими рабочими органами

Calculation model of technological process of soil crumbling by means of tillage working organs

В. В. БЛЕДНЫХ¹, д-р техн. наук
П. Г. СВЕЧНИКОВ¹, д-р техн. наук
И. П. ТРОЯНОВСКАЯ^{1, 2}, д-р техн. наук

¹ Институт агроинженерии Южно-Уральского
государственного аграрного университета,
Челябинск, Россия, mail@csaa.ru

² Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия, tripav63@mail.ru

V. V. BLEDNYKH¹, DSc in Engineering
P. G. SVECHNIKOV¹, DSc in Engineering
I. P. TROYANOVSKAYA^{1, 2}, DSc in Engineering

¹ Agroengineering Institute of South Ural State
Agrarian University, Chelyabinsk, Russia,
mail@csaa.ru

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia,
tripav63@mail.ru

Используемые в настоящее время рабочие органы для безотвальной обработки почвы не полностью отвечают агротехническим требованиям, особенно по равномерности крошения почвенного пласта по ширине захвата плоскорежущего рабочего органа. Научная гипотеза заключается в том, что переменный угол резания по длине лемеха способствует улучшению крошения почвенного пласта. Предложена математическая модель взаимодействия клина с почвой. В результате получены теоретические зависимости силы сопротивления почвы разрушению и толщины снимаемого пласта от угла установки рабочего органа. Для экспериментального подтверждения полученных результатов использовался набор двугранных клиньев, отличающихся друг от друга углом установки рабочей грани к дну борозды. Испытания проводились в средах с широким диапазоном физико-механических свойств (чернозем обыкновенный, песок, глина). Экспериментально определено, что несмотря на различия физико-механических свойств и внешней картины

формирования пласта, все среды при взаимодействии с клином имеют некоторые общие характеристики, зависящие от параметров клина. Получена экспериментальная зависимость эквивалентных напряжений от угла резания клина. Экспериментальные и теоретические результаты имеют хорошую сходимость. На основе проведенных исследований разработаны рабочие органы с переменным углом резания. Выявлено, что лезвие с переменным углом резания создает большее напряжение в почвенном пласте, чем лезвие с постоянным углом резания. Экспериментально подтверждено, что рабочие органы с переменным углом резания на 20–50 % лучше крошат обрабатываемый пласт, чем серийные. Экономический эффект от внедрения рабочих органов с переменным углом резания составляет 200–1300 руб/га.

Ключевые слова: модель разрушения почвы; тяговое сопротивление; крошение почвы; двугранный клин; взаимодействие рабочих органов с почвой; оптимальные параметры.

Working organs being used currently for subsurface tillage do not comply with agrotechnical requirements. In particular, the crumbling of soil layer is unequal across the width of cutting plane of working organ. The scientific hypothesis is that variable cutting angle along the length of blade improves the crumbling of soil layer. The mathematical model of interaction between the soil and a wedge is proposed. As the result, the theoretical dependencies of resistance force of soil to destruction and of thickness of shear layer on the setting angle of tillage tool are obtained. A set of dihedral wedges with different angles of inclination has been used in experimental studies. The tests have been performed in media with a wide range of physical and mechanical properties (ordinary humus, sand, clay). It is determined experimentally that all media interacting with the wedge have some common characteristics depending on the parameters of wedge, in spite of differences of physical and mechanical properties and the appearance of layer formation. The experimental dependence of equivalent stresses on cutting angle of the wedge is obtained. Experimental and theoretical results agree well with each other. On the basis of these studies, the working organs with variable cutting angle are developed. It is revealed that the blade with variable cutting angle creates more tension in the soil layer than a blade with constant cutting angle. It is experimentally confirmed that the working organs with variable cutting angle along the length of the coulter crumble the layer by 20–50 % better than serial working organs. The economic effect of the introduction of working organs with variable cutting angle is 200–1300 rubles per hectare of cultivated area.

