

УДК 631.313

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСИЛИЙ РЕЗАНИЯ, РЫХЛЕНИЯ И ЩЕЛЕНИЯ ПОЧВ**

*канд. техн. наук, доц. А.П. КАСТРЮК  
(Полоцкий государственный университет)*

*Установлены основные причины уменьшения урожайности почв с выделением роли их уплотнения. Намечены технические и организационные решения, направленные на исключения переуплотнения почв. Определены силовые зависимости при резании почвы, необходимые для выбора и проектирования средств обработки почвы. Для разуплотнения переуплотненных пахотных и подпахотных слоев почвы эффективно глубокое рыхление и щеление с помощью упрочненных рабочих органов. Геометрия режущих элементов рабочих органов почвообрабатывающих машин находится в тесной взаимосвязи с процессами их взаимодействия с почвой.*

**Введение.** Использование тракторов и сельскохозяйственных машин на полевых работах связано с отрицательным воздействием их колес и гусениц на почву. Ходовые системы сельскохозяйственной техники воздействуют на 20...80 % площади поверхности обрабатываемого поля, а поворотные полосы подвергаются 8...10-кратному воздействию по всей их поверхности. Это воздействие определяется давлением на почву и глубиной следа, оно изменяет структуру почвы и её основные физико-механические и агрофизические свойства: плотность, твердость, пористость и сопротивление последующей обработке. Плотность почвы, например, увеличивается в 1,1...1,4 раза, при этом её деформирование распространяется на глубину 0,4...0,5 м и в отдельных случаях может достигать 1 м. Одновременно снижается пористость почвы [1, 2]. Комплексным показателем, отражающим все изменения в почве за счет выполнения технологических операций, является урожайность сельскохозяйственных культур, которая уменьшается в случае ухудшения свойств почвы.

Цель данной работы – повышение свойств почвы за счет оптимальной совокупности операций с определением силовых зависимостей при её обработке.

**Влияние плотности почвы на урожайность сельскохозяйственных культур.** Чаще других для оценки воздействия на почву элементов ходовых систем сельскохозяйственных машин используется её плотность. С плотностью почвы связаны её водный, воздушный, а часто температурный режим, что в совокупности определяет условия развития микробиологических организмов. Для дерново-подзолистых почв значение плотности почвы в пахотном слое (в разное время года) в зависимости от вида выполняемых операций под различными культурами составляет 900...1400 кг/м<sup>3</sup> [3].

Плотность почвы изменяется во времени. Процесс уплотнения почвы зависит от структуры почвы, количества осадков, а также от вида обработки почвы и качества её выполнения. При достижении определенной плотности почвы процесс её самоуплотнения практически прекращается. Эта плотность является равновесной. Наиболее высоких значений равновесной плотности достигают дерново-подзолистые почвы и сероземы. Так, естественное уплотнение дерново-подзолистых почв происходит до плотности 1250...1450 кг/м<sup>3</sup>, хотя в отдельные годы может достигать 1480...1540 кг/м<sup>3</sup>, дерново-подзолистых песчаных и сероземов – 1500...1600 кг/м<sup>3</sup> [3, 8].

Повышение плотности обуславливает негативные явления:

- уменьшение водопроницаемости почвы и, как следствие, сокращение количества влаги, поступающей к растениям. Так, на суглинистых и тяжелосуглинистых почвах при повышении плотности с 1000 до 1600 кг/м<sup>3</sup> скорость фильтрации уменьшается в 1...5 тыс. раз и едва достигает 0,003...0,0003 мм/мин. В то же время на легких супесчаных почвах наблюдается падение скорости фильтрации в 10...12 раз, а при плотности 1600 кг/м<sup>3</sup> значение скорости фильтрации составляет 0,05 мм/мин;

- увеличение твердости почвы в 1,8...5,0 раз (в слое толщиной до 0,1 м может достигать 2...5 МПа);

- ухудшение газообмена, что приводит к медленному отводу в окружающее пространство, образующееся в результате биологической деятельности углекислоты;

- уменьшение объема биомассы, населяющей почву, замедление микробиологических и окислительно-восстановительных процессов;

- изменение температурного режима почвы. Более рыхлая почва меньше прогревается днем и медленнее теряет тепло ночью, а следовательно, её суточное изменение уменьшается. Уплотненная движителями тракторов почва может иметь суточную температуру на 4 °С меньшую, чем не уплотненная;

- ухудшение агрегатного состава почвы;

- уменьшение усвоения растениями азота, фосфора и калия на уплотненных почвах;

- ухудшение качества заделки семян и растягивание периода их всходов в следах от опорных элементов техники;

- увеличение в 1,3...1,9 раза сопротивления почвы обработке по следам сельскохозяйственной техники.

