

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ОСЕЙ ХОДОВОЙ СИСТЕМЫ МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОЧВЫ

И. Н. Шило¹, Н. Н. Романюк¹, А. Н. Орда¹,
С. О. Нукешев², В. Г. Кушнир³, А. И. Попов⁴

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
г. Минск, Республика Беларусь, romanuk-nik@tut.by (1);*

*Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина,
г. Астана, Республика Казахстан (2);*

*Костанайский государственный университет им. А. Байтурсынова,
г. Костанай, Республика Казахстан (3);*

ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия (4)

Ключевые слова: деформация почвы; деформация сжатия; колесо; плотность; поглощение энергии; ходовая система.

Аннотация: На основании теории распространения и поглощения энергии получены зависимости плотности различных слоев почвы от оказываемого на нее давления. Рассмотрено влияние числа осей ходовой системы на изменение плотности почвы.

Применение энергонасыщенных тракторов, входящих в состав машинно-тракторных агрегатов (МТА), ограничивается высоким воздействием их движителей (деформаторов) на почву. Увеличение массы тракторов, многочисленные проходы МТА по полю приводят к чрезмерному уплотнению почвы, увеличению в 2-3 раза ее твердости и изменению физико-механических свойств. При многократном воздействии на почву идет накопление уплотнения как в пахотном, так и в подпахотном ее горизонтах. Плохая заделка семян из-за образовавшейся колеи, высокая плотность почвы по следам ходовых систем снижают биологический урожай сельскохозяйственных культур.

Кроме того, удельное сопротивление при обработке пахотного слоя после прохода тракторов повышается на 15 – 65 %, а транспортных средств и комбайнов – на 60 – 90 % [1 – 4].

Цель исследования: определить, как влияет число осей ходовой системы машинно-тракторных агрегатов на изменение плотности почвы, при условии сохранения постоянной общей нагрузки.

Материалы и методы. Характер и закономерности уплотнения почвы зависят как от исходного состояния почвенного массива, так и от размеров и режимов ее нагружения деформатором (движителем). При наличии взрыхленного слоя конечной толщины в расчетах, как правило, принимают, что уплотняется лишь этот слой.

Мобильная энергонасыщенная сельскохозяйственная техника уплотняет почву на глубину, превышающую пахотный слой. Высота уплотняемого слоя зависит от размеров ходовой системы и нагрузки, передаваемой на почву. Анализ механико-математических моделей почв показывает, что при расчете ее уплотне-

ния лучше всего подходит энергетический метод, учитывающий влияние закона поглощения энергии на изменение свойств почвы.

При распространении энергии в почвах происходит ее поглощение. В работе [5] предложена следующая зависимость распределения энергии J_x впереди деформатора

$$J_x = J_0 e^{-\beta_3 x}, \quad (1)$$

где J_0 – первоначальная энергия, Дж; β_3 – коэффициент поглощения энергии, м^{-1} ; x – расстояние от опорной поверхности деформатора до точки полупространства, энергия в которой равна J_x , м.

В зависимости от интенсивности поглощения потока энергии различными слоями почвы происходит изменение ее напряженного состояния, то есть в почве возникает градиент напряжения. Возникшие в почве напряжения являются обобщенными потенциалами. Изменение обобщенного потенциала (напряжения) вызывает изменение сопряженного с ним обобщенного заряда.

Экспериментально установлено, что при возникновении в почве градиента напряжения из всех физико-механических свойств ее наибольшему изменению подвергается плотность, поэтому ее можно принять в качестве обобщенного заряда.

Таким образом, увеличение плотности при воздействии колеса (двигателя, деформатора) на почву является функцией напряжения почвы

$$\rho = f(\sigma).$$

Продифференцируем данную зависимость

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} d\sigma.$$

Тогда получим

$$d\rho = k_1 d\sigma,$$

где $k_1 = \partial \rho / \partial \sigma$ – коэффициент уплотнения почвы, $\text{кг}/(\text{Н}\cdot\text{м})$, который можно рассматривать как скорость изменения плотности почвы с ростом напряжения.

