

# ВЛИЯНИЕ УГЛА РЫХЛЕНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА ЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКОГО ОРУДИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ПОЧВЕННЫХ АГРЕГАТОВ

## THE INFLUENCE OF THE ANGLE OF LOOSENING OF THE WORKING BODY OF AN AGRICULTURAL INSTRUMENT ON THE INTENSITY OF DESTRUCTION OF SOIL AGGREGATES

**В.И. МЯЛЕНКО**, д.т.н.

ФГБОУ ВО Кемеровский ГСХИ, Кемерово, Россия,  
lapa\_25@bk.ru

**V.I. MYALENKO**, DSc in Engineering

Kemerovo State Agricultural Institute, Kemerovo, Russia,  
lapa\_25@bk.ru

Следствием механической обработки почвы, помимо положительных результатов, являются и отрицательные последствия, связанные с разрушением первичных почвенных микроагрегатов. Часть почвенных микроагрегатов, которые непосредственно контактируют с поверхностью рабочего органа земледельческого орудия, сминаются и разрушаются. Непосредственно микроагрегат представляет собой устойчивую почвенную совокупность, или структурную единицу спелой почвы. В центре микроагрегата имеются твердые частицы материнской породы, как правило – это диоксиды кремния  $\text{SiO}_2$ , вокруг которых располагается плотная органическая оболочка. Факт разрушения первичных почвенных микроагрегатов в обрабатываемом слое почвы подтверждается износом рабочих органов земледельческих орудий, которые подвергаются воздействию абразивных частиц материнской породы, образующихся вследствие разрушения самих микроагрегатов. Получается, что интенсивность износа рабочих органов косвенным образом характеризует интенсивность разрушения почвенных микроагрегатов. В результате обработки спелых почв, ее рыхление с целью обеспечения не менее 50 % пористости, попутно измельчая, разрушает определенный слой структуры агрегатного строения той же самой почвы. Данные противоречия формируют задачу поиска решения снижения возможности разрушения агрегатного строения почвы при ее обработке земледельческими орудиями.

Целью настоящей работы являлось выявление влияния геометрических параметров рабочих органов земледельческих орудий на интенсивность разрушения микроагрегатов в прилегающем слое почвы. Данная цель достигалась посредством теоретических исследований и при использовании имитационных лабораторных испытаний, в результате которых определены интервалы геометрических характеристик рабочих органов, при которых достигается наименьшее разрушение почвенных микроагрегатов.

*Ключевые слова:* разрушение почвенных микроагрегатов, нормальные давления почвы, сдвигающие силы, дилатансия.

The consequence of mechanical tillage, in addition to achieving positive results, are also negative consequences associated with the destruction of the primary soil microaggregates. Some of the soil microaggregates that are in direct contact with the surface of the working body of the agricultural tools are crushed and destroyed. Directly microaggregate is a sustainable soil aggregate, or structural unit of ripe soil. In the center of the microaggregate there are solid particles of the parent rock, as a rule, these are  $\text{SiO}_2$  silica, around which there is a dense organic shell. The very fact of the destruction of the primary soil microaggregates in the treated soil layer is confirmed by the wear of the working bodies of agricultural tools, which are carried out by abrasive particles of the parent rock due to the destruction of the microaggregates themselves. It turns out that the intensity of wear of the working bodies indirectly characterizes the intensity of the destruction of soil microaggregates. As a result of the processing of ripe soils, its loosening in order to ensure at least 50 % of porosity, simultaneously grinding, destroys a certain layer of the structure of the aggregate structure of the same soil. These contradictions form the problem of finding a solution, reducing the possibility of destruction of the aggregate structure of the soil when it is processed by agricultural tools.

The purpose of this work was to identify the influence of the geometrical parameters of the working bodies of agricultural tools on the intensity of destruction of microaggregates in the adjacent soil layer. This goal was achieved through theoretical studies and with the use of simulation laboratory tests, as a result of which the intervals of the geometric characteristics of the working bodies, at which the smallest destruction of soil microaggregates is achieved, are determined.

*Keywords:* destruction of soil microaggregates, normal soil pressure, shear forces, dilatancy.