Повышение плотности и твердости почвы ведет к снижению жизнедеятельности почвенной микрофлоры и в конечном результате – к недобору 20...40 % урожая [1, 2, 4].

Для различных культур в зависимости от типа почв существуют оптимальные значения плотности, при которых урожай максимален. Обобщенные данные полевых и вегетационных опытов по оптимальной плотности почв показывают, что в целом диапазон оптимальных плотностей почв ограничен значениями 1000...1450 кг/м<sup>3</sup>. Для каждой конкретной культуры и типа почвы эти значения уточняются, и диапазон значения сужается. Более высокие значения оптимальной плотности для легких почв объясняются в основном лучшим соотношением мелких и крупных пор в этих почвах, что повышает содержание в них легкодоступной для растений воды.

Результаты оценки применяемых в республике тракторов, показывают, что тракторы тяговых классов 1,4...2,0 примерно в 1,5...2,0 раза превышают допустимый уровень нагрузки на почву. Тракторы тягового класса 3 (Т-150К) превышают этот показатель в 2,5 раза, а тракторы класса 5 (К-701) – в 3,5 раза.

**Уменьшение уплотнения почвы.** Для исключения переуплотнения почв можно выделить четыре главных направления:

- *технологическое*, заключающееся в совершенствовании технологии возделывания сельскохозяйственных культур и включающее снижение количества проходов техники по полю, особенно при повышенной влажности почвы, применение комбинированных и широкозахватных агрегатов, минимальную обработку почвы, проведение операций ухода по технологической колее и др.;

- *агро- и культуртехнические*, заключающиеся в проведении мероприятий, направленных на повышение способности почвы противостоять уплотняющим и сдвигающим нагрузкам. Это, прежде всего, внесение органических удобрений и соблюдение сроков проведения работ, выполнение операций механического разуплотнения подпахотных горизонтов;

- *конструкторское*, заключающееся в совершенствовании тракторов и сельскохозяйственных машин и их движителей с целью снижения нагрузки на почву. Направление включает применение двойных и специальных шин, полугусеничных движителей, регулирование давления воздуха в шинах и др.;

- *организационно-информационное*, направленное на формирование мнения о необходимости проведения комплекса мероприятий, направленных как на устранение переуплотнения почв, так и на защиту почв и улучшение земель в целом.

Для исключения переуплотнения почвы необходима ее периодическая обработка.

**Расчет усилий резания.** Усилие резания почвы при отделении ее пласта от массива под действием как касательных, так и нормальных напряжений зависит от типа почвы, ее состояния и режимов резания [5].

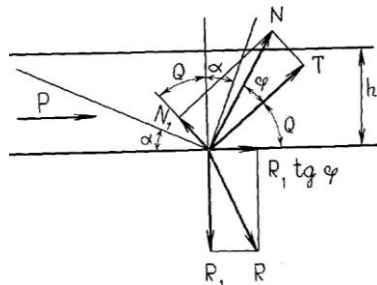


Рис. 1. Схема сил, действующих на пласт при резании горизонтальным ножом

Отрыв пласта (рис. 1) происходит, когда

$$\sigma_p \leq \frac{N \cos(\alpha + \varphi + \theta) \sin \theta}{bh},$$

а сдвиг (скалывание) при

$$\tau_{cd} \leq \frac{N \sin(\alpha + \varphi + \theta) \sin \theta}{bh},$$

где  $\sigma_p$  и  $\tau_{cd}$  – предельные значения удельных сопротивлений разрыву и сдвигу;  $N$  – давление на переднюю поверхность ножа с учетом сил трения;  $\alpha$  и  $\varphi$  – углы резания и трения почвы о металл соответственно;  $\theta$  – угол сдвига;  $b$  – ширина ножа, м;  $h$  – толщина среза, м.