Установим закономерность распределения напряжений по глубине. При деформировании почвы наряду с ее уплотнением имеет место и сдвиг (рис. 1). Зависимость между напряжением σ и деформацией h подчиняется функции гиперболического тангенса, при этом интенсивность роста напряжения отстает от деформации (рис. 2) [5]:

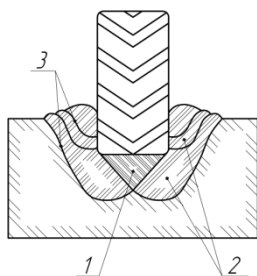


Рис. 1. Схема образования ядра уплотнения в почве под двигателем мобильной сельскохозяйственной техники:

1 – ядро уплотнения почвы; 2 – зоны сдвига;
3 – площадки скольжения

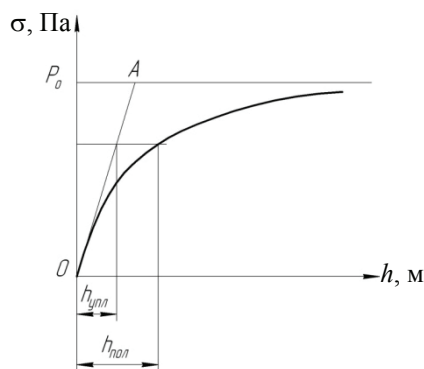


Рис. 2. Зависимость между напряжением и деформацией почвы

$$\sigma = P_0 \operatorname{th} \left(\frac{k}{P_0} h \right), \quad (2)$$

где P_0 – предел несущей способности почвы, Па; k – коэффициент объемного смятия почвы, Па/м.

Зависимость деформации сжатия (уплотнения) неограниченного полупространства почвы, имеющей одинаковые физико-механические свойства по глубине, от напряжения пропорциональна (см. рис. 2, прямая OA):

$$h_{\text{упл}} = \sigma/k. \quad (3)$$

Максимальная деформация уплотнения почвы каким-либо деформатором определяется отношением несущей способности к коэффициенту объемного смятия:

$$h_{\text{уплmax}} = P_0/k.$$

Затраченная (поглощенная) на уплотнение почвы удельная энергия $J_{\text{упл}}$ равна удельной работе, совершаемой деформатором при перемещении его на величину $h_{\text{упл}}$:

$$J_{\text{упл}} = \int_0^{\sigma_0} h_{\text{упл}}(\sigma) d\sigma = \int_0^{\sigma_0} \frac{\sigma}{k} d\sigma = \frac{\sigma_0^2}{2k},$$

где σ_0 – напряжение почвы в контакте с деформатором, Па.

На расстоянии x поглощенная энергия будет равна $\frac{\sigma_x^2}{2k}$. Подставив полученные выражения в уравнение (1), имеем

$$\frac{\sigma_x^2}{2k} = \frac{\sigma_0^2}{2k} e^{-\beta_3 x}.$$

Тогда

$$\sigma_x = \sigma_0 \sqrt{e^{-\beta_3 x}}$$

Преобразуем это уравнение к виду:

$$\sigma_x = \sigma_0 e^{-\beta_3 x/2}, \quad (4)$$

где β_3 – коэффициент распределения напряжений, м^{-1} .

Приращение плотности почвы $d\rho_x$ на участке dx пропорционально градиенту напряжения

$$d\rho_x = k_1 \psi_x dx,$$

где k_1 – коэффициент уплотнения, $\text{кг}/(\text{Н}\cdot\text{м})$; ψ_x – градиент напряжения, Па/м.

При изучении процесса поглощения почвой энергии [5] было принято следующее исходное уравнение

$$\psi_3 = -\beta_3 J,$$

где ψ_3 – удельная поглощенная энергия, Дж; J – поток энергии, Дж·м.

Принимаем, что градиент напряжения пропорционален действующему напряжению

$$\psi_x = -\beta \sigma_x.$$

Тогда приращение плотности определится как

$$d\rho_x = -k_1\beta\sigma_x dx .$$

Подставив зависимость (4) распределения напряжений по глубине в последнее уравнение, получим

$$d\rho_x = -k_1\beta\sigma_0 e^{-\beta x} dx . \quad (5)$$

Общий интеграл дифференциального уравнения (5)

$$\rho_x = k_1\sigma_0 e^{-\beta x} + C .$$

Постоянную интегрирования C находим из условия, что при $x=0$, $\rho = \rho_0$ (ρ_0 – плотность почвы у основания деформатора по окончании процесса деформирования).

$$C = \rho_0 - k_1\sigma_0 .$$

Частное решение дифференциального уравнения (5)

$$\rho_x = \rho_0 - k_1\sigma_0(1 - e^{-\beta x}) \quad (6)$$

представляет собой закон распределения плотности по глубине деформированного полупространства.