## Введение

Весь опыт земледелия с применением разнообразных технологий, как правило, предусматривает периодическую обработку почвы. Обрабатывают почву для обеспечения необходимой аэрации и уничтожения корней сорных растений, а также получения требуемой плотности и влажности и в целом для создания благоприятных условий для развития культурных растений.

Вместе с тем, в прилегающем к рабочим органам слое почвы происходят разрушения почвенных микроагрегатов, а высвобожденные таким образом твердые частицы материнской породы истирают и изнашивают поверхности трения рабочих органов [1]. Интенсивность износа, как и величины силового нагружения рабочих органов, в первую очередь зависят от углов наклона их лезвий относительно дна борозды или от углов рыхления [2, 3]. Угол рыхления выбирают исходя из агротехнических требований и назначения для тех или иных земледельческих орудий.

## Цель исследования

В качестве задачи настоящего исследования было принято решение проанализировать влияние угла рыхления почвы рабочим органом земледельческого орудия на интенсивность разрушения микроагрегатов в обрабатываемом слое почвы.

## Материалы и методы

Действие рабочего органа земледельческого орудия в процессе рыхления сопровождается внутренними напряжениями в структуре обрабатываемого слоя почвы. В качестве образца исследуемого рабочего органа был принят рыхлитель, выполненный в форме прямого клина. Начальным источником напряжений в почве является горизонтальная составляющая от действия рыхлителя. На рис. 1 показана схема действия прямого клина рыхлителя на обрабатываемый слой почвы.

Рассматривая напряжения, возникающие в структуре спелой почвы при ее механическом рыхлении: напряжения сжатия  $\sigma_2$  и растяжения  $\sigma_1$ , которые при своих предельных значениях создают сдвиговый эффект в направлении действия касательного напряжения  $\tau$  [4]. Почва приобретает состояние, близкое к зернистой среде в период своей спелости при определен-

ных температурах и влажности, когда в почве в наличии воздух и вода, а твердая фаза представляет собой отдельные почвенные совокупности, скрепленные между собой. Сами совокупности состоят из первичных структурных единиц микроагрегатов. Сдвиговые явления при рыхлении происходят за счет преодоления внутренних связей, скрепляющих совокупности между собой, при этом происходят взаимные перемещения, которые увеличивают первоначальный объем почвы, увеличивают ее пористость [5]. Сдвиговые явления в зернистых средах, за счет которых увеличивается первоначальный объем, называют дилатансией [6]. В соответствии с законом Кулона величина касательного сдвигающего напряжения  $\tau_{eg}$  определяется следующим образом [7]:

$$\tau_{eg} = \sigma_2 \cdot \operatorname{tg} \varphi + C, \quad (1)$$

где  $\sigma_2$  – предельное напряжение сжатия;  $\varphi$  – угол внутреннего трения;  $C$  – удельное сцепление между почвенными совокупностями.

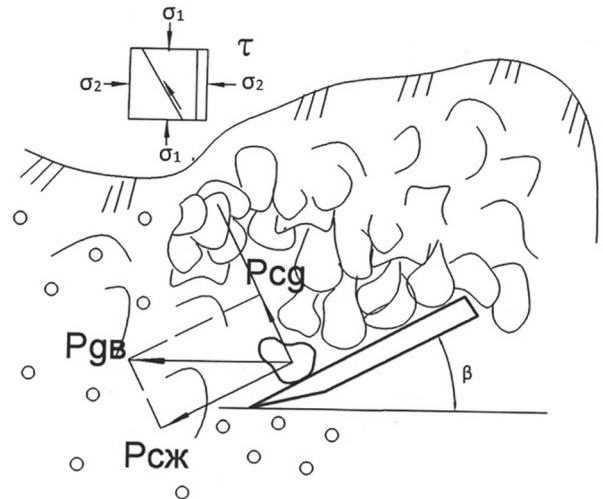
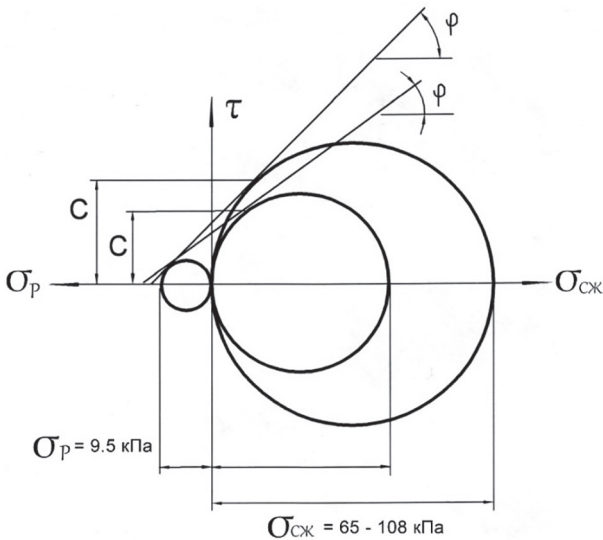