Отрыв пласта произойдет, если

$$\frac{N \sin(\alpha + \varphi + \theta) \sin \theta}{\tau_{cd} bh} < \frac{N \cos(\alpha + \varphi + \theta) \sin \theta}{\sigma_p bh},$$

или

$$\operatorname{tg}(\alpha + \varphi + \theta) < \frac{\tau_{cd}}{\sigma_p}.$$

Сдвиг произойдет при  $\operatorname{tg}(\alpha + \varphi + \theta) > \frac{\tau_{cd}}{\sigma_p}$ .

Отношение  $\frac{\tau_{cd}}{\sigma_p}$  изменяется в зависимости от типа и состояния почвы, с уменьшением влажности оно возрастает. При резании сухих глинистых почв это отношение значительно больше единицы.

Для влажных пластичных почв отрыв может наблюдаться при малых углах резания, для почв твердых и хрупких, у которых отношение  $\frac{\tau_{cd}}{\sigma_p}$  больше, – при больших углах резания.

Совместное рассмотрение напряженного состояния грунта и видов деформации позволяет выделить три характерные зоны воздействия рабочего органа на грунт: зону скалывания (сдвига)  $h_{ск}$ ; зону среза  $h_{ср}$  и зону всестороннего сжатия  $h_{сж}$  (уплотнения), т.е.

$$h = h_{ск} + h_{ср} + h_{сж}.$$

Эти зоны зависят от параметров рабочего органа, режимов резания и грунтовых условий. Образование и соотношение их объясняются физико-механическими процессами, происходящими в грунтовом массиве под действием рабочих органов [12].

При резании горизонтальным ножом деформация грунта также состоит из трех зон (рис. 2). Только в этом случае зона сжатия связана с затуплением горизонтального ножа. При разрезании грунта уплотнение идет в стороны от поверхности ножа, а при резании со снятием стружки – вниз по отношению к поверхности резания. В зависимости от параметров рабочего органа и режимов резания один вид резания (разрезание) может переходить в другой (со снятием стружки) и обратно. Вид резания зависит от отношения  $\frac{b}{h}$ , грунтовых условий и режимов резания.

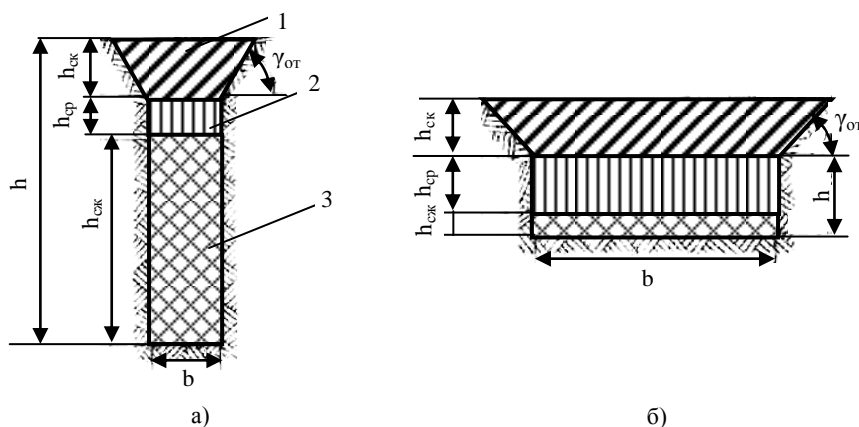


Рис. 2. Схема зон деформации при резании:  
а – разрезающим (вертикальным) ножом; б – горизонтальным со снятием стружки  
1 – зона скалывания; 2 – зона среза; 3 – зона всестороннего сжатия

Таким образом, деформация грунта вертикальными и горизонтальными ножами носит одинаковый характер. Это позволяет иметь одну и ту же структуру формулы силы резания для вертикального и горизонтального ножей. Как правило, для ножей разрезающих характерно  $\frac{b}{h} \ll 1$ , при резании горизонтальным ножом  $\frac{b}{h} > 1$ . Следует отметить, что большинство исследований резания ножами производилось на малой глубине (15...20 см), т.е. на глубине скалывания или на глубине, незначительно превышающей ее  $\left(\frac{h}{h_{ск}} = 1,0 - 1,5\right)$ . Вследствие этого расчеты на другие условия, значительно отличающиеся от исследуемых, часто давали результаты, не совпадающие с фактическими. Например, на глубине зоны скалывания показатель степени при  $h$  в функции  $P = f h$  значительно меньше (часто показатель  $n < 1$ ), чем для глубины больше критической [9].

С учетом выделения трех зон резания структура формулы для определения сил резания приобретает вид:

$$P = P_{ск} + P_{ср} + P_{сж},$$

где  $P_{сж}, P_{ср}, P_{ск}$  – усилия резания соответственно в зонах скалывания, бокового среза и уплотнения.

Такая структура формулы усилия резания справедлива как для разрезающих ножей, так и для ножей, работающих по принципу отделения стружки.

Учитывая, что

$$P = kS = k_{ск}S_{ск} + k_{ср}S_{ср} + k_{сжс}S_{сжс},$$

или

$$k = k_{ск} \frac{S_{ск}}{S} + k_{ср} \frac{S_{ср}}{S} + k_{сжс} \frac{S_{сжс}}{S},$$

где  $S, S_{ск}, S_{ср}, S_{сжс}$  – общая площадь поперечного сечения пласта, площади сечения в зонах скалывания, среза и уплотнения соответственно, м<sup>2</sup>;  $k, k_{ск}, k_{ср}, k_{сжс}$  – общие удельные сопротивления резанию, удельные сопротивления в зонах скалывания, среза и уплотнения соответственно.

Удельные усилия резания в каждой зоне зависят от ряда факторов:

$$k_{ск} = f(b, h_{ск}, \alpha, v, c),$$

$$k_{ср} = f_1(b, h_{ср}, \alpha, v, c).$$

При резании горизонтальным ножом с отделением пласта

$$k_{сжс} = f_2(h_{сжс}, v, c).$$

При резании вертикальным ножом

$$k_{сжс} = f_3(b, \alpha, \beta, v, c),$$

где  $b$  – ширина ножа;  $h_{ск}, h_{ср}, h_{сжс}$  – глубина скалывания, среза и уплотнения соответственно, м;  $\alpha$  и  $\beta$  – углы резания и заточки вертикального ножа;  $v$  – скорость резания, м/с;  $c$  – характеристика почвенных условий по числу ударов ДорНИИ.

Одним из важных факторов, влияющих на удельное сопротивление резания, является глубина резания  $h$ . Анализ кривой удельного сопротивления  $K = f(h)$  показывает (рис. 3), что можно выделить три характерные зоны изменения удельных сопротивлений. Для глубины резания до 3...5 см (I зона) характерно интенсивное уменьшение  $K$ . При дальнейшем увеличении глубины резания до значения  $h_{опт}$ , соответствующего минимальному значению  $K$  (II зона), удельное усилие снижается относительно медленно. При  $h > h_{опт}$  (III зона) удельное усилие начинает возрастать.

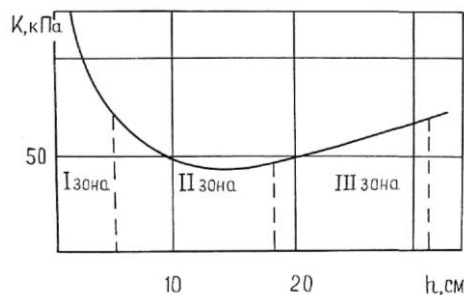


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления резания  $K$  от глубины  $h$  (почва – суглинок)

Для объяснения закономерностей изменения суммарного удельного сопротивления резанию от глубины рассмотрим отдельные составляющие удельного усилия резания и характер их изменения от толщины среза. Такое рассмотрение позволяет вскрыть физическую сущность влияния различных факторов на зависимость  $K = f(h)$ . При резании почвы горизонтальным ножом усилие состоит из усилия резания лезвием  $P_1$ , преодоления сопротивления деформации  $P_2$  и подъема пласта передней поверхностью лезвия  $P_3$ .

Сопротивление горизонтальному подрезанию пласта лезвием зависит от глубины резания. Однако для острых лезвий глубина, при которой усилие резания практически остается постоянным, равна 3...5 см. В связи с этим принимаем  $P_1 = Kb$  (где  $K$  – удельная сила горизонтального подрезания лезвием). Сила  $P_2$ , связанная с деформацией пласта передней поверхностью ножа, равна  $P_2 = \frac{N \sin(\alpha + \varphi)}{\cos \varphi}$ .

Учитывая, что

$$N = \frac{\sigma_{\max} bh}{(n+1) \sin \alpha} \text{ и } \sigma_{\max} = C_1 h^n,$$

где  $\sigma_{\max}$  – нормальные напряжения у режущей кромки, Па;  $C_1$  – коэффициент;  $n$  – показатель степени, зависящий от параметров и режимов резания, имеем

$$P_2 = \frac{C_1 b h^{n+1} \sin(\alpha + \varphi)}{(n+1) \sin \alpha \cos \varphi},$$

принимая

$$C_p = \frac{C_1 \sin(\alpha + \varphi)}{(n+1) \sin \alpha \cos \varphi},$$

получаем

$$P_2 = C_p b h^{n+1}.$$

Усилие на подъем почвы  $P_3$  определяется ее весом с учетом сил трения:

$$P_3 = G \operatorname{tg}(\alpha + \varphi).$$

Вес почвы  $G$  может быть выражен через объемный вес  $\gamma_n$  и объем, поднимающейся по ножу, почвы. При высоте подъема почвы  $H$

$$G = \frac{\gamma_n b h H}{\sin \alpha}.$$

Подставляя значение  $G$  в выражение для  $P_3$ , находим

$$P_3 = \frac{\gamma_n b h^2}{\sin \alpha} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi).$$

Таким образом, суммарное усилие горизонтального ножа равно

$$P = K_1 b + C_p b h^{n+1} + \frac{\gamma_n b h^2}{\sin \alpha} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi). \quad (1)$$

Формула (1), написанная в развернутом виде, дает представление о составных элементах усилия резания и позволяет выяснить их влияние на суммарное усилие.

Суммарное удельное сопротивление резанию на основе его составляющих имеет вид:

$$K = \frac{K_1}{h} + C_p h^n + \frac{\gamma_n h}{\sin \alpha} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi). \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что удельное сопротивление зависит от изменения каждой удельной составляющей усилия резания и их соотношений в суммарном удельном усилии. Удельная составляющая горизонтального подрезания почвы лезвием является убывающей функцией глубины резания. В то же время удельные составляющие силы, обусловленные деформацией и подъемом почвы передней поверхностью ножа, представляют собой возрастающие функции глубины.

При резании горизонтальным ножом отвала с острым лезвием усилие, связанное с подъемом пласта в суммарном усилии резания, имеет малый удельный вес и при практических расчетах его можно не учитывать. Тогда формула (1) примет вид:

$$P = K_1 b + K_{ck} b h^{n+1}.$$

Значения  $n$ , полученные по данным лабораторно-полевых исследований, составляют 1,1...1,3 для минеральной почвы; 0,77...0,36 – для торфяной почвы. Эти данные хорошо согласуются с исследованиями Ю.А. Ветрова [11], проведенными на плотных почвах. По его данным показатель степени при глубине резания  $h$  колеблется в пределах 1,28...0,75 при изменении ширины среза от 0 до бесконечности при глубине резания 5...15 см.

Показатель степени  $n < 1$  указывает на то, что сила резания торфяных почв горизонтальным ножом увеличивается медленнее, чем глубина резания, а удельное сопротивление с увеличением глубины

уменьшается. Это происходит вследствие снижения как усилия резания лезвием, так и сопротивления сжатию торфяной почвы с ростом глубины. При резании минеральной почвы сила резания, наоборот, растет быстрее глубины ( $n > 1$ ), а следовательно, удельное сопротивление также растет с увеличением глубины резания.

**Обоснование видов обработки почвы.** Среди названных выше направлений устранения переуплотнения почвы особого внимания заслуживают агро- и культуртехнические приемы механического разуплотнения подпахотных горизонтов, такие как глубокое рыхление и щелевание переуплотненной почвы.