Коэффициенты распределения напряжений β и уплотнения почвы k_1 находятся на основании результатов экспериментальных данных по следующим формулам [6]:

$$\beta = \frac{1}{x} \ln \frac{\sigma_0}{\sigma_x} ; \quad (7)$$

$$k_1 = \frac{1}{\sigma_0} \frac{\rho_0 - \rho_x}{1 - e^{-\beta x}} . \quad (8)$$

Плотность верхнего слоя почвы ρ_0 при напряжении σ_0 найдем исходя из того, что при воздействии на нее деформатором уплотняется только эффективный слой, высота которого зависит от величины контактного напряжения и физико-механических свойств почвы. Из зависимости (4) находим высоту эффективного слоя почвы

$$x_h = \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_h} \right) . \quad (9)$$

Напряжение σ_h выбирается из условия развития в зоне его действия только упругих деформаций (отсутствия уплотнения почвы). Его значение обусловлено свойствами почвы и колеблется в пределах 5...20 кПа.

Плотность ρ_h на нижней границе эффективного слоя после деформации равна плотности почвы $\rho_{п}$, не подвергшейся воздействию.

Из уравнения (6) находим

$$\rho_0 = \rho_h + k_1\sigma_0(1 - e^{-\beta h}) . \quad (10)$$

Учитывая, что $\rho_h = \rho_{п}$, а значение x_h вычисляется по формуле (9)

$$\rho_0 = \rho_h + k_1\sigma_0 \left(1 - e^{-\ln(\sigma_0/\sigma_h)} \right) .$$

Поскольку

$$e^{-\ln(\sigma_0/\sigma_h)} = \frac{\sigma_h}{\sigma_0},$$

получим

$$\rho_0 = \rho_h + k_1\sigma_0 - k_1\sigma_h.$$

При отсутствии воздействия ($\sigma_0 = 0$) величина максимальной плотности ρ_0 равняется плотности почвы $\rho_{\text{п}}$. С учетом этого, член $k_1\sigma_h$ (наличие его обусловлено некоторым уплотнением почвы в зоне действия напряжения σ_h) в последнем уравнении должен равняться нулю. Величиной $k_1\sigma_h$ можно пренебречь, так как напряжение σ_h во много раз меньше σ_0 .

Оценим величину погрешности в связи с пренебрежением членом $k_1\sigma_h$. Проведенные исследования по уплотнению почвы показывают [6], что при воздействии на дерново-подзолистую легкосуглинистую почву влажностью 19,2 % давлением 150 кПа плотность увеличилась с 970 до 1260 кг/м³.

Подставив эти данные в последнюю зависимость и приняв $\sigma_h = 10$ кПа, можно записать

$$1260 = 970 + 150 k_1 - 10 k_1.$$

Обозначив член $10k_1$ через x , получим

$$1260 = 970 + 15x - x.$$

Отсюда $x \approx 20$ кг/м³.

Таким образом, $k_1\sigma_h = 20$ кг/м³ при начальной плотности почвы 970 кг/м³, что меньше величины колебаний плотности в зависимости от места взятия образца [6].

Тогда зависимость между плотностью почвы в контакте с деформатором и контактным напряжением в случае деформации бесконечного полупространства почвы линейна

$$\rho_0 = \rho_h + k_1 \sigma_0. \quad (11)$$

Установим, как соотносятся между собой коэффициент k_1 с коэффициентами распределения напряжений β и объемного смятия почвы k . Для этого максимальную плотность почвы при напряжении σ_0 находим из условия, что на уплотнение эффективного слоя x_h (рис. 1) идет объем почвы с высотой, равной величине деформации уплотнения $h_{\text{упл}}$, определяемой по формуле (2).

Масса слоя $M'_{\text{п}}$, подвергающегося уплотнению, с основанием, равным площади опорной поверхности деформатора F , до деформирования равна

$$M'_{\text{п}} = F \rho_{\text{п}} \left(x_h + \frac{\sigma_0}{k} \right).$$

Масса уплотненного эффективного слоя почвы

$$M_{\text{п}} = F \int_0^{x_h} [\rho_0 - k_1\sigma_0(1 - e^{-\beta x})] dx.$$

Значение данного интеграла равно

$$M_{\text{п}} = F \left[\left[\rho_0 x - k_1\sigma_0 \left(x + \frac{1}{\beta} e^{-\beta x} \right) \right] \right]_0^{x_h} = F \left[\rho_0 x_h - k_1\sigma_0 \left(x_0 + \frac{1}{\beta} e^{-\beta x_h} - \frac{1}{\beta} \right) \right].$$