Keywords: soil fracture model; tractive resistance; soil crumbling; dihedral wedge; interaction between working organs and soil; optimal parameters.

Введение

К сожалению, во всем мире уделяется недостаточно внимания исследованию изменения свойств почвы при механической обработке. Отсутствуют необходимые приборы для измерения физических величин, характеризующих почву. Для определения возможности качественного крошения почвы с наименьшими затратами нужно знать ее сопротивляемость разрушению при различных условиях взаимодействия рабочих органов с почвой. До сих пор не существует общепризнанных моделей разрушения (деформации) почвы, а многие известные модели применяют закономерности разрушения упругого тела.

Многочисленные попытки применения методов исследования упругих материалов для анализа крошения (разрушения) почвы пока не дали практических результатов, так как зависимость между силой, действующей на почву, и деформацией почвы является функцией состояния почвы. Поэтому использование математического аппарата разрушения упругих тел в классическом виде при проектировании рабочих органов малоэффективно. Следует отметить, что почвы иногда могут обладать отдельными фрагментами свойств упругого тела в зависимости от их механического состава, влажности и степени уплотнения.

В данной статье рассматривается один из возможных подходов к исследованию процесса разрушения почвы рабочими органами почвообрабатывающих орудий.

Научная гипотеза

Известно, что для качественной обработки почвы с минимальными затратами необходимы почвообрабатывающие рабочие органы с оптимальными для данного типа почв параметрами. Общеизвестно также, что основное крошение почвенного пласта происходит в момент его сжатия и отрыва от материковой почвы. Таким образом, каждому конкретному углу резания рабочего органа соответствует кусок обрабатываемой почвы конкретных размеров.

На основании вышеизложенного выдвинута научная гипотеза о том, что переменный угол резания по длине лемеха способствует улучшению крошения почвенного пласта. Для подтверждения этой научной гипотезы проведены теоретические и лабораторно-производственные опыты.

Теоретические исследования

Основные постулаты подхода:

— разрушение почвы и ее элементов возникает, если действующая сила превосходит силу, сопротивляющуюся разрушению;

— величина и направление действующей силы могут быть определены в результате анализа взаимодействия рабочего органа с почвой;

— сила, с которой почва сопротивляется разрушению, может быть приближенно определена на основе механического состава почвы и ее влажности в момент обработки.

Рассмотрим некоторые элементы процесса разрушения на примере двугранного клина (рис. 1).

При движении в почве клин взаимодействует с ней по нормали, отклоненной на угол трения почвы о поверхность клина. В этом направлении клин сдвигает почву по плоскости площадью:

$$S = \frac{ab}{\cos(\alpha + \varphi)}, \quad (1)$$

где S — площадь разрушения почвы; a — глубина хода клина; α — угол двугранного клина; φ — угол трения при скольжении почвы по клину; b — ширина клина.

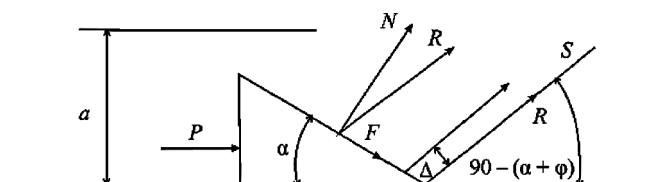


Рис. 1. Разрушение почвы двугранным клином

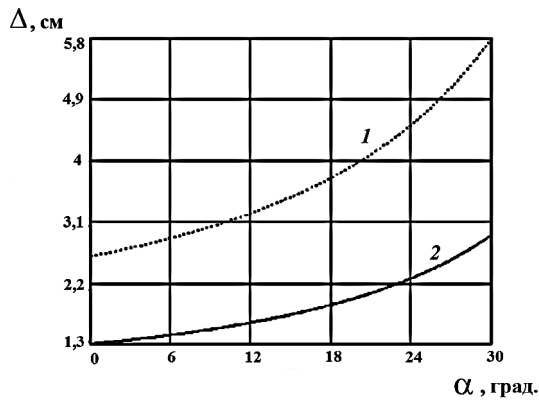


Рис. 2. Толщина элементов разрушения почвы в зависимости от угла установки клина к дну борозды при $\sigma_{сж} = 10\tau$:

