

Влияние многоосной ходовой системы машинно-тракторных агрегатов на плотность почвы

Иван Николаевич Шило¹,
доктор технических наук, профессор, ректор;
Николай Николаевич Романюк¹,
кандидат технических наук, доцент, первый проректор, e-mail: romanyuk-nik@tut.by;
Александр Николаевич Орда¹,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой;

Саяхат Оразович Нукешев²,
доктор технических наук, профессор, декан
Валентина Геннадьевна Кушнир³,
доктор технических наук, профессор,
заведующая кафедрой

¹Белорусский государственный аграрный технический университет, проспект Независимости, 99-1, г. Минск, 220023, Республика Беларусь,

²Казахский агротехнический университет им. С.Сейфуллина, проспект Женис, 62, г. Астана, 010000, Республика Казахстан

³Костанайский государственный университет имени Ахмета Байтурсынова, ул. Байтурсынова, 47, г. Костанай, 110000, Республика Казахстан

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, что сопровождается изменением ее физико-механических свойств. Разрушенная структура почвы не восстанавливается полностью, в результате чего интенсивно обрабатываемая почва с течением времени деградирует, и в конечном итоге все это нарушает экологию агроландшафтов. Для расчета показателей уплотнения почвы применен энергетический метод, основанный на закономерностях поглощения энергии различными слоями почвы. Получены закономерности уплотнения почв с плотным основанием при различных режимах нагружения. Проведенные исследования показывают, что при давлении 150 кПа на дерново-подзолистую легкосуглинистую почву влажностью 19,2% плотность увеличилась с 970 до 1260 кг/м³. Показали, что увеличение количества осей ходовой системы при сохранении общей нагрузки снижает уплотнение верхнего слоя почвы и высоту уплотняемого слоя. При увеличении количества осей свыше четырех интенсивность убывания уплотнения заметно снижается. Установили, что при сохранении давления на почву постоянным (размеры колес увеличиваются при уменьшении количества осей) для сильно упрочняющихся почв глубина следа снижается с увеличением количества осей ходовой системы. На слабоупрочняющихся почвах эффект уменьшения глубины следа и уплотнения почвы при увеличении количества осей ниже по сравнению со слеодообразованием на сильноупрочняющихся почвах. Показали, что на увлажненных слабоупрочняющихся почвах для снижения глубины следа эффективно увеличение количества осей и размеров колес. На переувлажненных почвах лучше увеличить размеры опорной поверхности ходовой системы. При повышении количества осей свыше четырех интенсивность убывания плотности сильноупрочняющихся почв снижается.

Ключевые слова: машинно-тракторный агрегат, ходовая система, деформация почвы, плотность почвы.

■ **Для цитирования:** Шило И.Н., Романюк Н.Н., Орда А.Н., Нукешев С.О., Кушнир В.Г. Влияние многоосной ходовой системы машинно-тракторных агрегатов на плотность почвы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. №1. С. 31-36. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-1-31-36

Impact of Multiaxial Propulsion System of Machine-and-Tractor Units on Soil Density

Ivan M. Shila¹,
Dr. Sc. (Eng.), professor, head of university;
Nikolai N. Romaniuk¹,
PhD (Eng), associate professor, first vice-rector,
e-mail: romanyuk-nik@tut.by;

Aleksandr N. Orda¹,
Dr. Sc. (Eng.), professor, head of department;
Sajahat O. Nukeshev²,
Dr. Sc. (Eng.), professor, dean;
Valentina G. Kushnir³,
Dr. Sc. (Eng.), professor, head of department

¹Belarusian State Agrarian Technical University, 99/1, Nezavisimosti av., 220023, Minsk, Republic of Belarus

²S.Seifullin Kazakh Agro Technical University, 62, Pobedy Av., 010011, Astana, Republic of Kazakhstan

³Kostanay State University A. Baitursynov, 47, Baitursynov St., 110000, Kostanay, Republic of Kazakhstan