Приравняв правую часть полученного выражения к значению массы эффективного слоя почвы до деформирования, получим

$$\rho_0 x_h - k_1 \sigma_0 \left(x_h + \frac{1}{\beta} e^{-\beta x} - \frac{1}{\beta} \right) = \rho_{\text{п}} \left(x_h + \frac{\sigma_0}{k} \right),$$

откуда

$$\rho_0 = \rho_{\text{п}} + k_1 \sigma_0 + \frac{\rho_{\text{п}} \sigma_0}{k x_h} - \frac{k_1 \sigma_0}{\beta x_h} + \frac{k_1 \sigma_h}{\beta x_h}.$$

Для значений $\beta > 1$ членом $(k_1/\beta)(\sigma_h/x_h)$ можно пренебречь.

Тогда

$$\rho_0 = \rho_{\text{п}} + k_1 \sigma_0 + \frac{\rho_{\text{п}} \sigma_0}{k x_h} - \frac{k_1 \sigma_0}{\beta x_h}. \quad (12)$$

В соответствии с формулами (11) и (12)

$$\frac{\rho_{\text{п}} \sigma_0}{k x_h} = \frac{k_1 \sigma_0}{\beta x_h}.$$

Отсюда

$$k_1 = \frac{\rho_{\text{п}} \beta}{k}.$$

При этом зависимость (11) плотности верхнего слоя почвы от напряжения примет вид

$$\rho_0 = \rho_{\text{п}} + \left(1 + \frac{\beta}{k} \sigma_0 \right). \quad (13)$$

Зависимость распределения плотности почвы по глубине с учетом полученного значения коэффициента уплотнения k_1 , и формулы (13) примет вид

$$\rho_x = \rho_{\text{п}} + \left(1 + \frac{\beta}{k} \sigma_0 e^{-\beta x} \right). \quad (14)$$

Результаты и обсуждение. Зависимость (14) получена исходя из предположения, что распределение напряжений и плотности почвы по глубине не зависит от величины давления. Однако известно [7], что, если давление достигает величины предела несущей способности почвы, плотность в образовавшемся ядре уплотнения одинакова по глубине. Распределение плотности почвы по высоте уплотненного ядра в данном случае изобразится прямой линией, параллельной оси ординат (рис. 3, а), что соответствует характеру протекания пластических деформаций. Поэтому при контактных напряжениях, близких к пределу несущей способности почвы, зависимость (13) может отклониться от пропорциональной (рис. 3, б, линия 1).

Установлено [8], что при сжатии сравнительно тонкого слоя почвы без возможности бокового расширения зависимость ее плотности от удельного давления имеет вид экспоненты (см. рис. 3, б, кривая 2). Нарастание уплотнения почвы в этом случае будет происходить интенсивнее, чем при деформировании полупространства с ограниченной возможностью бокового расширения, так как во втором случае затрачивается дополнительная энергия на уплотнения нижележащих слоев почвы. Однако в связи с тем, что плотность почвы имеет верхний предел, определяемый ее типом, структурой и влажностью, при дальнейшем увеличении давления интенсивность нарастания плотности снижается, что и определяет экспоненциальный характер кривой 2.

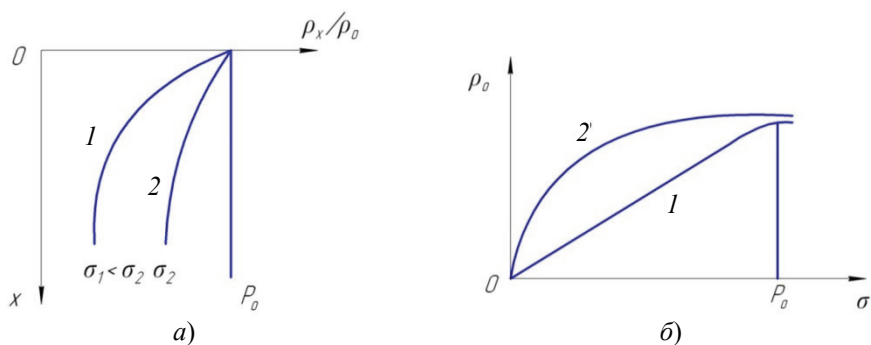


Рис. 3. Зависимость плотности почвы от напряжения с возможностью (1) и без возможности (2) бокового расширения:
a – по глубине; *б* – верхнего слоя

Уплотнение верхнего слоя почвы найдем из (13)

$$\frac{\rho_0}{\rho_{\text{п}}} = 1 + \frac{\beta}{k} \sigma_0. \quad (15)$$

Таким образом, уплотняющее воздействие можно оценивать величиной плотности почвы в контакте с деформатором (13), или уплотнением верхнего слоя почвы (15), высотой уплотняемого слоя (9) и распределением плотности по глубине (14).