1 — $a = 20$ см; 2 — $a = 10$ см

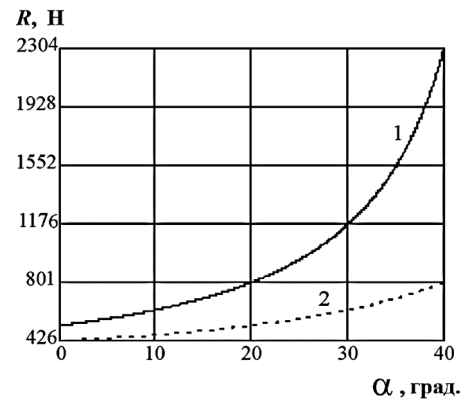


Рис. 3. Сила на клине при отделении стружки почвы толщиной Δ :

1 — $a = 0,2$ м; 2 — $a = 0,1$ м

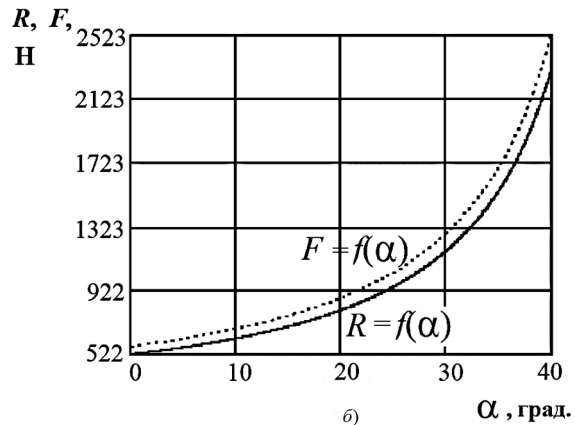
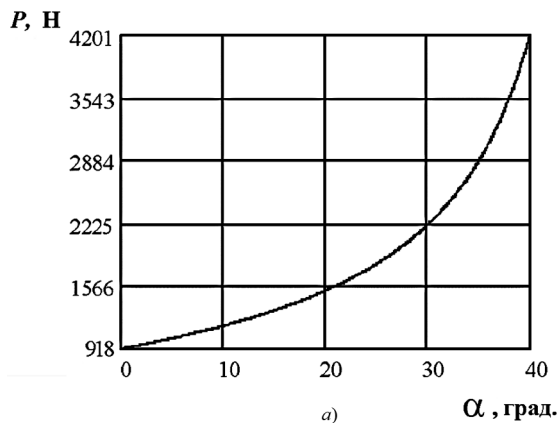


Рис. 4. Сила P тягового сопротивления клина при отделении стружки (а) и ее составляющие R и F (б) при $\mu = 4000$ Н/м²; $a = b = 0,1$ м; $\varphi = 40^\circ$

При этом сила R должна быть равна:

$$R = \frac{\mu ab}{\cos(\alpha + \varphi)}, \quad (2)$$

где μ — коэффициент сцепления частиц почвы на площади S .

С большими допущениями можно считать этот коэффициент предельным сопротивлением почвы сдвигу τ .

Клин внедряется в почву без ее разрушения до тех пор, пока на нем не сформируется пласт толщиной Δ . Только тогда может проявляться действие силы R . Толщину пласта определим из условия:

$$R = \Delta b \sigma, \quad (3)$$

где σ — предельное нормальное напряжение на пласте.

Решив совместно уравнения (2) и (3), получим:

$$\Delta = \frac{a\tau}{\sigma \cos(\alpha + \varphi)} = \frac{\mu a}{\sigma \cos(\alpha + \varphi)}. \quad (4)$$

На рис. 2 представлена зависимость толщины элемента разрушения Δ от угла установки клина к дну борозды при условии $\sigma_{сж} = 10\tau$.