Эффективность этих приемов достигается благодаря снижению плотности, повышению аккумуляющей способности и лучшему перераспределению влаги в почвенном профиле и отдаче от внесенных удобрений. Так, по данным ЦНИИМЭХС и БелНИИПА глубокое рыхление почвы обеспечило прибавку урожая: картофеля в 20...55 ц/га; кормовой свеклы – 34...123 ц/га; кукурузы (зеленой массы) – 50...65 ц/га; овсяно-гороховой смеси (зеленой массы) – 105 ц/га. Щелевание на лугах способствовало повышению их продуктивности на 30 %. Максимальный экономический эффект дало щелевание осенью зяби под картофель [6]. Важным преимуществом этих приемов является увеличенный срок их последствий. Положительное действие щелевания, в отличие от других мероприятий, сохраняется в течение от 1 до 3 лет, а глубокого рыхления – от 2 до 5 лет [7].

Однако глубокое рыхление и щелевание как отдельные операции приводят к увеличению энергетических затрат. Проблема создания упрочненных режущих элементов рабочих органов почвообрабатывающих машин нужной формы и оптимальных размеров с учетом их взаимодействия с почвой в условиях абразивного изнашивания является актуальной [10].

Форма и размеры рабочих органов при их работе изменяются. Упрочнение одной из рабочих поверхностей сдерживает образование затылочной фаски и позволяет получить эффект самозатачивания, который заключается в выборочном изнашивании преимущественно основного металла. В качестве упрочняющих процессов применяют объемную закалку и различные виды наплавки твердых сплавов (в том числе индукционную, лазерную и намораживанием).

**Выводы.** Предложена методика расчета усилий резания различных видов почвы. Для разуплотнения пахотных и подпахотных слоев почвы эффективно глубокое рыхление и щелевание с помощью упрочненных рыхлителей и рыхлителей-щелевателей. Геометрия режущих элементов рабочих органов почвообрабатывающих машин находится в тесной взаимосвязи с процессами взаимодействия их с почвой. По нашему мнению, эти агротехнические приемы при возделывании сельскохозяйственных культур следует использовать более широко.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Депрессия урожая сельскохозяйственных культур при уплотнении почвы и приемы ее снижения / А.И. Пупонин [и др.] // Сб. науч., тр. ВИМ. – М., 1988. – Т. 118. – С. 124 – 127.
2. Русанов, В.А. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения / В.А. Русанов. – М.: ВИМ, 1998. – 367 с.
3. Ротационные почвообрабатывающие машины / Е.П. Яцук [и др.]. – М.: Машиностроение, 1971. – 256 с.
4. Ходовая система – почва – урожай / И.П. Ксеневич [и др.]. – М.: Агропромиздат, 1985. – 304 с.
5. Машины для земляных работ / Н.А. Зеленин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1975. – 320 с.
6. Глубокое рыхление и щелевание эродлируемых, уплотненных и временно переувлажненных почв: рекомендации / сост. Р.Л. Турецкий [и др.]. – Минск: ЦНИИМЭСХ, 1988. – 125 с.
7. Алеев, Б.А. Технологии и техника для глубокого рыхления переуплотненных почв / Б.А. Алеев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. – № 2. – С. 7 – 10.
8. Азаренко, В.В. Почвообработка активными орудиями: моногр. / В.В. Азаренко. – Минск, 2005. – 179 с.
9. Турецкий, Р.Л. Механизм процесса резания грунта и структурные формулы усилия резания: сб. науч. тр. / Р.Л. Турецкий; ЦНИИМЭСХ. – Минск, 1976. – Вып. 13. – С. 190 – 206.
10. Закономерность изменения геометрии режущих элементов рабочих органов почвообрабатывающих машин в процессах взаимодействия их с почвой / М.И. Черновол [и др.] / LUCRARI STIINTIFICE VOLUMUL 21: Inginerie agrara si transport auto – Chisinau: UASM, 2008. – С. 10 – 16.
11. Ветров, Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами / Ю.А. Ветров. – М.: Машиностроение, 1971. – 360 с.

Поступила 17.11.2008