Рис. 1. Схема действия прямого клина рыхлителя на обрабатываемый слой почвы

В реальных условиях значения предельных напряжений почвы изменяются в довольно широких пределах в зависимости от типов почвы и ее влажности. Для каждого конкретного случая определение  $\varphi$  и  $C$  можно производить при помощи примерного паспорта прочности спелой почвы.

На рис. 2 изображены круги Мора, где посредством графического изображения предельных напряжений и их диапазона изменения определяются постоянные  $\varphi$  и  $C$  в уравнении (1). Для практического применения в первом



**Рис. 2. Примерный паспорт прочности спелой почвы:**  
 $\sigma_p, \sigma_{сж}$  – предельные напряжения растяжения и сжатия;  $\varphi$  – угол внутреннего трения;  $C$  – удельное сцепление между почвенными совокупностями

приближении закон Кулона можно выразить через сдвигающую силу  $P_{cg}$ :

$$P_{cg} = N \cdot \operatorname{tg} \varphi + P_0, \quad (2)$$

где  $N$  – нормальное давление;  $\varphi$  – угол внутреннего трения;  $P_0$  – начальная сила сдвига, по природе подобная  $C$  в формуле (1).

Вся трудность последующего подхода к выявлению интенсивности разрушения почвенных микроагрегатов, при известных значениях предельных напряжений, заключается в определении нормальных давлений, действующих на обрабатываемый слой почвы со стороны рабочего органа рыхлителя.

### Результаты и обсуждения

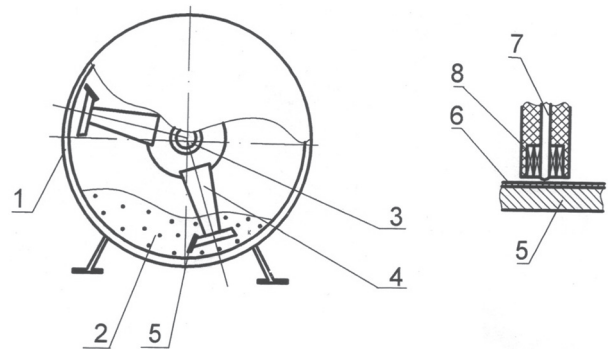
Процесс разрушения микроагрегатов происходит в следующей последовательности. Вначале на поверхности рабочего органа происходит сжатие, и затем, перемещаясь, микроагрегаты истирают твердыми частицами материнской породы поверхность трения рабочего органа. При изменении угла рыхления меняется величина сдвигающей силы  $P_{cg}$ , и, когда она будет превышать начальную силу сдвига, т.е.  $P_{cg} > P_0$ , почвенные совокупности перемещаются в направлении сдвига, а их место занимают следующие совокупности. В итоге при проведении исследований важно знать изменение величин нормальных давлений при изменении углов рыхления рабочего органа. Измерение нормальных давлений во всех точках поверхности трения при стендовых испытаниях про-

водилось косвенным образом исходя из закона Амонтона-Кулона:

$$N = \frac{\Delta \text{Из}}{\operatorname{tg} \varphi_1 \cdot K}, \quad (3)$$

где  $\Delta \text{Из}$  – точечная величина выноса материала по глубине с поверхности трения;  $\varphi_1$  – угол трения почвы о поверхность износа;  $K$  – коэффициент, характеризующий сопротивляемость абразивному износу поверхности трения.