Проанализируем, как соотносятся деформации уплотнения и сдвига для различных типов почв. При воздействии нагрузкой на рыхлые почвы под подошвой штампа наблюдается четкий контур уплотненного ядра [8], линии сдвига внутри массива обнаруживаются лишь при достижении давлением величины близкой к несущей способности почвы. При нагружении уплотненных песчаных почв на поверхности появляются линии выпора уже при небольших деформациях, после чего происходит формирование уплотненного ядра. Относительная величина сдвига в общей осадке для данного случая выше, чем для рыхлых почв.

Рассмотрим процесс уплотнения почвы при повторных нагружениях. При проходе по одному следу колес с одинаковой нагрузкой происходит дополнительное уплотнение почвы после прохода каждого колеса. Величину уплотнения верхнего слоя связной почвы при повторных нагружениях найдем, воспользовавшись зависимостью накопления повторных осадок для упрочняющихся почв [6]:

$$h_n = \frac{P_0}{k} \operatorname{arch} \left(\frac{n^B}{\sqrt{1 - \sigma^2 / P^2}} \right), \quad (16)$$

где B – коэффициент накопления повторных осадок связных почв.

Так как зависимость (16) является непрерывной функцией, то, подставив ее в формулу (2), получим закономерность нарастания напряжений при повторных проходах колес по следу

$$\sigma_n = P_0 \operatorname{ch} \left(\frac{n^B}{\sqrt{1 - \sigma^2 / P^2}} \right). \quad (17)$$

Подставив зависимость (17) в (15), получим величину уплотнения почвы при повторных нагружениях упрочняющейся почвы

$$\left(\frac{\rho_0}{\rho_{\Pi}}\right)_n = 1 + \frac{\beta}{k} P_0 \left(\operatorname{arch} \frac{n^B}{\sqrt{1 - \sigma_0^2 / P_0^2}} \right). \quad (18)$$

Так как на связных почвах с одинаковыми по глубине физико-механическими свойствами уплотнение распространяется на значительную глубину, то уровень воздействия ходовых систем следует оценивать не только уплотнением верхнего слоя, но и высотой уплотняемого слоя.

На основании зависимостей (9) и (17) найдем высоту уплотняемого слоя почвы при повторных нагружениях упрочняющейся почвы

$$x_{\Pi n} = \frac{1}{\beta} \ln \left[\frac{P_0}{\sigma_h} \operatorname{th} \left(\operatorname{arch} \frac{n^B}{\sqrt{1 - \sigma_0^2 / P_0^2}} \right) \right]. \quad (19)$$

Уплотнение верхнего слоя слабо уплотняющейся почвы при повторном нагружении найдем из зависимости (15), воспользовавшись тем, что условный коэффициент объемного смятия возрастает по мере нагружения. Величина условного коэффициента объемного смятия

$$k_{\text{уп}} = \frac{k}{k_{\Pi} \lg(n/(n-1))},$$

где k_{Π} – коэффициент интенсивности накопления повторных деформаций.

С учетом этого приращение плотности почвы при n -ом нагружении

$$\delta \left(\frac{\rho_0}{\rho_{\Pi}} \right)_n = 1 + \frac{\beta}{k} k_{\Pi} \sigma_0 \lg \left(\frac{n}{n-1} \right). \quad (20)$$

Уплотнение верхнего слоя почвы после n воздействий

$$\left(\frac{\rho_0}{\rho_{\Pi}} \right)_n = 1 + \frac{\beta}{k} \sigma_0 + \frac{\beta}{k} k_{\Pi} \sigma_0 \lg 2 + \frac{\beta}{k} k_{\Pi} \sigma_0 \lg \frac{3}{2} + \dots + \frac{\beta}{k} k_{\Pi} \sigma_0 \lg \left(\frac{n}{n-1} \right)$$

или

$$\left(\frac{\rho_0}{\rho_{\Pi}} \right)_n = 1 + \frac{\beta}{k} \sigma_0 \left[1 + k_{\Pi} \sum_{i=2}^n \lg \left(\frac{i}{i-1} \right) \right].$$

После преобразований

$$\left(\frac{\rho_0}{\rho_{\Pi}} \right)_n = 1 + \frac{\beta}{k} \sigma_0 (1 + k_{\Pi} \lg n). \quad (21)$$

Высоту уплотняемого слоя в данном случае считаем неизменяющейся, так как не происходит изменения контактного напряжения при повторных воздействиях. Проанализируем, как влияет число осей ходовой системы на слеодообразование и уплотнение почвы.