Use of the powerful tractors as a part of the machine-and-tractor units (MTU) is limited to high impact of their propellers (deformers) on the soil. The increase in tractor weigh and the multiple MTU passes result in overconsolidation of the soil. As a result, physical and mechanical soil properties are modified. The modified quality of soil structure is difficult to be restored entirely. As a result the intensive tilled soil degrades with time and all that creates the ecosystem disbalance of cultivated land. The power method based on regularities of absorption of energy by various soil layers was applied to calculate indicators of soil consolidation. The energy method based on the regularities of the energy absorption by different soil layers was applied to calculate the soil consolidation rate. The conducted researches show that at a pressure of 150 kPa and humidity of 19.2 percent the soddy podzolic loam sand soil density increased from 970 to 1260 kg per cubic metre. The increase in number of the drive system axles can reduce the consolidation of the topsoil as well as lower layer. The intensity of decrease of soil panning considerably decreases when quantity of axes is over four. If the pressure upon the high work-hardening soil is constant (the sizes of wheels increase at reduction of axes quantity) then the reducing of the dip of the wheel track can be obtained by increasing the number of the drive system axles. On the low work-hardening soil the effect of reduction of depth is not so much. Increasing the number of axles and the size of wheels for low work-hardening moist soils is equally effective for reducing the dip of the wheel track. For the overmoist soils it will be better to increase the sizes of a basic surface of running system. If the number of axes is more than four then the decrease of high work-hardening soils consolidation will be less intensive.

Keywords: Machine-and-tractor unit; Propulsion system; Soil deformation; Soil density.

For citation: Shila I.M., Romaniuk N.N., Orda A.N., Nukeshev S.O., Kushnir V.G. Impact of multiaxial propulsion system of machine-and-tractor units on soil density. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12; 1: 31-36. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-1-31-36. (In Russian)

Вредное воздействие ходовых систем (деформаторов) машинно-тракторных агрегатов (МТА) на почву снижает урожайность сельскохозяйственных культур: зерновых в следах тракторов – на 10-15%, корнеклубнеплодов – на 20-30%.

Под воздействием движителей тракторов и сельскохозяйственных машин твердость почвы увеличивается в 2-3 раза. Кроме того, удельное сопротивление при обработке пахотного слоя после прохода тракторов повышается на 15-65%, а транспортных средств и комбайнов – на 60-90% [1, 2].

При многократном воздействии на почву происходит накопление уплотнения как в пахотном, так и в подпахотном горизонтах. Плохая заделка семян из-за образовавшейся колеи, высокая плотность почвы по следам ходовых систем МТА снижают биологический урожай сельскохозяйственных культур [3, 4].

Цель исследования – определить влияние числа осей ходовой системы на изменение плотности почвы при сохранении общей нагрузки.

Материалы и методы. Характер и закономерности уплотнения почвы зависят от размеров и режимов нагружения движителя (деформатора), а также от исходного состояния почвенного массива. При наличии взрыхленного слоя конечной толщины в расчетах, как правило, допускают, что уплот-

няется 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 почвы показывает, что при расчете ее уплотнения лучше всего подходит энергетический метод, учитывающий влияние закона поглощения энергии на изменение свойств почвы.

При распространении энергии в почве происходит ее поглощение. Установлено, что распределение энергии J_x впереди деформатора осуществляется по экспоненциальному закону [5].

В зависимости от интенсивности поглощения потока энергии различными слоями почвы изменяется ее напряженное состояние, то есть в почве возникает градиент напряжения. Возникшие в почве напряжения являются обобщенными потенциалами. Изменение обобщенного потенциала (напряжения) влияет на сопряженный с ним обобщенный заряд.

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

разом, увеличение плотности почвы $d\rho$ при воздействии движителя является функцией напряжения почвы σ , то есть $d\rho = f(\sigma)$.

Установлено, что $d\rho = k_1 \cdot d\sigma$,

где k_1 – коэффициент уплотнения, который характеризует скорость изменения плотности почвы с ростом напряжения, кг/(м³·Па) [6].

Определим закономерность распределения напряжений по глубине. При деформировании почвы наряду с ее уплотнением имеет место и сдвиг.

Зависимость между напряжением σ и деформацией h подчиняется функции гиперболического тангенса, при этом интенсивность роста напряжения отстает от деформации (рис. 1) [5].

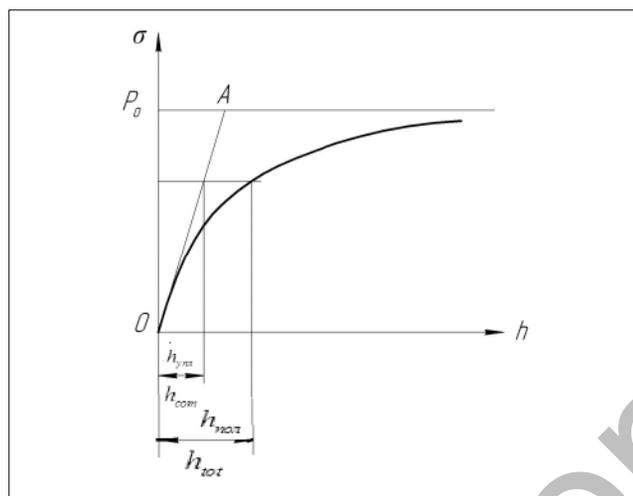


Рис. 1. Зависимость между напряжением и деформацией почвы: $h_{\text{упл}}$ – деформация сжатия; $h_{\text{пол}}$ – полная деформация; Fig. 1. Relationship between soil stress state and deformation $h_{\text{сжм}}$ – compressive deformation; $h_{\text{пол}}$ – total deformation