Подставив в уравнение (3) значение Δ , получим:

$$R = \frac{\mu ab}{\cos(\alpha + \varphi)}, \text{ или } R = \frac{\tau ab}{\cos(\alpha + \varphi)}. \quad (5)$$

Сила тягового сопротивления клина P определяется полученной силой разрушения R и силой трения при движении почвы по клину в момент разрушения материкового пласта F без учета силы, затрачиваемой на движение сформированного пласта почвы по клину длиной L (рис. 3; 4, а):

$$P = R \cos(90 - (\alpha + \varphi)) + F \cos \alpha; \quad (6)$$

$$F = N \operatorname{tg} \varphi,$$

где N — сила нормального давления на поверхности при разрушении материкового пласта почвы; φ — угол трения.

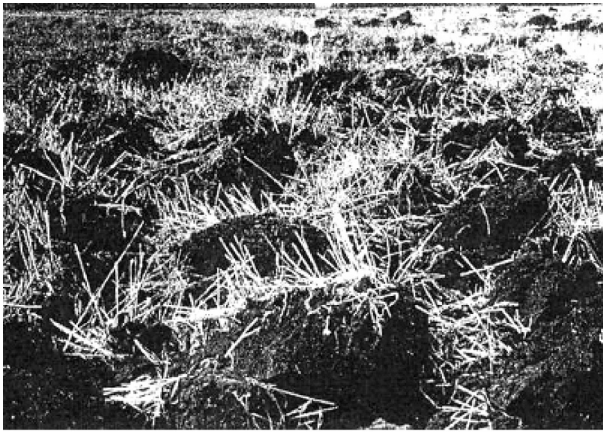
$$N = \frac{R}{\cos \varphi}, \text{ или } N = \frac{\mu ab}{\cos \varphi \cos(\alpha + \varphi)}.$$

После подстановки F в уравнение (6) получим:

$$P = R \left(\sin(\alpha + \varphi) + \frac{\cos \alpha \operatorname{tg} \varphi}{\cos \varphi} \right). \quad (7)$$

Численные значения составляющих R и F силы тягового сопротивления показаны на рис. 4, б.

Данный теоретический результат опробован на плоскорежущих и отвальных рабочих органах почвообра-

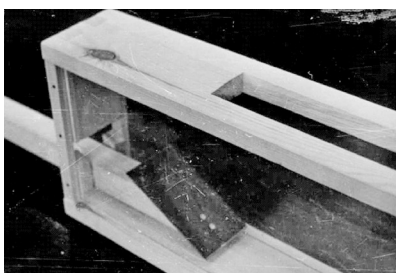


а)

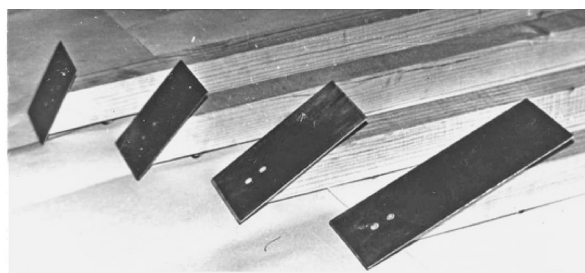


б)

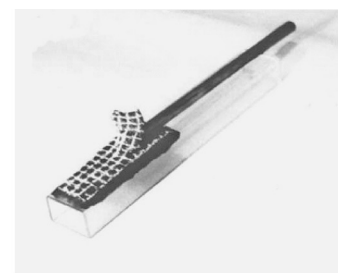
Рис. 5. Поле, обработанное КПП с серийными рабочими органами (а) и рабочими органами с переменным углом резания (б)



а)



б)



в)

Рис. 6. Экспериментальные исследования:

а — почвенный канал; б — различные виды двугранных клиньев; в — воздействие клина с переменным углом резания

тывающих машин. Результаты лабораторных и экспериментальных исследований приведены ниже.