В случае изменения давления в зависимости обратно пропорциональной количеству осей N уплотнение верхнего слоя упрочняющейся почвы для такого нагружения

$$\left(\frac{\rho_0}{\rho_{\Pi}} \right)_N = \frac{\beta}{k} P_0 \left[\operatorname{arch} \frac{N^{bk} / P_0^2}{\sqrt{1 - (\xi Q / (F_k N P_0))^2}} \right], \quad (22)$$

где ξ – коэффициент, учитывающий закономерность распределения давлений под опорной поверхностью колеса; F_k – площадь контакта опорной поверхности колеса с почвой, m^2 ; Q – нагрузка на ходовую систему, Н.

Высота уплотняемого слоя упрочняющейся почвы

$$x_{hN} = \frac{1}{\beta} \ln \left\{ \frac{P_0}{\sigma_{x0}} \left[\operatorname{arch} \frac{N^{bk/P_0^2}}{\sqrt{1 - (\xi Q / (F_k N P_0))^2}} \right] \right\}.$$

(23)

Из рисунка 4, построенного на основании зависимостей (22) и (23), очевидно, что увеличение количества осей ходовой системы при одинаковой общей нагрузке ведет к снижению уплотнения верхнего слоя почвы и высоты уплотняемого слоя. При возрастании отношения $\xi Q / (F_k P_0)$ интенсивность снижения уплотнения почвы растет при увеличении количества осей. Однако во всех случаях при достижении четырех и более осей интенсивность убывания уплотнения заметно снижается.

При изучении слеодообразования на слабо упрочняющихся почвах воспользуемся зависимостью (21), которая при изменении давления в зависимости обратно пропорциональной количеству осей принимает вид:

$$h_N = \frac{P_0}{k} \operatorname{arch} \frac{\xi Q}{F_k N P_0} (1 + k_{in} \lg N). \quad (24)$$

Уплотнение верхнего слоя почвы

$$\left(\frac{\rho_0}{\rho_{пn}} \right) = \frac{\beta}{k} \operatorname{arch} \frac{\xi Q}{F_k N} (1 + k_{in} \lg N). \quad (25)$$

Для слабоупрочняющихся почв эффект уменьшения глубины следа и уплотнения почвы при увеличении количества осей снижается по сравнению со слеодообразованием на сильноупрочняющихся почвах. Значения коэффициента интенсивности накопления повторных деформаций, несущей способности и коэффициента объемного смятия принимались на основании исследований [6, 9, 10].

Заключение

При эксплуатации машинно-тракторных агрегатов воздействие их ходовых систем на почву оценивается не только глубиной следа, но и уплотнением верхнего слоя почвы, высотой уплотняемого слоя и характером распределения плотности по глубине. Для расчета показателей уплотнения почвы применен энергетический метод, основанный на закономерностях поглощения энергии различными слоями почвы. В результате получены закономерности уплотнения почв, подстилаемых плотным основанием, в различных режимах нагружения.

Анализ полученных зависимостей показал, что увеличение количества осей ходовой системы при сохранении общей нагрузки ведет к снижению уплотнения

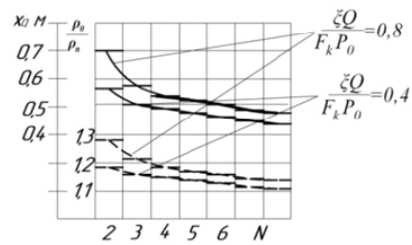


Рис. 4. Влияние числа осей на уплотнение упрочняющейся почвы:
 — — — высота уплотняемого слоя;
 - - - - уплотнение почвы

верхнего слоя почвы и высоты уплотняемого слоя. При увеличении количества осей свыше четырех интенсивность убывания уплотнения заметно снижается.