Зависимость деформации сжатия (уплотнения) $h_{\text{упл}}$ неограниченного полупространства почвы, имеющей одинаковые физико-механические свойства по глубине, от напряжения σ носит пропорциональный характер (рис. 1, прямая OA).

Максимальная деформация уплотнения почвы каким-либо деформатором (движителем) определяется отношением несущей способности P_0 к коэффициенту объемного смятия k .

Затраченная (поглощенная) на уплотнение почвы удельная энергия $J_{\text{упл}}$ представляет собой удельную работу, совершаемую деформатором с давлением при перемещении его на величину $h_{\text{упл}}$, и равна $\sigma_0^2 / (2k)$.

Тогда уравнение распределения напряжений по глубине x имеет вид:

$$\sigma_x = \sigma_0 \cdot e^{-\beta x}, \quad (1)$$

где σ_x – напряжение в почве на глубине x , Па;

σ_0 – напряжение в контакте колеса с почвой, Па;

β – коэффициент распределения напряжений, м⁻¹.

Приращение плотности почвы $d\rho_x$ на участке пропорционально градиенту напряжения dx , то есть $d\rho = k_1 \cdot \psi_x dx$,

где k_1 – коэффициент уплотнения, кг/н·м³.

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

$$\psi_x = -\beta_3 \cdot J,$$

где ψ_x – удельная поглощенная энергия, Дж;

J – поток энергии, Дж·м.

Примем, что градиент напряжения пропорционален действующему напряжению σ_x то есть $\psi_x = -\beta \cdot \sigma_x$.

Тогда приращение плотности определим как $d\rho_x = -k_1 \cdot \beta \cdot \sigma_x dx$,

Подставив зависимость (1) распределения напряжений по глубине в последнее уравнение, получим: $d\rho_x = -k_1 \cdot \beta \cdot \sigma_0 \cdot e^{-\beta x} dx$

Решение данного дифференциального уравнения имеет вид:

$$\rho_x = \rho_0 - k_1 \cdot \sigma_0 \cdot (1 - e^{-\beta x}) \quad (2)$$

Уравнение (2) представляет собой закон распределения плотности по глубине деформированного полупространства.

Коэффициенты распределения напряжений β и уплотнения почвы k_1 вычисляем на основании результатов экспериментальных данных.

Плотность верхнего слоя почвы ρ_0 при напряжении σ_0 найдем исходя из того, что при воздействии на почву деформатором уплотняется только эффективный ее слой, высота которого зависит от величины контактного напряжения и физико-механических свойств почвы. Из зависимости (1) определим высоту эффективного слоя почвы:

$$x_s = \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_s} \right). \quad (3)$$

Напряжение σ_h выбираем из условия развития в зоне его действия только упругих деформаций (отсутствие 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 ρ_n , не подвергшейся воздействию.

Учитывая, что $\rho_h = \rho_n$, а значение x_h вычисляем по формуле (3). Получим: $\rho_0 = \rho_h + k_1 \cdot \sigma_0 - k_1 \cdot \sigma_h$

При отсутствии воздействия ($\sigma_0 = 0$) величина максимальной плотности ρ_0 равняется плотности почвы ρ_n . 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 $k_1 \cdot \sigma_h$. Воспользуемся при этом экспериментальными данными по уплотнению почвы. При воздействии давления 150 кПа на дерново-подзолистую легкосуглинистую почву влажностью 19,2% ее плотность увеличилась с 970 до 1260 кг/м³.

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

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

Обозначив член $10k_1$ через x , получим $x = 20$ 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, то есть $\rho_0 = \rho_h + k_1 \sigma_0$.

Установим, как соотносятся между собой коэффициент k_1 и коэффициенты распределения напряжений β и объемного смятия почвы k .

