

хозяйство) / Минсельхозпрод Республики Беларусь: под общ. рук. Л.В. Русака. — Минск, 2004. — 1 т.

2 Государственная программа возрождения и развития села на 2005-2010 годы. — Мн.: «Беларусь», 2005. — 96 с.

3 Черник, Г.В. Механизация свиноводческих ферм и комплексов / Г.В. Черник, Л.Г. Хоцко, Л.П. Горшкова. — Л.: Колос. Ленингр. отд-ние, 1981. — 167 с.

4 Рекламный проспект фирмы Bigdutchman [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.bigdutchman.de/bd_infos/produkte/HydroJet-dt.pdf — Дата доступа 26.06.2006.

5 Павловский, В.А. Из опыта производства свинины в Германии / В.А. Павловский, И.И. Гируцкий // Агроранорама — 1998. — № 3. — С. 24-26.

6 Рекламные проспекты фирмы Weda [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.weda.de/load_suvorlage.asp/ID=123480. — Дата доступа 26.06.2006.

7 Рекламные проспекты фирмы Fancor [Электрон-

ный ресурс]. — Режим доступа: http://www.fancor.com/_internet/pages/concepten.php taalCode=UK&nID=3&pID=56&cID=245&rID=245&conceptID=61. — Дата доступа 26.06.2006.

8 Калюга, В.В. Механизация технологических процессов на свиноводческих предприятиях / В.В. Калюга, С.В. Мельников, В.К. Найденко. — М.: Россельхозиздат, 1987. — 208 с.

9 Павловский, В.А. Анализ влияния способов кормления на привесы животных / В.А. Павловский // Агроранорама, 2003. — № 6. — С. 9-13.

10 Карасев, Б.В. Основы гидравлики сельскохозяйственного водоснабжения и канализации / Б.В. Карасев, В.И. Дечев. — Минск: ВШ, 1976. — 368 с.

11 Боровиков, В.П. STATISTICA — Статистический анализ и обработка данных в среде Windows / В.П. Боровиков, И.П. Боровиков. — М.: Информационно-издательский дом «Филинь», 1998. — 608 с.

УДК 631.31

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 9.09. 2006

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПОЧВУ ХОДОВЫХ СИСТЕМ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

А.Н. Орда, докт. техн. наук, доцент, Н.А. Гирейко, инженер (УО БГАТУ)

Аннотация

Рассматриваются вопросы воздействия на почву ходовых систем почвообрабатывающих агрегатов. Уделяется внимание образованию и разрушению ядра уплотнения под колесом МТА. Приводится вывод зависимости для определения глубины колеи на почвах с рыхлым верхним слоем и твердым подстилающим основанием. При этом учитываются процессы образования и разрушения ядра уплотнения. В статье приводятся также результаты лабораторных исследований по влиянию влажности и высоты уплотняемого слоя на распределение напряжений при воздействии на почву колесных ходовых систем. Приведена трехфакторная квадратичная модель, полученная в результате обработки опытных данных.

Введение

При воздействии на почву колесом с увеличением нагрузки осадка растёт не только из-за уплотнения, но и в результате выдавливания частиц из-под деформатора. Сжатие сопровождается образованием уплотненной зоны, имеющей форму конуса, основанием которого служит опорная поверхность колеса. Можно предположить, что в определенных условиях напряжения в уплотненной зоне могут превысить критические и произойдет ее разрушение, которое будет сопровождаться образованием пересуплотненных почвенных макроагрегатов и дополнительной осадкой колеса, что нежелательно, особенно при предпосевной обработке почвы и посеве.

Рассмотрим деформацию почвы движителем ходо-

вой системы для случая рыхлого верхнего слоя почвы и плотного подстилающего основания при плоском напряженном состоянии.

Условие предельного напряженного состояния определяется соотношением между наибольшим касательным напряжением τ и нормальной составляющей напряжения σ_n . В общем случае оно имеет вид нелинейной зависимости Мора.

$$\tau = f(\sigma_n).$$

В соответствии с общей теорией напряжений на элементарный кубик почвы действуют главные напряжения $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. При этом значение τ определяется только напряжениями σ_1 и σ_3 и не зависит от напряжения σ_2 (рис. 1).