При сохранении давления на почву (размеры колес увеличиваются при уменьшении числа осей) постоянным для сильно упрочняющихся почв снижение глубины следа можно добиться увеличением числа осей ходовой системы. Для увлажненных слабоупрочняющихся почв ($k_{и} = 1,5 \dots 2$) одинаково эффективным для снижения глубины следа является увеличение числа осей и размеров колес. Для переувлажненных почв ($k_{и} = 2 \dots 4$) эффективнее увеличение размеров опорной поверхности ходовой системы.

Список литературы

1. Русанов, В. А. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения / В. А. Русанов. – М. : ВИМ, 1998. – 368 с.
2. Романюк, Н. Н. Снижение уплотняющего воздействия на почву вертикальными вибродинамическими нагрузками пневмоколесных движителей: дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01, 05.20.03 / Н. Н. Романюк. – Минск, 2008. – 206 с.
3. Влияние почвенных условий на формирование машинно-тракторных агрегатов / И. Н. Шило [и др.] // Агропанорама. – 2006. – № 1. – С. 7 – 11.
4. Афанасьев, Н. И. Влияние уплотнения машинно-тракторными агрегатами на свойства, режимы почвы и урожай сельскохозяйственных культур: Дерново-подзолистые почвы Белоруссии / Н. И. Афанасьев, И. И. Подобедов, А. Н. Орда // Переуплотнение пахотных почв: Причины, следствия, пути уменьшения. – М. : Наука, 1987. – С. 46 – 59.
5. Кацыгин, В. В. Основы теории выбора оптимальных параметров мобильных сельскохозяйственных машин и орудий / В. В. Кацыгин // Вопросы сельскохозяйственной механики. – Минск : Ураджай, 1964. – Т. 13. – С. 5 – 147.
6. Орда, А. Н. Эколого-энергетические основы формирования машинно-тракторных агрегатов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.03 / А. Н. Орда. – Минск, 1997. – 269 с.
7. Кушнарев, А. С. Уменьшение вредного воздействия на почву рабочих органов и ходовых систем машинных агрегатов при внедрении промышленных технологий возделывания сельскохозяйственных культур / А. С. Кушнарев, В. М. Мацепуро. – М. : Всесоюзный ордена «Знак Почета» сельскохозяйственный институт заочного образования, 1986. – 56 с.
8. Черкасов, И. И. Механические свойства грунтов в дорожном строительстве / И. И. Черкасов. – М. : Транспорт, 1976. – 248 с.
9. Закономерности уплотнения почвы под воздействием колес сельскохозяйственных машин / И. Н. Шило [и др.] // Агропанорама. – 2016. – № 2. – С. 2 – 8.
10. Влияние количества осей ходовых систем мобильной сельскохозяйственной техники на глубину следа / И. Н. Шило [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 4. – С. 37 – 42.
11. Синельников, В. М. Повышение экономической эффективности молочного животноводства за счет оптимизации рациона кормления / В. М. Синельников, А. И. Попов, Н. М. Гаджаров // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2017. – №2(64). – С. 86 – 93.
12. Восстановление изношенных деталей сельскохозяйственной техники гальваническим хромированием / Н. Ю. Стекольников [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 4. – С. 679 – 686.

The Influence of the Number of Axial Systems of Machine-Tractor Units on the Change in Soil Density

I. N. Shilo¹, N. N. Romanyuk¹, A. N. Orda¹,
S. O. Nukeshev², V. G. Kushnir³, A. I. Popov⁴

*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus,
romanyuk-nik@tut.by (1);
Seifullin Kazakh Agrotechnical University, Astana, Republic of Kazakhstan (2);
Ahmet Baitursynov Kostanay State University, Kostanay, Republic of Kazakhstan (3);
TSTU, Tambov, Russia (4)*

Keywords: deformation of soil; compression deformation; wheel; density; energy absorption; running system.

Abstract: Using the theory of propagation and absorption of energy, the dependences of the density of various soil layers on the pressure exerted on it are obtained. The influence of the number of axis of the running system on the variation in soil density is considered.