Используемые в настоящее время на основной безотвальной обработке почвы рабочие органы культиваторов-плоскорезов-глубокорыхлителей (КПП) еще не полностью отвечают агротехническим требованиям, особенно по качеству крошения почвенного пласта, сохранению стерни, размерам развальной борозды, гребнистости, а также равномерности крошения по ширине захвата плоскорезущего рабочего органа (рис. 5, а).

Экспериментальные исследования

Для лабораторных опытов использовался специально разработанный почвенный канал (рис. 6, а) и набор двугранных клиньев, отличающихся друг от друга углом установки рабочей грани к дну борозды (рис. 6, б). Испытания проводились в средах с широким диапазоном физико-механических свойств (чернозем обыкновенный, песок, горох, глина). Определялось воздействие переменного угла резания на изгиб и кручение глины, пластилина, влажного чернозема (рис. 6, в).

Результаты и их обсуждение

Проведенные лабораторные исследования показали, что:

1) несмотря на различия физико-механических свойств и внешней картины формирования пласта, все

среды при взаимодействии с клином имеют некоторые общие характеристики, зависящие от параметров клина;

2) лезвие с переменным углом резания создает большее напряженное состояние в пласте почвы, чем лезвие с постоянным углом резания.

Получены формулы [1] для определения эквивалентных напряжений (напряженных состояний), создаваемых лезвиями с постоянным и переменным углами резания:

$$\frac{\sigma^{III}}{\sigma^{II}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + 1,5\rho^2 \left(\frac{\Delta\varepsilon}{l}\right)^2}, \quad (8)$$

где σ^{III} , σ^{II} — напряженные состояния, создаваемые в пласте почвы лезвиями с переменным и постоянным углами резания; ρ — радиус изгиба пласта; $\Delta\varepsilon$ — интенсивность изменения угла резания по длине лезвия (в экспериментах $\Delta\varepsilon = 20..45^\circ$); l — длина лезвия.

Проведенные теоретические и лабораторные исследования позволили создать рабочие органы КПП с переменным углом резания.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что клин с переменным углом резания создает большее напряженное состояние в пласте почвы, чем клин с постоянным углом резания. Полагая, что крошение пропорционально возникающим напряжениям,

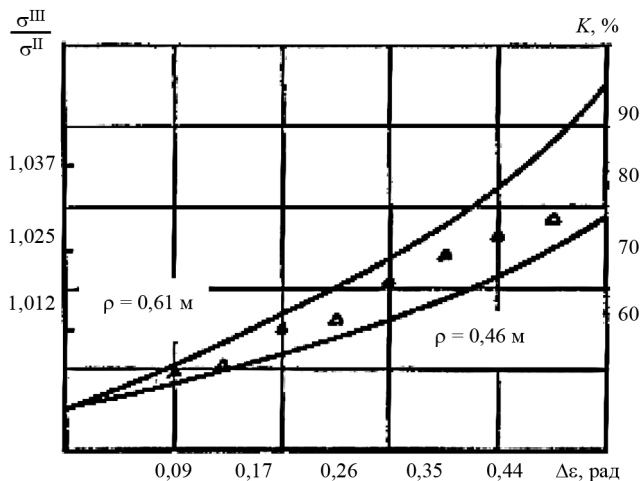


Рис. 7. Влияние изменения угла резания по длине лемеха $\Delta \varepsilon$ на эквивалентное напряжение и крошение почвенного пласта:

Δ — экспериментальные данные по крошению обрабатываемого пласта почвы

приходим к выводу, что клин с переменным углом резания обеспечит лучшее крошение.

Характер возникающих в пласте почвы напряжений различен. При действии на почву рабочим органом с постоянным углом резания напряженное состояние в пласте возникает от деформации изгиба, а при действии рабочим органом с переменным углом резания — от деформации изгиба и кручения.