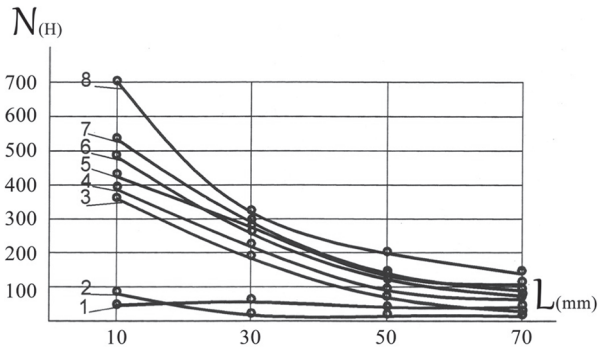
Интенсивность абразивного износа в разных точках поверхности трения измерялась на лабораторном стенде [8], схема которого приведена на рис. 3.



**Рис. 3. Стенд для ускоренных имитационных испытаний рабочих органов на абразивный износ:**  
 1 – барабан; 2 – почвенно-песчаная среда, хорошо измельченная с влажностью до 20–25 %;  
 3 – вал; 4 – стойки; 5 – испытываемый рабочий орган; 6 – легкоистираемый материал;  
 7 – сердечник; 8 – катушка

На испытываемый рабочий орган рыхлителя 5 наносился легкоистираемый материал 6, по результатам изнашивания которого производилось измерение толщины слоя нанесенного материала. Толщина слоя измерялась магнитоиндукционным методом с помощью сердечника 7 и катушки 8. Далее по зависимости (3) рассчитывалась величина нормального давления.

Результаты измерений и расчетов представлены на рис. 4. Из графиков следует, что на всей длине клина рыхлителя имеют место разные величины нормальных давлений. Наибольшие величины давления возникают ближе к кромке лезвия рыхлителя. В то же время при углах рыхления 20–25° величины нормальных давлений остаются примерно постоянными по всей длине пути трения. Уравнения регрессии функций нормальных давлений в зависимости от длины пути трения имеют следующий вид:



**Рис. 4. Графики изменения нормальных давлений на поверхности трения рыхлителя:**

$N$  – нормальное давление;  $L$  – координата точек измерения нормальных давлений в размерах от кромки лезвия; 1 – функция  $N = f(L, \beta = 20^\circ)$ ; 2 – функция  $N = f(L, \beta = 25^\circ)$ ; 3 – функция  $N = f(L, \beta = 30^\circ)$ ; 4 – функция  $N = f(L, \beta = 35^\circ)$ ; 5 – функция  $N = f(L, \beta = 40^\circ)$ ; 6 – функция  $N = f(L, \beta = 45^\circ)$ ; 7 – функция  $N = f(L, \beta = 50^\circ)$ ; 8 – функция  $N = f(L, \beta = 55^\circ)$

$$\left\{ \begin{aligned} N_1 &= f(L, 20^\circ), N_1 = -0,0019L^2 + 0,075L + 5,68; \\ N_2 &= f(L, 25^\circ), N_2 = 0,0031L^2 - 0,335L + 11,088; \\ N_3 &= f(L, 30^\circ), N_3 = 0,0094L^2 - 1,305L + 49,263; \\ N_4 &= f(L, 35^\circ), N_4 = 0,0069L^2 - 1,125L + 49,813; \\ N_5 &= f(L, 40^\circ), N_5 = 0,0094L^2 - 1,335L + 55,963; \\ N_6 &= f(L, 45^\circ), N_6 = 0,0138L^2 - 1,750L + 64,105; \\ N_7 &= f(L, 50^\circ), N_7 = 0,0138L^2 - 1,820L + 70,925; \\ N_8 &= f(L, 55^\circ), N_8 = 0,0219L^2 - 2,665L + 95,412. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Анализируя  $N = f(L, \beta)$ , можно с определенной достоверностью предположить, что при углах рыхления  $\beta = 20-25^\circ$ , когда нормальные давления по всей длине рыхлителя близки к постоянным величинам, слой обрабатываемой почвы равномерно перемещается по поверхности трения, а сдвиговые деформации незначительны. При таких углах рыхления разрушение микроагрегатов почвы происходит только в слое непосредственного контакта с поверхностью трения рабочего органа. При данных значениях углов рыхления можно считать, что сдвигающие силы имеют свои номинальные значения. Далее они изменяются при увеличении углов крошения  $\beta$ . Тогда в выражении (2) переменная только одна –  $N = f(L)$ . Принимая номинальные значения сдвигающей силы за единицу, можно сравнить ее изменение в зависимости от углов рыхления. В этом случае удобно воспользоваться расчетом площадей,