References

1. Rusanov V.A. *Problema pereuplotneniya pochv dvizhitelyami i effektivnye puti ee resheniya* [The problem of soil re-consolidation by propulsors and effective ways to solve it], Moscow: VIM, 1998, 368 p. (In Russ.)
2. Romanyuk N.N. *PhD Dissertation (Engineering)*, Minsk, 2008, 206 p. (In Russ.)
3. Shilo I.N., Orda A.N., Gireiko N.A., Seleshi A.B. [Influence of soil conditions on the formation of machine-tractor aggregates], *Agropanorama* [Agropanorama], 2006. no. 1, pp. 7-11. (In Russ.)
4. Afanas'ev N.I., Podobedov I.I., Orda A.N. [Influence of compaction by machine-tractor aggregates on properties, soil regimes and crop yield: Sod-podzolic soils of Belarus], *Pereuplotnenie pakhotnykh pochv: Prichiny, sledstviya, puti umen'sheniya* [Reconsolidation of arable soils: Causes, effects, ways reduce], Moscow: Nauka, 1987, pp. 46-59. (In Russ.)
5. Katsygin V.V. [Fundamentals of the theory of the choice of optimal parameters of mobile agricultural machinery and tools], *Voprosy sel'skokhozyaistvennoi mekhaniki* [Questions of agricultural mechanics], Minsk: Uradzhai, 1964, vol. 13, pp. 5-147. (In Russ.)
6. Orda A.N. *PhD Dissertation (Engineering)*, Minsk, 1997, 269 p. (In Russ.)
7. Kushnarev A.S., Matsepuro V.M. *Umen'shenie vrednogo vozdeystviya na pochvu rabochikh organov i khodovykh sistem mashinnykh agregatov pri vnedrenii industrial'nykh tekhnologii vzdelyvaniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur* [Reduction of the harmful effect on the soil of working organs and running systems of machine units when introducing industrial technologies for cultivating agricultural crops], Moscow: Vsesoyuznyi ordena «Znak Pocheta» sel'skokhozyaistvennyi institut zaochnogo obrazovaniya, 1986, 56 p. (In Russ.)
8. Cherkasov I.I. *Mekhanicheskie svoystva gruntov v dorozhnom stroitel'stve* [Mechanical properties of soils in road construction], Moscow: Transport, 1976, 248 p. (In Russ.)
9. Shilo I.N., Romanyuk N.N., Orda A.N., Shklyarevich V.A., Vorobei A.S. [Regularities of soil compaction under the influence of wheels of agricultural machinery], *Agropanorama* [Agropanorama], 2016, no. 2, pp. 2-8. (In Russ.)

10. Shilo I.N., Orda A.N., Romanyuk N.N., Nukeshev S O., Kushnir V.G. [Influence of the number of axes of running systems of mobile agricultural machinery on the depth of the track], *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machinery], 2016, no. 4, pp. 37-42. (In Russ.)

11. Sinel'nikov V.M., Popov A.I., Gadzharov N.M. [Increase of economic efficiency of dairy cattle breeding due to optimization of a ration of feeding], *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2017, no. №2(64), pp. 86-93. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Stekol'nikova N.Yu., Stekol'nikov Yu.A., Maksimov D.I., Astanin V.K. [Restoration of worn parts of agricultural machinery by galvanic chrome plating], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. № 4, pp. 679-686. (In Russ., abstract in Eng.)

Auswirkung der Anzahl der Achsen des Fahrwerksystems der Maschinen- und Traktoren-Einheiten auf die Änderung der Bodendichte

Zusammenfassung: Auf der Grundlage der Theorie der Verteilung und Absorption von Energie sind die Abhängigkeiten der Dichte verschiedener Bodenschichten von dem auf sie ausgeübten Druck erhalten. Es ist der Einfluss der Anzahl der Achsen des Fahrwerksystems auf die Änderung der Bodendichte betrachtet.

Influence du nombre d'axes du système de commande des agrégats des machines et tracteurs sur la modification de la densité du sol

Résumé: À la base de la théorie de la diffusion et de l'absorption de l'énergie sont obtenues les dépendances de la densité de différentes couches du sol de la pression exercée. Est considéré l'impact du nombre d'axes du système de commande sur la modification de la densité du sol.

Авторы: *Шило Иван Николаевич* – доктор технических наук, профессор, ректор УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»; *Романюк Николай Николаевич* – кандидат технических наук, доцент, первый проректор УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»; *Орда Александр Николаевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика и ТММ», УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь; *Нукешев Саяхат Оразович* – доктор технических наук, профессор, декан технического факультета, Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, г. Астана, Республика Казахстан; *Кушнир Валентина Геннадьевна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой машин, тракторов и автомобилей, Костанайский государственный университет им. А. Байтурсынова, г. Костанай, Республика Казахстан; *Попов Андрей Иванович* – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», начальник отдела электронного обучения, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Капцевич Вячеслав Михайлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии металлов, УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь.