



Расчет экологических порогов нормального давления колесных движителей машин на полевых работах на глинистых почвах

Александр Николаевич Панасюк,
доктор технических наук, член-корреспондент РАН,
ведущий научный сотрудник, alex28rus@list.ru;

Александр Васильевич Липкань,
старший научный сотрудник

Дальневосточный научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства,
г. Благовещенск, Российская Федерация

Реферат. Одно из условий достижения максимальной урожайности сельскохозяйственных культур – оптимальная плотность почвы. В Амурской области экологические пороги уплотнения для зерновых культур составляют 1,0-1,24 грамма на кубический сантиметр, для сои – 1,09-1,25, что соответствует нормальному давлению 80-120 килопаскалей в зависимости от влажности почвы. Показали, что применяемые в Амурской области тракторы, воздействуя на почву, превышают экологический порог уплотнения. (*Цель исследования*) Обосновать экологическую совместимость мобильной полевой энергетики, в первую очередь тракторов, занятых на полевых работах, по уплотняющему воздействию от передаваемой их движителями нормальной нагрузки на почву. (*Материалы и методы*) Проанализировали экспериментальные данные изменения плотности, твердости и сопротивления почвы обработке. Получили эмпирическую зависимость для расчета прироста сопротивления обработке почвы от уплотняющей нагрузки в слое 0-20 сантиметров. (*Результаты и обсуждение*) Установили рост сопротивления вспашке на 12-25 процентов при нормальной нагрузке 138-170 килопаскалей, передаваемой движителями машин, что соответствует плотности почвы 1,25-1,30 грамма на кубический сантиметр; при нагрузке 180-250 килопаскалей сопротивление увеличивается на 43-50 процентов, что эквивалентно плотности почвы 1,30-1,35 грамма на кубический сантиметр; при давлении 300-350 килопаскалей эти показатели повышаются на 60-67 процентов и до 1,40-1,45 грамма на кубический сантиметр; а при 400 килопаскалях выявили рост сопротивления на 70-90 процентов, что сравнимо с плотностью 1,48 грамма на кубический сантиметр. (*Выводы*) Определили, что предельное значение нормального давления под движителями машин на полевых работах следует ограничить до 150-175 килопаскалей. Установили экологический порог нормального давления – не более 120-135 килопаскалей при влажности почвы 20-23 процента, что сравнимо с плотностью почвы 1,2-1,25 грамма на кубический сантиметр. Рассчитали предельное значение нормального давления движителя на почву – 350 паскалей, что соответствует критическому уплотнению почвы 1,30 грамма на кубический сантиметр. **Ключевые слова:** уплотнение почвы, мобильная полевая энергетика, сопротивление почвы обработке, экологический порог нормального давления на почву, урожайность, тракторы.

Для цитирования: Панасюк А.Н., Липкань А.В. Расчет экологических порогов нормального давления колесных движителей машин на полевых работах на глинистых почвах // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. №4. С. 43-48. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-43-48.

Calculation of the Ecological Thresholds of Normal Pressure of Machine Propulsion Drive in Working on Clay Soils

Alexander N. Panasyuk,
Dr.Sc.(Eng.), corresponding member of the Russian
academy of sciences, leading researcher,
e-mail: alex28rus@list.ru;

Alexander V. Lipkan,
senior researcher

Far Eastern Research Institute of Agricultural Mechanization and Electrification, Blagoveshchensk, Russian Federation

Abstract. One of the conditions for achieving maximum land productivity is optimal soil density. In the Amur Region, ecological compaction thresholds for cereals are 1.0-1.24 grams per cubic centimeter, for soybeans – 1.09-1.25, which corresponds to a normal pressure of 80-120 kilopascals, depending on soil moisture. The authors showed that the tractors used in the Amur Region, acting on the soil, exceed the ecological compaction threshold. (*Research purpose*) To substantiate the ecological compatibility of mobile field energy, primarily tractors engaged in field work, in terms of the compacting effect from the normal load transmitted by their propulsion drive to the soil. (*Materials and methods*) The authors analyzed the experimental data on changes in density, hardness and resistance

of soil to processing. An empirical dependence was obtained for calculating the increase in resistance to soil cultivation from the compaction load in a layer of 0-20 centimeters. (*Results and discussion*) The authors established an increase in plowing resistance of 12-25 percents at a normal load of 138-170 kilopascals, transmitted by the machine propulsion drive, which corresponded to a soil density of 1.25-1.30 grams per cubic centimeter; at a load of 180-250 kilopascals, the resistance increased by 43-50 percents which was equivalent to a soil density of 1.30-1.35 grams per cubic centimeter; at a pressure of 300-350 kilopascals, these indicators increased by 60-67 percents and up to 1.40-1.45 grams per cubic centimeter; and at 400 kilopascals, they showed an increase in resistance of 70-90 percents which is comparable to a density of 1.48 grams per cubic centimeter. (*Conclusions*) It was determined that the limit value of the normal pressure under the machine propulsion drive in field work should be limited to 150-175 kilopascals. The ecological threshold of normal pressure was established – no more than 120-135 kilopascals with soil moisture of 20-23 percents which was comparable to the soil density of 1.2-1.25 grams per cubic centimeter. The limiting value of the normal pressure of the propulsion drive on the soil was calculated – 350 Pa, which corresponded to the critical soil compaction of 1.30 grams per cubic centimeter.

Keywords: soil compaction, mobile field power engineering, soil resistance to cultivation, ecological threshold of normal pressure on the soil, yield, tractors.

For citation: Panasyuk A.N., Lipkan' A.V. Raschet ekologicheskikh porogov normal'nogo davleniya kolesnykh dvizhiteley mashin na polevykh rabotakh na glinistykh pochvakh [Calculation of the ecological thresholds of normal pressure of machine propulsion drive in working on clay soils]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. T. 14. N4. 43-48 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-43-48.

Существенная интегральная характеристика почвы – ее плотность. От этого показателя зависят водный и воздушный режимы, биологическая активность почвенной биоты, то есть плодородие [1].

Установлено, что максимальная урожайность сельскохозяйственных культур достигается при оптимальной плотности почвы, уровень которой различен в зависимости от видов почв и культур и отличаются от равновесной плотности естественного сложения [2, 3]. Чем больше глинистой фракции содержит почва, тем меньше значения ее оптимальной плотности. От плотности почвы зависят ее твердость и сопротивление обработке. Поэтому необходимо учитывать экологическую совместимость мобильной полевой энергетики, в первую очередь тракторов, занятых на полевых работах, по уплотняющему воздействию от передаваемой на почву нормальной нагрузки [4].

Цель исследований – обосновать экологическую совместимость мобильной полевой энергетики, в первую очередь тракторов, занятых на полевых работах, по уплотняющему воздействию от передаваемой их движителями нормальной нагрузки на почву.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Согласно данным Амурского статистического ежегодника 2017 г., для лугово-черноземовидных и лугово-глеевых оструктуренных почв, по механическому составу-средних и тяжелых суглинках, занимающих 78,8% пашни в регионе, экологические пороги уплотнения для зерновых культур составляют 1,0-1,24 г/см³, для сои – 1,09-1,25 г/см³ [5]. По другим оценкам, усредненный экологический порог уплотнения равен 1,18-1,20 г/см³. Провели анализ результатов исследований уплотняющего воздействия тракторов по коэффициенту уплотнения (табл. 1). Выявили, что практически все колесные тракторы, применяемые в Амурской области, превышают экологический порог уплотнения [6, 7]. Исключение, со-

ставляет малая линейка тракторов: K-744P1; CASE IH 450; NH T9.040. Плотность почвы по следу трактора находится на верхней границе экологического порога уплотнения.

Для зерновых культур при плотности почвы 1,16-1,18 г/см³ (для пропашных – 1,39-1,45) считается, что предел оптимальной плотности превышен на 0,08-0,12 г/см³ (для пропашных – на 0,19-0,25), то есть оптимальное значение плотности принимается равным 1,08-1,06 г/см³ (для пропашных – 1,2).

Для тяжелосуглинистых черноземов, если верхний предел оптимальной плотности не превышает 1,2 г/см³, обработку почвы с целью ее разуплотнения можно не проводить [1]. При увеличении плотности почвы под воздействием движителей машин более 1,3 г/см³ происходит так называемая техногенная деградация почвы вследствие механической нагрузки на нее [7, 8]. Почва переуплотняется, идет разрушение ее структуры: начинается практическое снижение пористости почвы и доступности для растений почвенной влаги. Для всех видов почв при плотности 1,39-1,40 г/см³ наблюдается отсутствие роста и развития растений сельхозкультур. Таким образом, можно принять усредненное значение экологического порога уплотнения – 1,2 г/см³.

Обработка экспериментальных данных по уплотняющему воздействию колесных движителей мобильных полевых и транспортных агрегатов позволила установить определенную корреляцию нормального давления в пятне контакта движителя с почвой с ее плотностью после прохода агрегата в зависимости от исходной плотности (табл. 2).

Только при нормальном давлении, не превышающем 130 кПа, можно утверждать, что движители не оказывают переуплотняющего воздействия. Кроме того, при высоких значениях эксплуатационной мас-



Таблица 1

Table 1

Коэффициент уплотнения почвы по следу трактора (поле, подготовленное под посев, $W_0=20-23\%$)
 THE TRACTOR'S TRACK SOIL COMPACTION COEFFICIENT (THE FIELD PREPARED FOR SOWING, $W_0 = 20-23\%$)

Марка трактора Tractor brand	Тяговый класс Traction class	Колесная формула Wheel formula	Плотность почвы, г/см ³ Soil density, g / cm ³		Коэффициент уплотнения Compaction factor	Эксплуатационная масса, т Operating weight, t
			вне следа off trail	по следу on trail		
МТЗ-80	1,4	4К2 <i>a</i> один single	1,12	1,32	1,18	3,0
МТЗ-82	1,4	4К4 <i>a</i> один single	1,17	1,59	1,36	3,2
Т-150К	3,0	4К2 <i>b</i> один single	1,08	1,35	1,25	7,8
Т-150К	3,0	4К2 <i>a</i> один single	1,12	1,39	1,24	7,8
NH T7.060	3,0	4К4 <i>a</i> один single	1,0	1,28	1,28	8,1
К 701	5,0	4К4 <i>b</i> один single	1,12	1,40	1,29	13,5
МТЗ 3552	5,0	4К4 <i>a</i> сдвоен doubled	1,15	1,34	1,16	12,3
К 744Р1	5,0	4К4 <i>a</i> один single	1,00	1,16	1,16	16,1
К 744Р3	5,0	4К4 <i>b</i> один single	0,92	1,22	1,32	17,0
К 744Р4	5,0-6,0	4К4 <i>b</i> один single	1,16	1,42	1,22	17,5
К 744Р4	5,0-6,0	4К4 <i>b</i> один single	1,02	1,28	1,25	17,5
К 744Р4	5,0-6,0	4К4 <i>b</i> один single	0,94	1,27	1,35	17,5
NH T9.535	6,0	4К4 <i>b</i> сдвоен doubled	1,13	1,24	1,10	19,0
Case IH 450	6,0	4К4 <i>b</i> сдвоен doubled	0,94	1,16	1,23	22,4
BV 485	6,0	4К4 <i>b</i> сдвоен doubled	0,94	1,21	1,29	22,0
NH T9.505	6,0	4К4 <i>b</i> сдвоен doubled	0,94	1,29	1,37	22,4
NH T9.040	8,0	4К4 <i>b</i> сдвоен doubled	0,94	1,20	1,27	23,4

сы колесных тракторов и избыточном нормальном давлении под движителем повышается сопротивление перекачиванию, увеличиваются глубина колеи и расход непроизводительной энергии [9].

Экологический порог нормального давления $q_{эк}$ в

зависимости от влажности почвы находится в пределах 80-120 кПа (среднее 100 кПа), для почв, склонных к переувлажнению, – 50-100 кПа, что соответствует уплотняющему воздействию 60-90 кН/м (среднее – 75 кН/м) [10, 11].

Таблица 2
Table 2

ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОТНОСТИ ПОЧВЫ В ПАХОТНОМ ГОРИЗОНТЕ ОТ НОРМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ПОД ДВИЖИТЕЛЯМИ МАШИН (ПРИ ИСХОДНОЙ ПЛОТНОСТИ 1,00-1,12 г/см³) DEPENDENCE OF THE SOIL DENSITY IN THE PLOW HORIZON ON THE NORMAL PRESSURE UNDER THE MACHINE PROPULSION DRIVE (WITH AN INITIAL DENSITY OF 1.00-1.12 g/cm³)	
Интервалы нормального давления под движителями машин, кПа Normal pressure intervals under machine propulsion drive, kPa	Плотность почвы, г/см³ Soil density, g/cm³
≤ 50	≤ 1,1
50-100	1,11-1,15
115-130	1,15-1,20
135-150	1,18-1,28
150-200	1,20-1,31
145-250	1,24-1,35
275-300	1,28-1,40
300-340	1,34-1,45
350-400	1,45-1,52
> 450	1,58-1,62

Изменение нормальных напряжений в почве подчиняется известной зависимости гиперболического тангенса (по В.В. Кацыгину). Анализ изменения плотности, твердости и сопротивления почвы обработке позволил выдвинуть гипотезу и получить эмпирическую формулу для расчета прироста сопротивления от уплотняющей нагрузки:

$$\Delta k_0 = k_{\rho}^{\text{крит}} \cdot th \left(\frac{q_{\text{тек}} - q_{\text{эк}} \cdot \frac{\rho_{\text{тек}}}{\rho_{\text{пред}}}}{q_{\text{пред}} \cdot \frac{\rho_{\text{эк}} - \rho_0}{\rho_0}} \right), \quad (1)$$

где Δk_0 – прирост сопротивления;

$$k_{\rho}^{\text{крит}} = \frac{\rho_{\text{пред}}}{\rho_0};$$

$\rho_{\text{пред}}$ – предельное значение плотности (1,62 г/см³);

ρ_0 – нижний уровень оптимального значения плотности почвы (1,0-1,06 г/см³);

$q_{\text{тек}}$ – текущее значение нормального давления на

почву под движителем, кПа;

$q_{\text{пред}}$ – предельное значение нормального давления движителя на почву, соответствующее критическому уплотнению почвы, кПа;

$\rho_{\text{тек}}$ – плотность почвы под движителем, г/см³ (при соответствующем $q_{\text{тек}}$);

$\rho_{\text{эк}}$ – экологический порог плотности почвы, г/см³;

ρ_0 – усредненная оптимальная плотность почвы вне следа движителя, г/см³.

Под k_0 понимается прирост сопротивления обработке по следу к сопротивлению обработке вне следа:

$$\Delta k_0 = \frac{k_{0 \text{ в следе}}}{k_0}, \quad (2)$$

где $k_{0 \text{ в следе}}$ – сопротивление обработке по следу;

k_0 – сопротивление обработке вне следа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для подтверждения

