

МЕХАΝІЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА

УДК 631.431.7

А. Н. ОРДА¹, В. А. ШКЛЯРЕВИЧ¹, А. С. ВОРОБЕЙ²

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОБИЛЬНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ НА ПРОЦЕСС СЛЕДОБРАЗОВАНИЯ

¹ Белорусский государственный аграрный технический университет,
Минск, Республика Беларусь, e-mail: Ordaan@tut.by

² Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства,
Минск, Республика Беларусь

(Поступила в редакцию 20.06.2013)

При многократном воздействии ходовых систем и рабочих органов мобильной сельскохозяйственной техники в почве образуются различные по своим физико-механическим свойствам почвенные слои. Высота верхнего (пахотного) слоя почвы равняется глубине обработки и, как правило, составляет 20–30 см. Под рыхлым верхним слоем расположен более плотный слой почвы, называемый различными исследователями по данной тематике «подстилающее основание» либо «плужная подошва». Этот слой отличается от верхнего слоя почвы значительно большей плотностью. В процессе движения мобильной сельскохозяйственной техники по поверхности поля деформации в почве под ее движителями в зависимости от свойств почвы и режимов эксплуатации могут достигать подстилающего основания. Формирующееся при этом ядро уплотнения, достигнув своего предельного состояния, после контакта с подстилающим основанием разрушается с образованием переуплотненных почвенных глыб, что приводит к ухудшению условий прорастания и роста сельскохозяйственных культур и в конечном итоге к снижению их урожайности, а также к увеличению затрат на последующую обработку почвы. Поэтому для обоснования допустимого уплотняющего воздействия ходовых систем на почву определим критические значения глубины следа и напряжений, при которых начинается разрушение ядра уплотнения почвы, в зависимости от режимов эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники, выраженных через коэффициент сцепления движителя с почвой, нормальные и касательные напряжения в почве.

Цель работы – определение критических значений глубины следа и напряжений в почве под воздействием ходовых систем при различных режимах эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники.

При воздействии движителя мобильной сельскохозяйственной техники на почву с увеличением нагрузки осадка почвы растет не только из-за ее уплотнения (фаза уплотнения), но и в результате выдавливания частиц почвы из-под движителя (фаза сдвигов) с образованием валов выпирания [1, с. 118]. В конце фазы уплотнения (в начале фазы сдвигов) непосредственно под движителем начинает формироваться ядро уплотнения почвы, имеющее форму конуса, основанием которого служит опорная поверхность движителя, оно в дальнейшем и выдавливает почву в стороны, обуславливая тем самым значительные осадки движителя (рис. 1). Когда давление на почву под движителем достигает ее несущей способности, полностью сформировавшееся ядро внедряется в почвенный массив, при этом сжимающее усилие при дальнейшем погружении движителя в почву практически не увеличивается.

Образующееся в процессе воздействия движителя мобильной сельскохозяйственной техники на почву ядро уплотнения, достигнув подстилающего основания, встречает с его стороны сопро-

тивление и сжимается (рис. 2, а), при этом плотность почвы в ядре увеличивается, а участок подстилающего основания доуплотняется (рис. 2, б). Следует отметить, что плотность почвы в подстилающем основании составляет 1500–1700 кг/м³, а в сформированном ядре уплотнения находится в пределах 1350–1500 кг/м³ [2]. Поэтому при воздействии ядра уплотнения почвы на подстилающее основание напряжение в нем достигает предела прочности, соответствующего критической глубине следа $h_{кр}$, и происходит разрушение ядра уплотнения с образованием переуплотненных почвенных структурных макроагрегатов – глыб (рис. 2, в) [3]. Образовавшиеся глыбы плохо поддаются рыхлению, в результате чего повышается удельный вес крупных макроагрегатов в следе.

Рассмотрим деформацию почвы движителем мобильной сельскохозяйственной техники при его движении по поверхности поля со скоростью $\bar{v}$ (рис. 3, а) для случая рыхлого верхнего слоя почвы и плотного подстилающего основания (плужной подошвы). Выделим элементарный кубик в рыхлом верхнем слое почвы, расположенный под опорной поверхностью движителя (рис. 3, б). Под действием вертикальной нагрузки G , с одной стороны, и реакции плотного подстилающего основания на данную нагрузку, с другой стороны, на его горизонтальных площадках (плоскость xOz) действует нормальное напряжение σ_y . От действия касательной силы тяги F_k , развиваемой движителем, в горизонтальной плоскости на площадках xOz возникают касательные напряжения τ_{yx} , вызывающие сдвиг почвы (рис. 3, б).

Условие предельного напряженного состояния почвы определяется соотношением между наибольшим касательным напряжением τ и нормальной составляющей напряжения σ и имеет вид нелинейной зависимости Мора [4, с. 39, ф. 1.47]:

$$\tau = f(\sigma). \quad (1)$$

Графически условие предельного напряженного состояния, выраженное зависимостью (1), отображается предельной кривой, которую для связной почвы и с учетом того, что для нашего случая (см. рис. 3) напряжением сдвига является касательное напряжение τ_{yx} , а нормальным сжимающим напряжением – σ_y , можно аппроксимировать следующей функцией [4, с. 40, ф. 1.48]:

$$\tau_{yx} = \sigma_y \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (2)$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент трения; φ – угол трения, град.; c – сцепление, определяемое прочностью внутренних связей между отдельными частицами и их агрегатами, кПа.

Из [5, с. 234, ф. 4.16] известно, что коэффициент сцепления $\varphi_{сц}$ равен

$$\varphi_{сц} = \operatorname{tg} \varphi + \frac{c}{\sigma_y}. \quad (3)$$

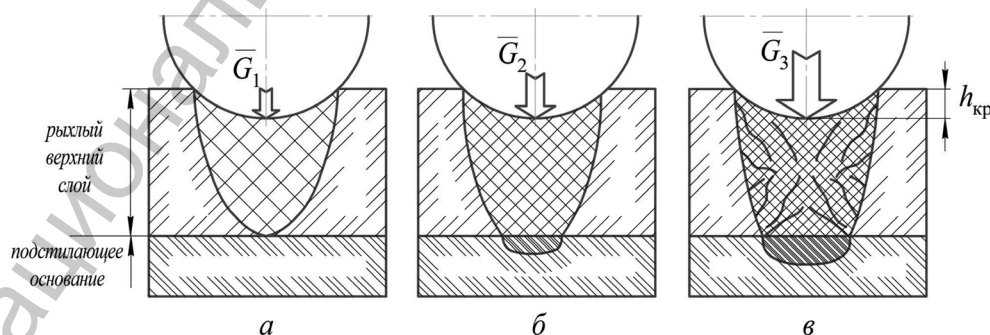


Рис. 2. Схема формирования и разрушения ядра уплотнения в почве под движителем при наличии плотного подстилающего основания: а – касание ядра уплотнения подстилающего основания; б – доуплотнение ядра уплотнения; в – разрушение ядра уплотнения

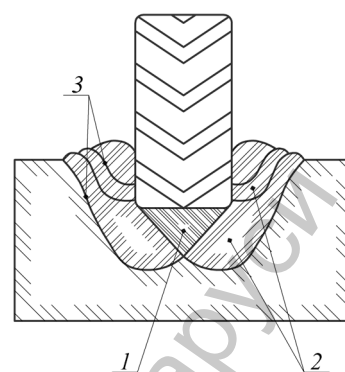


Рис. 1. Схема образования ядра уплотнения в почве под движителем мобильной сельскохозяйственной техники: 1 – ядро уплотнения почвы; 2 – зоны сдвига; 3 – площадки скольжения