С этой целью максимальную плотность почвы при напряжении σ_0 находим из условия, что на уплотнение эффективного слоя x_h идет объем почвы с высотой, равной величине деформации уплотнения $h_{упл}$.

Масса слоя $M_{п.}$, подвергающегося уплотнению, с основанием, равным площади опорной поверхности деформатора F , до деформирования равна массе уплотненного эффективного слоя почвы.

Теоретический анализ и результаты эксперимента показали, что $k_1 = \rho_n \beta / k$. При этом зависимость плотности верхнего слоя почвы от напряжения примет вид:

$$\rho_0 = \rho_n \cdot \left(1 + \frac{\beta}{k} \sigma_0 \right). \quad (4)$$

Результаты и обсуждение. Зависимость (4) получена исходя из предположения, что величина давления не влияет на распределение напряжений и плотности почвы по глубине. Однако известно: если давление достигает величины предела несущей способности почвы, то плотность в образовавшемся ядре уплотнения одинакова по глубине [7]. Распределение плотности почвы по высоте уплотненного ядра в этом случае изобразится прямой линией, параллельной оси ординат, что соответствует характеру протекания пластических деформаций. Поэтому при контактных напряжениях, близких к пределу несущей способности почвы, зависимость (4) может отклониться от пропорциональной.

Установлено, что при сжатии сравнительно тонкого слоя почвы без возможности бокового расширения зависимость плотности почвы от давления имеет вид экспоненты [8]. 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 уплотнение 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 уплотнения.

Таким образом, уплотняющее воздействие можно оценивать величиной плотности почвы в контакте с деформатором (4), высотой уплотняемого слоя (3) и распределением плотности по глубине (2).

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 осадков для упрочняющихся почв [6, 9]. В результате ее преобразований получим зависимость уплотнения почвы при повторных нагружениях:

$$\left(\frac{\rho_0}{\rho_n} \right)_n = 1 + \frac{\beta}{k} \cdot P_0 \cdot \left(\text{Arch} \frac{n^{b \cdot k / P_0^2}}{\sqrt{1 - \sigma_0^2 / P_0^2}} \right), \quad (5)$$

где b – коэффициент накопления повторных осадков для сильноупрочняющихся почв.

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 (3) и (5) найдем высоту уплотняемого слоя почвы при повторных нагружениях:

$$x_{lm} = \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{P_0}{\sigma_h} \cdot th \left(\text{Arch} \frac{n^{b \cdot k / P_0^2}}{\sqrt{1 - \sigma_0^2 / P_0^2}} \right) \right). \quad (6)$$

Проанализируем, как влияет количество осей ходовой системы на уплотнение почвы.

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

$$\left(\frac{\rho_0}{\rho_n} \right)_N = \frac{\beta}{k} \cdot P_0 \cdot \left(\text{Arch} \frac{N^{b \cdot k / P_0^2}}{\sqrt{1 - (\xi \cdot Q / (F_k \cdot N \cdot P_0))^2}} \right), \quad (7)$$

где ξ – коэффициент, учитывающий закономерность распределения давлений под опорной поверхностью движителя (колеса);

F_k – площадь контакта опорной поверхности ко-

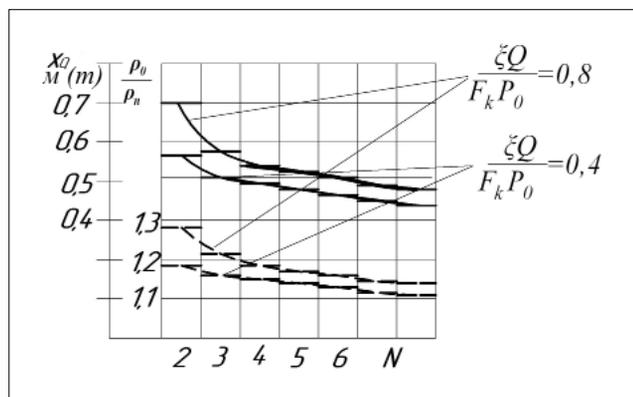


Рис. 2. Влияние числа осей на уплотнение почвы:
 — — высота уплотняемого слоя; - - - - уплотнение почвы
 Fig. 2. Influence of axle number on soil puddling:
 — — puddled layer depth; - - - - soil puddling

леса с почвой, м²;

Q – нагрузка на ходовую систему, Н.