Экспериментальные данные по крошению и тяговому сопротивлению свидетельствуют о справедливости выдвинутой научной гипотезы (рис. 7; 5, б).

Таким образом, рассмотренная модель разрушения почвы хорошо согласуется с физическими процессами взаимодействия клина с почвой, а представленные на рис. 2—4 расчетные данные корректно соотносятся с экспериментальными данными, полученными многими авторами в России и за рубежом [2—8]. Сходимость представленных моделей с экспериментальными данными намного выше, чем у других моделей, в т.ч. базирующихся на упругих свойствах почвы.

Заключение

Как показали экспериментальные исследования, рабочие органы КПП с переменным углом резания по длине лемеха крошат обрабатываемый пласт на 20—50 % лучше, чем серийные.

Экономический эффект от внедрения рабочих органов КПП с переменным углом резания составляет 200—1300 руб/га.

Литература и источники

1. Свечников П. Г. Обоснование параметров плоскорежущей лапы с переменным углом резания для глубокого рыхления почвы: Дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 1984. 225 с.
2. Бледных В. В. Устройство, расчет и проектирование почвообрабатывающих орудий: Учеб. пособие. Челябинск: ЧГАА, 2010. 214 с.
3. Горячкин В. П. Собрание сочинений в 3 т. М.: Колос, 1968.
4. Кулен А., Куиперс Х. Современная земледельческая механика / Пер. с англ. А. Э. Габриэляна. М.: Агропромиздат, 1986. 349 с.
5. Blednykh V., Svechnikov P. Theoretical foundations of tillage. Tillers and aggregates. New York, Nova Science Publ. Inc., 2014, 174 p.
6. Blednykh V., Svechnikov P. Economic reasons of tillage quality. European science review, 2014, no. 7—8, pp. 103—105.
7. Blednykh V., Svechnikov P. Theory of a tillage wedge and its applications. Berlin, Logos Verlag Berlin GmbH, 2013, 94 p.
8. Blednykh V. V., Svechnikov P. G., Troyanovskaya I. P. Analytical model of soil pulverization and tillage tools. Procedia Engineering, 2015, no. 129, pp. 69—74. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.010.

References

1. Svechnikov P. G. *Obosnovanie parametrov ploskorezhushchey lapy s peremennym uglom rezaniya dlya glubokogo rykhleniya pochvy*. Dis. kand. tekhn. nauk. [Justification of parameters of a flat hoe with variable cutting angle for deep soil loosening. PhD in Eng. thesis]. Chelyabinsk, 1984, 225 p.
2. Blednykh V. V. *Ustroystvo, raschet i proektirovanie pochvo-obrabatyvayushchikh orudiy* [Structure, calculation and design of tillers]. Chelyabinsk, Chelyabinsk State Agroengineering Academy, 2010, 214 p.
3. Goryachkin V. P. *Sobranie sochineniy v 3 t.* [Collected works in 3 vol.]. Moscow, Kolos Publ., 1968.
4. Koolen A. J., Kuipers H. *Agricultural soil mechanics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1983 [Russ. ed.: Kulen A., Kuipers Kh. *Sovremennaya zemledel'cheskaya mekhanika*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986, 349 p.].
5. Blednykh V., Svechnikov P. *Theoretical foundations of tillage. Tillers and aggregates*. New York, Nova Science Publ. Inc., 2014, 174 p.
6. Blednykh V., Svechnikov P. Economic reasons of tillage quality. *European science review*, 2014, no. 7—8, pp. 103—105.
7. Blednykh V., Svechnikov P. *Theory of a tillage wedge and its applications*. Berlin, Logos Verlag Berlin GmbH, 2013, 94 p.
8. Blednykh V. V., Svechnikov P. G., Troyanovskaya I. P. Analytical model of soil pulverization and tillage tools. *Procedia Engineering*, 2015, no. 129, pp. 69—74. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.010.