криволинейных трапеций, ограниченных уравнениями регрессии (4):

$$\sum P_{cgn} = \int_{10}^{70} P_{cgn} dL = \int_{10}^{70} [(-0,0019L^2 + 0,075L + 5,680)] \operatorname{tg} \varphi + P_0] dL = 57,36 \text{ мм}^2, \quad (5)$$

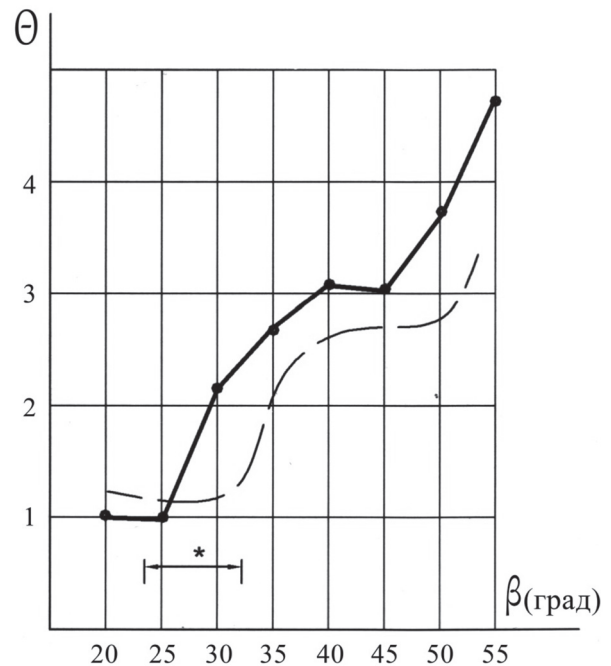
где  $\sum P_{cgn}$  – номинальное значение суммарной величины сдвигающей силы;  $P_{cgn}$  – номинальная сдвигающая сила;  $L$  – координата точек измерения нормальных давлений в размерах от кромки лезвия.

Тогда относительное изменение суммарной величины сдвигающей силы определяется соотношением:

$$\frac{\sum P_{cgi}}{P_{cgn}} = \theta, \quad (6)$$

где  $\sum P_{cgi}$  – суммарная величина сдвигающей силы при угле  $i$  рыхления почвы;  $\theta$  – относительное изменение суммарной сдвигающей силы.

Рассчитанные значения  $\theta$  при разных углах рыхления почвы по зависимостям (4) и (5) представлены на рис. 5.



**Рис. 5. Относительное изменение суммарных величин сдвигающей силы в зависимости от углов рыхления рабочим органом сельскохозяйственного орудия**

Из графиков следует, что изменение величин суммарных сдвигающих сил в зависимости от увеличения угла рыхления почвы носит не линейный характер. При увеличении угла

рыхления более  $25^\circ$  значительно увеличиваются суммарные сдвигающие силы. Следует иметь в виду, что в лабораторных условиях почвенно-песчаная среда была достаточно однородной по составу, и хорошо взрыхленной, и с низкой влажностью, а также то, что в данных условиях величина начальной сдвигающей силы  $P_0$  (см. уравнение 2) была значительно меньше, чем имеется в реальном почвенном сложении. В реальных почвах следует ожидать смещение графика зависимости (рис. 5) за счет увеличения  $P_0$  – как показано штриховыми линиями.

### Заключение

В результате проведенных исследований установлено следующее. При углах рыхления менее  $25\text{--}30^\circ$ , слой почвы, обрабатываемый земледельческим орудием, равномерно перемещаясь по поверхности трения рабочего органа, воспринимает практически одинаковое давление по всей длине перемещения; в этом случае следует считать, что происходят наименьшие разрушения микроагрегатной структуры почвы.

При увеличении угла рыхления более  $30^\circ$  обрабатываемый слой почвы испытывает неравномерное давление по длине пути перемещения. Наибольшие величины давлений возникают ближе к кромке лезвия рабочего органа рыхлителя. В местах наибольшего давления почвенные совокупности (микроагрегаты) интенсивно истирают своими частицами материнской породы рабочий орган, при этом, сами истираясь, перемещаются сдвиговыми силами верхнего слоя обрабатываемой почвы.

Для углов рыхления  $25\text{--}30^\circ$  принимаем давление на обрабатываемый слой почвы за номинальное, и далее, сравнивая его со значениями при больших углах рыхления, имеем увеличение от номинального в 2–4 раза, что характеризует значительный рост интенсивности разрушения микроагрегатов.

### Литература

1. Панов И.М., Ветохин В.И. Физические основы механики почв. Киев: Феникс, 2008. 266 с.
2. Шейн Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
3. Севернев М.М., Подлекаев Н.Н., Сохадзе В.Ш., Китиков В.О. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин / под ред. М.М. Севернева. Минск: Белорус. Новука, 2011. 333 с.

4. Цытович Н.А. Механика грунтов. Краткий курс. М.: Ленанд., 2014. 288 с.
5. Гросс Е.Е., Кокорева А.А., Кулижский С.П., Николаева Е.И., Соловьева Т.П. Исследование изменения прочности агрегатов почв при различных сельскохозяйственных нагрузках // Вестн. Том. Гос. ун-та. 2013. № 368. С. 180–185.
6. Бурлаков В.Н., Тер-Мартirosян А.З. Дилатансия, влияние на деформируемость грунтов // Вест. МГСУ. 2010. № 4. С. 218–222.
7. Евстифеев Д.В., Дроздовский Г.П., Шоль Н.Р. Исследование параметров грунта при его прямом сдвиге // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2005. № 3. С. 128–132.
8. Установка для испытания на абразивный износ рабочих органов почвообрабатывающих машин: пат. 2649241, Российская Федерация / Мяленко В.И., Маринов Н.А., Санкин А.С., Бузиян О.Н., Понуровский В.А.; опубл. 30.03.2018.

### References

1. Panov I.M., Vetohin V.I. Fizicheskie osnovy mekhaniki pochv [Physical fundamentals of soil mechanics]. Kiev: Feniks Publ., 2008. 266 p.
2. Shein E.V. Kurs fiziki pochv [Soil physics course]. Moscow: Izd-vo MGU Publ., 2005. 432 p.
3. Severnev M.M., Podlekaev N.N., Sohadze V.S.H., Kitikov V.O. Iznos i korroziya sel'skohozyajstvennyh mashin [Wear and corrosion of agricultural machinery]. Pod red. M.M. Severneva. Minsk: Belorus. Novuka Publ., 2011. 333 p.
4. Cytovich N.A. Mekhanika gruntov. Kratkij kurs [Soil mechanics. Brief course]. Moscow: Lenand. Publ., 2014. 288 p.
5. Gross E.E., Kokoreva A.A., Kulizhskij S.P., Nikolaeva E.I., Solov'eva T.P. Investigation of changes in the strength of soil aggregates under various agricultural loads. Vestn. Tom. Gos. un-ta. 2013. No 368, pp. 180–185.
6. Burlakov V.N., Ter-Martirosyan A.Z. Dilatancy, effect on soil deformability. Vest. MGSU. 2010. No 4, pp. 218–222.
7. Evstifeev D.V., Drozdovskij G.P., SHol' N.R. Investigation of soil parameters in its forward shear. Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa. 2005. No 3, pp. 128–132.
8. Myalenko V.I., Marinov N.A., Sankin A.S., Buziyana O.N., Ponurovskij V.A. Ustanovka dlya ispytaniya na abrazivnyj iznos rabochih organov pochvoobrabatyvayushchih mashin [Installation for testing the abrasive wear of the working bodies of tillage machines]: patent na izobretenie No 2649241, RF. Opublikovano 30.03.2018.