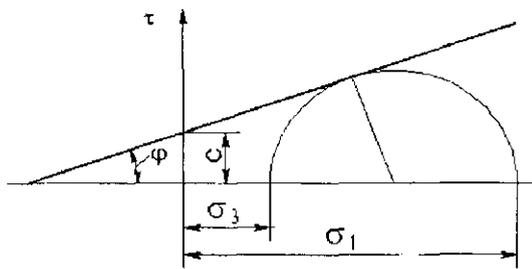


Рис. 1. Определение предельного состояния при помощи круга Мора

Условие предельного состояния аппроксимируется предельной кривой, которую для почвы можно аппроксимировать функцией

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + c,$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ — коэффициент трения;

c — сцепление, определяемое прочностью внутренних связей между отдельными частицами и их агрегатами, Па.

Условие предельного напряженного состояния [1]

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2\sigma_c}, \quad (1)$$

где σ_c — внутреннее давление сжатия в грунте (давление связности), Па.

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

$$\sigma_3 = \beta_0 \sigma_1,$$

где β_0 — опытный коэффициент бокового давления.

Подставив в уравнение (1) полученное значение σ_3 и выразив σ_1 , получаем условие предельного напряженного состояния в виде

$$\sigma_1 = \frac{2\sigma_c \sin \varphi}{1 - \beta_0 - \sin \varphi - \beta_0 \sin \varphi}. \quad (2)$$

Уравнение (2) позволяет определить критическое напряжение, при достижении которого в некоторой точке почвенного массива начнется его разрушение. Напряжение σ_1 зависит от свойств почвы.

Давление в контакте колеса с почвой при наличии рыхлого верхнего слоя и твердого подстилающего основания определяем по формуле [2]

$$\sigma = \frac{a}{b} \operatorname{tg}(abh), \quad (3)$$

где h — глубина следа (осадка почвы), м;

$$a, b \text{ — коэффициенты: } a = \sqrt{k_0}, \quad b = \frac{\pi}{2} \frac{1}{h_{yml} \sqrt{k_0}};$$

k_0 — коэффициент объемного смятия почвы, кг/м³;

h_{yml} — предельная величина деформации, м;

$$h_{yml} = H \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{min}}{(1 + \epsilon_0)[1 - 2\nu(1 + \epsilon_{min})]};$$

H — высота пахотного слоя, м;

ϵ_0 — коэффициент пористости почвы до нагружения;

ϵ_{min} — минимально возможный коэффициент пористости почвы;

ν — коэффициент бокового расширения почвы для случая деформирования с ограниченной возможностью расширения.

С учетом (3), приняв $\sigma_1 = \sigma$ и решив выражение (2) относительно h , получаем критическую глубину следа $h_{кр}$

$$h_{кр} = \frac{\operatorname{arctg} \left[\frac{2\sigma_c b \sin \varphi}{a(\beta_0 + \beta_0 \sin \varphi + \sin \varphi - 1)} \right]}{ab}. \quad (4)$$

Глубина $h_{кр}$ соответствует такой глубине следа, при которой начинается разрушение ядра уплотнения, т.е. напряжение достигает некоторого критического значения $\sigma_{кр}$. В процессе разрушения ядра уплотнения происходит мгновенное снижение напряжения в уплотняемом слое до нуля с последующим его нарастанием до некоторой величины $\sigma_{кр2}$. При этом из-за изменившихся свойств почвы $\sigma_{кр2} > \sigma_{кр}$. Далее происходит разрушение вновь образовавшегося ядра и так далее, пока напряжение σ , создаваемое ходовой системой, не окажется меньше критического напряжения $\sigma_{кр}$, т.е. пока выполняется условие

$$\sigma > \sigma_{кр},$$

где N — количество циклов разрушения.