Высота уплотняемого слоя почвы:

$$x_{hN} = \frac{1}{\beta} \ln \left[\frac{P_0}{\sigma_{x0}} \cdot \left(\text{Arch} \frac{N^{b \cdot k / P_0^2}}{\sqrt{1 - (\xi \cdot Q / (F_k \cdot N \cdot P_0))^2}} \right) \right] \quad (8)$$

Из рисунка 2, построенного на основании зависимостей (7) и (8), видно, что увеличение количества осей ходовой системы при одинаковой общей нагрузке снижает уплотнение верхнего слоя почвы и высоту уплотняемого слоя.

При возрастании отношения $\xi \cdot Q / (F_k \cdot P_0)$ интенсивность снижения уплотнения почвы растет при увеличении количества осей. Однако во всех случаях при достижении четырех и более осей интенсивность убывания уплотнения заметно снижается.

Для оценки слеодообразования на слабоупрочняющихся почвах обоснована зависимость, которая учитывает изменение давления при увеличении числа осей ходовой системы. Давление колес на почву при этом изменяется в зависимости, обратно пропорциональной числу осей ходовой системы [10]:

$$h_N = \frac{P_0}{k} \cdot \left[\text{Arch} \frac{\xi \cdot Q}{F_k \cdot N \cdot P_0} \right] (1 + k_u \cdot \lg N), \quad (9)$$

где k_u – коэффициент накопления повторных осадков для слабоупрочняющихся почв.

Уплотнение верхнего слоя слабоупрочняющейся почвы:

$$\left(\frac{\rho_0}{\rho_n} \right) = \frac{\beta}{k} \left[\text{Arch} \frac{\xi \cdot Q}{F_k \cdot N} \right] (1 + k_u \cdot \lg N). \quad (10)$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Русанов В.А. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения. М.: ВИМ, 1998. 368 с.
 2. Романюк Н.Н. Снижение уплотняющего воздействия

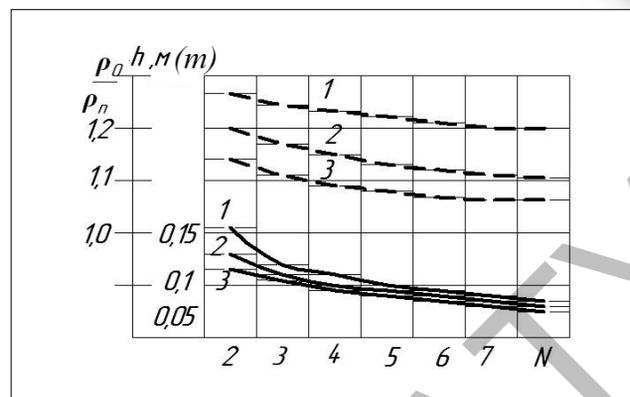


Рис. 3. Зависимость глубины следа (—) и уплотнения слабоупрочняющейся почвы от числа осей:
 1 – при $k_u = 2$; 2 – при $k_u = 4$; 3 – при $k_u = 6$;
 k_u – коэффициент накопления повторных осадков для слабоупрочняющихся почв
 Fig. 3. Dependence of wheel-track deep (—) and low work-hardening soil puddling (- - - -) from axle number:
 1 – when $k_u = 2$; 2 – when $k_u = 4$; 3 – when $k_u = 6$;
 k_u – coefficient of repeated puddling accumulation for low work-hardening soils

Для слабоупрочняющихся почв эффект уменьшения глубины следа и уплотнения почвы при увеличении количества осей снижается по сравнению со слеодообразованием на сильноупрочняющихся почвах (рис. 3).

Значения коэффициента интенсивности накопления повторных деформаций, несущей способности и коэффициента объемного смятия принимались на основании исследований [6, 9, 10].

Выводы. Степень уплотняющего воздействия ходовых систем на почву можно оценивать величиной плотности верхнего слоя почвы, характером распределения плотности почвы по глубине и высотой уплотняемого слоя.

Анализ предложенных закономерностей уплотнения почв показал, что увеличение количества осей ходовой системы при сохранении общей нагрузки снижает уплотнение верхнего слоя почвы и высоту уплотняемого слоя. При увеличении количества осей свыше четырех интенсивность убывания плотности сильноупрочняющихся почв уменьшается. Для увлажненных слабоупрочняющихся почв увеличение количества осей в меньшей мере влияет на снижение уплотнения почвы.

на почву вертикальными вибродинамическими нагрузками пневмоколесных движителей: Дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2008. 206 с.
 3. Шило И.Н., Орда А.Н., Гирейко Н.А., Селеши А.Б. Вли-

яние почвенных условий на формирование машинно-тракторных агрегатов // *Агропанорама*. 2006. №1. С. 7-11.

4. Афанасьев Н.И., Подобедов И.И., Орда А.Н. Влияние уплотнения машинно-тракторными агрегатами на свойства, режимы почвы и урожай сельскохозяйственных культур: Дерново-подзолистые почвы Белоруссии. М.: Наука, 1987. С. 46-59.

5. Катыгин В.В. Основы теории выбора оптимальных параметров мобильных сельскохозяйственных машин и орудий // *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. Минск, 1997. 269 с.

7. Кушнарев А.С., Мацепуро В.М. Уменьшение вредно-

го воздействия на почву рабочих органов и ходовых систем машинных агрегатов при внедрении промышленных технологий возделывания сельскохозяйственных культур. М.: ВСХИЗО, 1986. 56 с.

8. Черкасов И.И. Механические свойства грунтов в дорожном строительстве. М.: Транспорт, 1976. 248 с.

9. Шило И.Н., Романюк Н.Н., Орда А.Н., Шкляревич В.А., Воробей А.С. Закономерности уплотнения почвы под воздействием колес сельскохозяйственных машин // *Агропанорама*. 2016. №2. С. 2-8.

10. Шило И.Н., Орда А.Н., Романюк Н.Н., Нукешев С.О., Кушнир В.Г. Влияние количества осей ходовых систем мобильной сельскохозяйственной техники на глубину следа // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. №4. С. 37-42.

REFERENCES

1. Rusanov V.A. Problema pereuplotneniya pochv dvizhityami i effektivnyye puti yeye resheniya [Problem of soil overconsolidation by propulsions and and effective solutions]. Moscow: VIM, 1998: 368. (In Russian)

2. Romanyuk N.N. Snizheniye uplotnyayushchego vozdeystviya na pochvu vertikal'nymi vibrodinamicheskimi nagruzkami pnevmokolesnykh dvizhiteley [Reduction of compacting influence on the soil by vertical vibration-dynamic loads of pneumatic wheeled propellers]: Dis....kand. tekhn. nauk. Minsk, 2008: 206. (In Russian)

3. Shilo I.N., Orda A.N., Gireyko N.A., Seleshi A.B. Influence of soil conditions on formation of machine-tractor aggregates. *Agropanorama*. 2006; 1: 7-11. (In Russian)

4. Afanas'yev N.I., Podobedov I.I., Orda A.N. Vliyaniye uplotneniya mashinno-traktornymi agregatami na svoystva, rezhimy pochvy i urozhay sel'skokhozyaystvennykh kul'tur: Dernovo-podzolistyye pochvy Belorussii [Influence of compaction by machine-and-tractor units on soil properties, regimes and crop yield: Sod-podzolic soils of Belarus]. Moscow: Nauka, 1987: 46-59. (In Russian)

5. Katsygin V.V. Fundamentals of the theory of choice of optimal parameters of mobile agricultural machinery and tools. *Voprosy sel'skhozaystvennoy mekhaniki*. Minsk: Uradzhay, 1964; 13: 5-147. (In Russian)

6. Orda A.M. Ekologo-energeticheskiye osnovy formirovaniya mashinno-traktornykh agregatov [Ecological and energetic foundations of machine-and-tractor units formation]: Dis. ... d-ra tekhn. nauk. Minsk, 1997: 269. (In Russian)

7. Kushnarev A.S., Matsepuro V.M. Umen'sheniye vrednogo vozdeystviya na pochvu rabochikh organov i khodovykh sistem mashinnykh agregatov pri vnedrenii industrial'nykh tekhnologiy vozdeleyvaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Reduction of harmful effect on the soil of working organs and running systems of machine units when industrial technologies introduction for agricultural crops cultivating]. Moscow: VSKhIZO, 1986: 56. (In Russian)

8. Cherkasov I.I. Mekhanicheskiye svoystva gruntov v dorozhnom stroitel'stve [Mechanical properties of soils in road construction]. Moscow: Transport, 1976: 248. (In Russian)

9. Shylo I.N., Romanyuk N.N., Orda A.N., Shklyarevich V.A., Vorobey A.S. Patterns of soil compaction under influence of agricultural machinery wheels. *Agropanorama*. 2016; 2: 2-8. (In Russian)

10. Shylo I.N., Orda A.N., Romaniuk N.N., Nukeshev S.O., Kushnir V.G. Influence of tnumber of undercarriage axles of mobile agricultural machinery on track depth. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2016; 4: 37-42. (In Russian)

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.