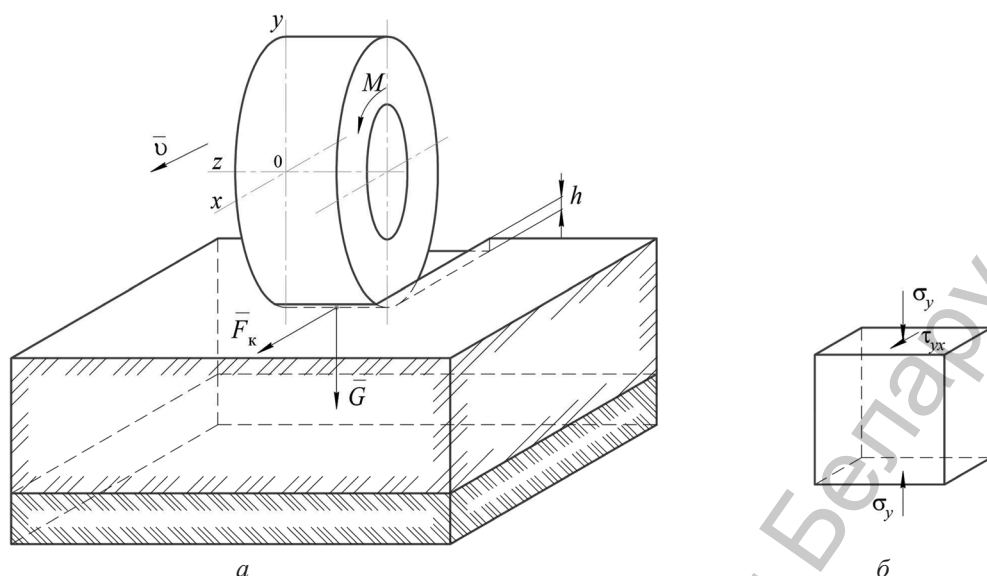


Рис. 3. Схема взаимодействия двигателя мобильной сельскохозяйственной техники с почвой (а) и напряженного состояния в почве под двигателем (б)

Из зависимости (3) выражаем нормальное сжимающее напряжение σ_y :

$$\sigma_y = \frac{c}{\varphi_{\text{сц}} - \text{tg}\varphi}. \quad (4)$$

Рассмотрим случай, когда $c = 0$ (несвязная почва). Тогда зависимость (4) примет следующий вид:

$$\sigma_y(\varphi_{\text{сц}} - \text{tg}\varphi) = 0. \quad (5)$$

Так как нормальное сжимающее напряжение не может быть равно нулю, следовательно, нулю равняется разница коэффициентов сцепления и трения, т. е.

$$\varphi_{\text{сц}} - \text{tg}\varphi = 0. \quad (6)$$

Из зависимости (2) выразим нормальное сжимающее напряжение:

$$\sigma_y = \frac{\tau_{yx} - c}{\text{tg}\varphi}. \quad (7)$$

На основании уравнения (7) построим зависимость нормального напряжения от связности почвы при различных значениях касательного напряжения.

Анализ графической зависимости (рис. 4) показывает, что с увеличением сцепления почвы с предельное нормальное напряжение σ_y снижается.

Нормальное напряжение в контакте двигателя с почвой при наличии рыхлого верхнего слоя и твердого подстилающего основания определяем по формуле [2, с. 7]:

$$\sigma = \frac{2h_{\text{упл}}k_0}{\pi} \text{tg}\left(\frac{\pi}{2} \frac{h}{h_{\text{упл}}}\right), \quad (8)$$

где h – глубина следа (осадка почвы), м; k_0 – коэффициент объемного смятия почвы, кН/м³; $h_{\text{упл}}$ – предельная величина уплотнения почвы деформатором, м [2, с. 7]:

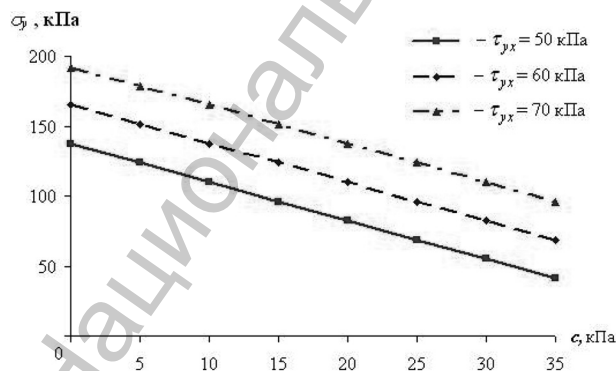


Рис. 4. Зависимость нормального напряжения от связности почвы при различных значениях касательного напряжения

$$h_{\text{упл}} = H \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min}}{(1 + \varepsilon_0)[1 - 2\nu(1 + \varepsilon_{\min})]}. \quad (9)$$

Здесь H – высота пахотного слоя, м; ε_0 – коэффициент пористости почвы до нагружения; $\varepsilon_{\min}$ – минимально возможный коэффициент пористости почвы; ν – коэффициент бокового расширения почвы для случая деформирования с ограниченной возможностью расширения.

Поскольку левые части зависимостей (4) и (8) равны ($\sigma_y = \sigma$), приравняем правые:

$$\frac{c}{\varphi_{\text{сц}} - \text{tg}\varphi} = \frac{2h_{\text{упл}}k_0}{\pi} \text{tg}\left(\frac{\pi}{2} \frac{h}{h_{\text{упл}}}\right). \quad (10)$$

Так как левая часть уравнения (10) соответствует предельному напряженному состоянию при сдвиге почвы, то глубина следа h равна глубине следа $h_{\text{ср}}$, при которой происходит срез «почвенных кирпичей» почвозацепами движителя. Решим уравнение (10) относительно h с учетом того, что $h = h_{\text{ср}}$:

$$h_{\text{ср}} = \frac{2h_{\text{упл}}}{\pi} \arctg\left(\frac{\pi c}{2h_{\text{упл}}k_0(\varphi_{\text{сц}} - \text{tg}\varphi)}\right). \quad (11)$$

Глубина следа $h_{\text{ср}}$, определяемая по зависимости (11), соответствует такой глубине следа, при которой происходит срез и разрушение почвы почвозацепами движителей мобильной сельскохозяйственной техники.

На основании полученного уравнения (11) нами построена графическая зависимость глубины следа $h_{\text{ср}}$ от коэффициента объемного смятия дерново-подзолистой почвы при значениях коэффициента сцепления от 0,4 до 0,8 (рис. 5). При расчетах принимались следующие значения параметров и коэффициентов почвы: $H = 0,25$ м; $\varepsilon_0 = 1,1$; $\varepsilon_{\min} = 0,33$; $\nu = 0,2$; $c = 20$ кПа; $\varphi = 20^\circ$ ($\text{tg}\varphi = 0,364$). При этом, согласно зависимости (9), $h_{\text{упл}} = 0,2$ м.

Так, на рис. 5 видно, что с ростом коэффициента объемного смятия почвы k_0 , отражающего основные физико-механические свойства почвы, величина глубины следа $h_{\text{ср}}$ уменьшается.

Условие предельного плоского напряженного состояния, выраженное через главные напряжения, записывается в виде [6]:

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha, \quad (12)$$

где σ_1 и σ_3 – главные напряжения; α – угол поворота главных площадок, град.

Произведем преобразования с учетом зависимостей (2) и (12), в результате получим условие предельного напряженного состояния в следующем виде [4]:

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2\sigma_c}, \quad (13)$$

где σ_c – внутреннее давление сжатия в почве (давление связности).

Допустим, что для некоторого диапазона давлений главное напряжение σ_3 является линейной функцией напряжения σ_1 . Тогда можно записать

$$\sigma_3 = \beta_d \sigma_1 \quad (14)$$

(β_d – опытный коэффициент бокового давления почвы).

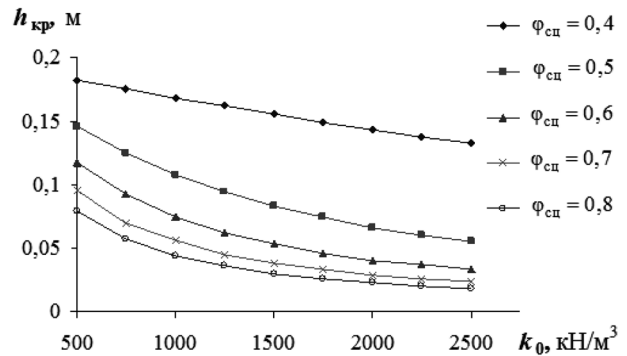


Рис. 5. Зависимость глубины следа при срезе почвы от коэффициента объемного смятия дерново-подзолистой почвы

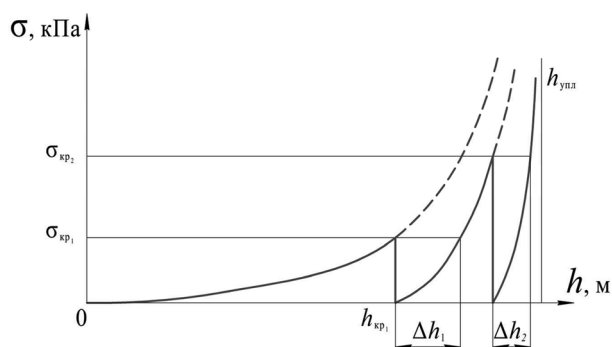


Рис. 6. Зависимость нормального сжимающего напряжения в контакте «двигатель–почва» от глубины осадки при наличии плотного подстилающего основания

Подставив в уравнение (13) значение σ_3 , получаем условие предельного напряженного состояния в следующем виде:

$$\sigma_1 = \frac{2\sigma_c \sin \varphi}{1 - \beta_d - \sin \varphi - \beta_d \sin \varphi}. \quad (15)$$

Выражение (15) позволяет определить критическое напряжение, при достижении которого в некоторой точке почвенного массива ядро уплотнения начнет разрушаться. Данное напряжение зависит от свойств почвы.

Решив совместно уравнения (8) и (15) относительно h , получаем критическую глубину следа $h_{кр1}$ при проходе движителя по поверхности почвы:

$$h_{кр1} = - \frac{\arctg \left[\frac{2\sigma_c b \sin \varphi}{a(\beta_d + \beta_d \sin \varphi + \sin \varphi - 1)} \right]}{ab} \quad (16)$$

(a, b – почвенные коэффициенты [2]).

Глубина $h_{кр1}$ соответствует такой глубине следа при проходе движителя, когда напряжение в почве достигает критического значения $\sigma_{кр1}$ и начинается разрушение ядра уплотнения. В процессе разрушения ядра уплотнения происходит мгновенное снижение напряжения в уплотняемом слое практически до нуля с последующим его нарастанием до некоторой величины $\sigma_{кр2}$ (рис. 6), при этом из-за изменившихся свойств почвы $\sigma_{кр2} > \sigma_{кр1}$. Далее происходит разрушение вновь образовавшегося ядра, пока нормальное сжимающее напряжение почвы, создаваемое ходовой системой, не окажется меньше критического напряжения $\sigma_{крn}$ при n -м разрушении ядра уплотнения.

В каждом из циклов разрушения происходит дополнительная осадка почвы на величину Δh_n (см. рис. 6), где $n = (1, 2, \dots, N)$ соответствует порядковому номеру цикла разрушения.

Таким образом, графическая зависимость нормального сжимающего напряжения от глубины осадки почвы (см. рис. 6) имеет «пилообразный» характер, аналогичный зависимости накопления повторных осадок при многократном нагружении почвы движителями мобильной сельскохозяйственной техники [2]. В дальнейших исследованиях зависимость критической глубины следа (16) может быть использована для определения плотности почвы при воздействии ходовых систем сельскохозяйственных машин.

Выводы

1. На основании теории предельного напряженного состояния при сдвиге почвы получена зависимость глубины следа, при которой происходит срез и разрушение почвы под движителем, от механических свойств почвы при различных режимах эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники, выраженные через коэффициент сцепления движителя с почвой.
2. Согласно теории предельного плоского напряженного состояния почвы, получена зависимость, позволяющая определить глубину следа, при которой начинается разрушение ядра уплотнения почвы при наличии рыхлого верхнего слоя почвы и плотного подстилающего основания. Величина критической глубины следа может служить в качестве критерия при обосновании параметров ходовых систем и режимов работы мобильной сельскохозяйственной техники.

Литература

1. Цытович, Н. А. Механика грунтов. Краткий курс: учебник / Н. А. Цытович. – 6-е изд. – М.: Либроком, 2011. – 272 с.
2. Орда, А. Н. Эколого-энергетические основы формирования машинно-тракторных агрегатов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03 / А. Н. Орда; Белорус. аграр. техн. ун-т. – Минск, 1997. – 36 с.

3. Орда, А. Н. Оценка воздействия на почву ходовых систем и рабочих органов почвообрабатывающих машинно-тракторных агрегатов / А. Н. Орда, Н. А. Гирейко, А. Б. Селеша // Агропанорама. – 2006. – № 2. – С. 6–9.
4. Скотников, В. А. Основы теории проходимости гусеничных мелиоративных тракторов / В. А. Скотников, А. Е. Тетеркин. – Минск: Высшая школа, 1973. – 256 с.
5. Скотников, В. А. Проходимость машин / В. А. Скотников, А. В. Пономарев, А. В. Климанов. – Минск: Наука и техника, 1982. – 328 с.
6. Подскребко, М. Д. Сопротивление материалов: учебник / М. Д. Подскребко. – Минск: Высшая школа, 2007. – 797 с.

A. N. ORDA, V. A. SHKLYAREVICH, A. S. VOROBEL

**INFLUENCE OF THE MODES OF OPERATION
OF AGRICULTURAL MACHINERY ON TRACE FORMING**

Summary

The article considers the processes happening in the course of forming a bulb of pressure under the influence of running systems of mobile agricultural machinery. The mathematical models enabling to identify the trace depth depending on various soil conditions at different modes of operation of mobile agricultural machinery are made.