В каждом из циклов разрушения происходит дополнительная осадка почвы на величину Δh_n (рис. 2), где n соответствует порядковому номеру цикла разрушения.

График имеет пилообразный характер, аналогичный графику для накопления повторных осадок при многократном нагружении. Почва в ядре уплотнения испытывает несколько циклов нагружения, число которых равно $N+1$. Таким образом, для последующих нагружений можно использовать зависимости накопления повторных осадок.

Коэффициент объемного смятия для n -го нагру-

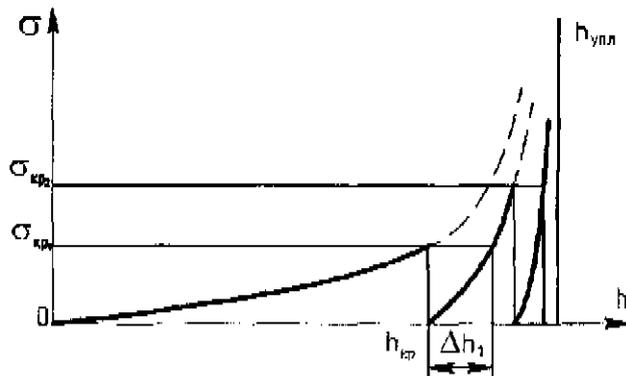


Рис. 2. Зависимость напряжения σ в контакте «движитель-почва» от глубины осадки h при наличии плотного подстилающего основания

жения определяем по зависимости [3]

$$k_n = \frac{k_0}{k_n \lg \frac{n}{n-1}}, \quad (5)$$

где k_0 — коэффициент объемного смятия почвы для первого нагружения, кН/м;

k_y — коэффициент интенсивности накопления повторных осадок, зависящий от типа почвы;

n — порядковый номер цикла нагружения.

Получено, что для n -го нагружения выражение (4) примет вид

$$h_{крn} = - \frac{\arctg \left[\frac{2\sigma_y b \sin \varphi_n}{a_n (\beta_{\partial n} + \beta_{\partial n} \sin \varphi_n + \sin \varphi_n - 1)} \right]}{a_n b_n}$$

Величина $h_{крn}$ соответствует осадке, которая должна произойти после первого цикла разрушения, для того, чтобы начался второй цикл разрушения. Плотность верхнего слоя почвы для описанных условий нагружения можно определить по формуле [3]

$$\rho_n = \rho_0 \frac{H}{H-h} + \frac{2vh}{H-h} + \frac{k_1 \sigma_0}{H-h} \left[(H-h) + \frac{1}{\beta} (e^{\mu(H-h)} - 1) \right], \quad (6)$$

где ρ_0 — исходная плотность почвы кг/м³;

v — коэффициент бокового расширения почвы для случая деформирования с ограниченной возможностью расширения;

β — коэффициент распределения напряжений, м⁻¹;

H — высота пахотного слоя, м.

Учитывая особенности деформации при повторных нагружениях (формулы (5), (6)), построим график изменения плотности почвы в ядре уплотнения при наличии плотного подстилающего основания (рис. 3).

С каждым новым циклом «уплотнение-разрушение» интенсивность увеличения плотности почвы уменьшается.

Для практического изучения процессов образования ядра уплотнения и подтверждения приведенной теории были проведены лабораторные эксперименты. Изучалось влияние влажности и высоты уплотняемого слоя на образование ядра уплотнения при воздействии на почву колесными ходовыми системами.

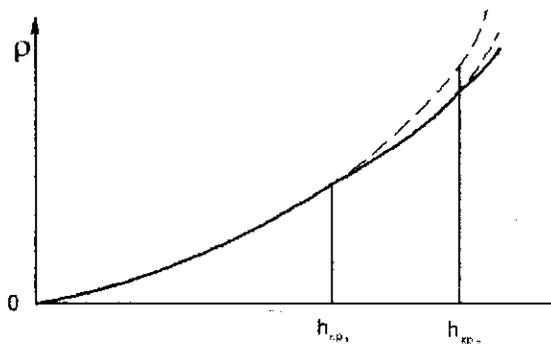


Рис. 3. Зависимость плотности почвы в ядре уплотнения от величины осадки при наличии плотного подстилающего основания

Исследования проводились в лабораторных условиях с помощью стенда для исследования взаимодействия колес и рабочих органов с почвой [4], который для этих целей был оборудован гидравлическими датчиками собственной конструкции [5].

В рамках исследований был проведен эксперимент, позволяющий изучить влияние таких факторов, как высота уплотняемого слоя, влажность, нагрузка на движитель на напряжения, возникающие в образующемся под колесом ядре уплотнения. Датчики нормального давления были установлены под колесом на фиксированной глубине (0,2 м), при этом варьировали нагрузкой на колесо, влажностью почвы и высотой слоя почвы в канале, а твердое основание почвенного канала моделировало плотный подстилающий слой почвы (плужную подошву).

Матрица планирования эксперимента представляет собой матрицу симметричного рототабельного композиционного равномер-плана [6].

В результате обработки экспериментальных данных было установлено, что для адекватного описания влияния изучаемых факторов нельзя использовать линейную модель. Была получена адекватная квадратичная модель, которая при натуральных значениях факторов имеет вид

$$y = 3,99 - 0,23x_1 + 1,09x_3 - 0,21x_1x_2 + 0,26x_1x_3 - 0,21x_2x_3 - 0,31x_3^2,$$

где y — избыточное давление в датчиках, соответствующее изменению высоты столба в жидкости в трубках, кПа;

x_1 — высота уплотняемого слоя, м;

x_2 — относительная влажность почвы, %;

x_3 — нагрузка на движитель, Н.

По полученной модели были построены изобары (рис. 4), где по вертикальной оси отложена нагрузка, действующая на колесо (H), а по горизонтальной — высота уплотняемого слоя (m).

Как видно из рисунка 4, с увеличением глубины уплотняемого слоя все более ярко выражается его способность гасить напряжения. Так, на глубине 0,2 м (глубина расположения датчиков в эксперименте) при такой же глубине уплотняемого слоя для получения избыточного давления в 1,6 кПа требуется нагрузить колесо нормальной нагрузкой в 120 Н, если же глубина уплотняемого слоя 0,4 м, то для получения указанного избыточного давления требуется нормальная нагрузка в 165 Н (выше на 37%). С увеличением нагрузок влияние глубины уплотняемого слоя ослабляется. Было выяснено также, что влияние глубины уплотняемого слоя уменьшается при уменьшении влажности почвы и, наоборот, увеличивается при увеличении влажности.

На рис. 4,б линия, соответствующая избыточному давлению 4,5 кПа при глубине подстилающего основания свыше 0,25 м, модель неадекватно описывает происходящие процессы (штриховая линия). Поведение графика показывает, что

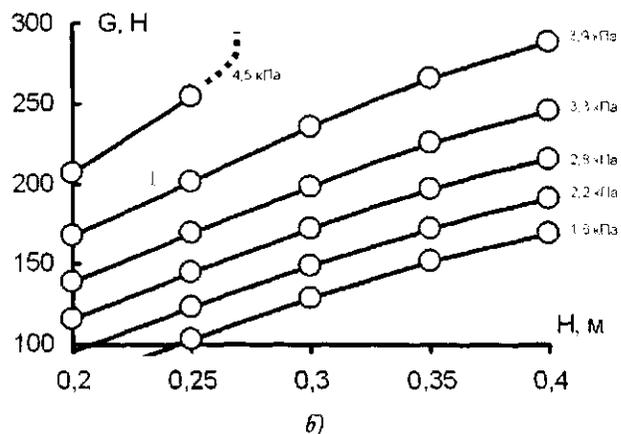
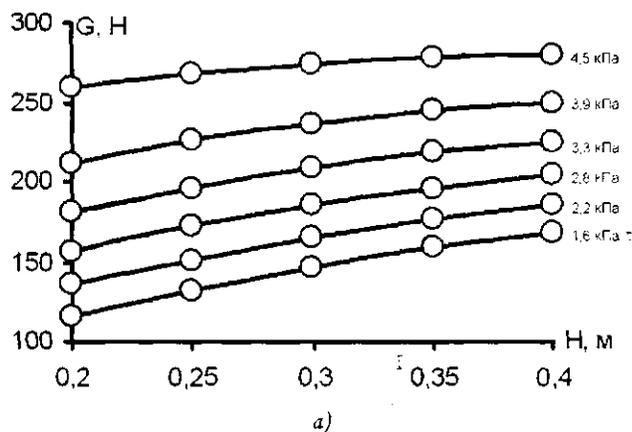


Рис. 4. Линии равного избыточного давления при влажности 15% (а) и 20,5% (б)

при глубине свыше 0,25 м практически невозможно получить избыточное давление свыше 4,5 кПа. Такое поведение графика объясняется тем, что в почве при заданной нагрузке под колесом полностью сформировалось ядро уплотнения. При этом нижняя часть ядра уплотнения не достигла подстилающего основания. Если продолжить нагружение колеса, то колесо вместе с полностью образовавшимся ядром будет погружаться в почвенный массив. При этом практически не будет увеличиваться напряжение в ядре. И только когда нижняя часть ядра достигнет поверхности подстилающего основания, ядро начнет сжиматься и напряжение в нем увеличиваться до тех пор, пока не достигнет своего предела прочности и не разрушится. Данное явление может наблюдаться и при меньшей влажности, но тогда понадобятся значительно большие нагрузки. Так как со снижением влажности почвы увеличиваются предельные касательные напряжения, то высота образованного ядра уплотнения также будет больше, и поэтому понадобится большая высота уплотняемого слоя.

Выводы

На почвах с рыхлым верхним слоем и твердым подстилающим основанием движение почвообрабатывающих агрегатов сопровождается образованием под движителем переуплотненного участка почвы в виде клина (ядра уплотнения), который при достижении в нем критического напряжения разрушается.

Разрушение сопровождается рядом негативных последствий:

- переуплотнением подстилающего основания;
- образованием переуплотненных почвенных макроагрегатов;
- дополнительным увеличением глубины следа.

В связи с этим необходимо ограничивать нагрузки на ходовые системы, исходя из критических напряжений разрушения ядра уплотнения.

Экспериментальное исследование показало, что верхний рыхлый слой почвы (свежая пахота, почва, подготовленная под посев) обладает способностью поглощать напряжения, что в большей степени проявляется с увеличением глубины верхнего рыхлого слоя и с увеличением влажности, а также при относительно низких нагрузках. При влажности более 20% и высоте верхнего рыхлого слоя более 0,25 м в условиях почвенного канала можно наблюдать полный цикл формирования ядра уплотнения.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Скотников, В.А. Основы теории проходимости гусеничных мелиоративных тракторов / В.А. Скотников, А.Е. Тетеркин. – Мн.: Высшая школа, 1973. – 256 с.
- 2 Обоснование зависимости между сжимающими напряжениями и осадкой почвы. / В. Бойков, Ч. Жданович, А. Орда // Ecological aspects of mechanization of fertilizers application plant protection, soil tillage and crop harvesting. Варшава, 1998. – С. 161-168.
- 3 Орда, А.Н. Эколого-энергетические основы формирования машинно-тракторных агрегатов // Дисс. на соиск. уч. степени д.т.н. – Мн.: 1997.
- 4 Гирейко, Н.А. Особенности взаимодействия с почвой комбинированного машинно-тракторного агрегата для предпосевной обработки // Агропанорама. – 2005 – №4 – С. 23-27.
- 5 Стенд для исследования взаимодействия колес с почвой. / А.Н. Орда, В.А. Шкляревич, Н.А. Гирейко, А.А. Зенькович, С.В. Алешкевич // Патент на полезную модель №1966 МПК G01M17/00, рег. 2005.02.15, бюлл. №2(45), 2005 г. – С. 309.
- 6 Новик, Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.