Таблица 3
Table 3

ПРИРОСТЫ ТВЕРДОСТИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБРАБОТКЕ ПОЧВЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НОРМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ В СЛЕДЕ ДВИЖИТЕЛЯ INCREASES IN HARDNESS AND RESISTANCE TO TILLAGE DEPENDING ON THE NORMAL PRESSURE IN THE PROPULSION DRIVE TRAIL								
Нормальное давление в следе, кПа Normal pressure in the trail, kPa	Относительный прирост сопротивления Relative resistance gain			Сопротивление обработке, кН/м² Resistance to processing, kN / m²	Твердость почвы, МПа Soil hardness, MPa	Прирост сопротивления обработке Increase in processing resistance		
	диапазон range	среднее значение mean	коэффициент вариации, % the coefficient of variation, %			диапазон range	среднее значение mean	коэффициент вариации, % the coefficient of variation, %
Off trail	–	–	–	57,8	1,13-1,19	–	–	–
136-154	0,11-0,16	0,13	17,0	69,1-64,7	1,61-1,63	1,11-1,14	1,12	18,6
166-170	0,19-0,21	0,20	13,0	64,4- 72,4	1,61- 1,67	1,23-1,25	1,24	10,2
183-205	0,31-0,34	0,32	5,4	83,0-86,8	1,97 -2,69	1,42-1,50	1,44	14,6
253-272	0 27-0,31	0,28	12,5	79,0 -83,2	1,65- 1,96	1,37-1,44	1,40	12,0
300	0,38	0,38	18,0	93,1	1,96	1,58-1,61	1,62	13,0
350	0,38-0,39			92,6-94,7	2,06-2,61	1,60-1,64		
407	0,42-0,47	0,43	11,0	99,4-109,8	2,48-2,56	1,72-1,90	1,76	1,76



Таблица 4										Table 4		
РАСЧЕТ ПРИРОСТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБРАБОТКЕ ПОЧВЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НОРМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ CALCULATION OF THE INCREASE IN RESISTANCE TO TILLAGE DEPENDING ON THE NORMAL PRESSURE												
Варианты сочетаний / Combination options										Обозначения кривой на рисунке Curve designation in the figure		
$q_{эк} = 80 \text{ кПа}, q_{пред} = 350 \text{ кПа}, \rho_0 = 1,0 \text{ г/см}^3, \rho_{эк} = 1,2 \text{ г/см}^3, k_p = 1,62$												
q	100	115	135	150	200	275	300	350	▲			
ρ	1,15	1,18	1,23	1,25	1,29	1,38	1,39	1,45				
Δk_o	–	1,0	1,21	1,37	1,58	1,62	1,62	1,62				
$q_{эк} = 80 \text{ кПа}, q_{пред} = 250 \text{ кПа}, \rho_0 = 1,0 \text{ г/см}^3, \rho_{эк} = 1,2 \text{ г/см}^3, k_p = 1,62$												
q	100	115	135	140	150	200	275	300	350	400	450	●
ρ	1,15	1,18	1,23	1,25	1,27	1,28	1,35	1,40	1,45	1,48	1,58	
Δk_o	–	1,0	1,42	1,47	1,53	1,61	1,62	–	–	–	–	
$q_{эк} = 100 \text{ кПа}, q_{пред} = 350 \text{ кПа}, \rho_0 = 1,04 \text{ г/см}^3, \rho_{эк} = 1,25 \text{ г/см}^3, k_p = 1,62$												
Δk_o	–	–	–	1,0	1,11	1,52	1,61	1,62	1,62	–	–	○
$q_{эк} = 80 \text{ кПа}, q_{пред} = 450 \text{ кПа}, \rho_0 = 1,0 \text{ г/см}^3, \rho_{эк} = 1,2 \text{ г/см}^3, k_p = 1,62$												
q	125	135	150	160	175	200	250	300	320	350	400	◆
ρ	1,19	1,23	1,24	1,26	1,27	1,32	1,35	1,40	1,42	1,45	1,48	
Δk_o	–	1,03	1,31	1,37	1,41	1,53	1,60	1,61	1,62	1,62	1,62	

выдвинутой гипотезы использованы усредненные экспериментальные значения нормального давления, плотности почвы и сопротивления обработке в слое 0-20 см (табл. 3). Влажность поля, подготовленного под посев, равна 20-23%.

Обработка экспериментальных данных зависимости сопротивления почвы основной обработке от нормальной нагрузки, передаваемой движителями машин, показывает, что в интервале $q = 136-170 \text{ кПа}$ сопротивление вспашке возрастает на 11-25% (это соответствует интервалу плотности почвы $\rho = 1,25-1,30 \text{ г/см}^3$); в интервале $q = 180-270 \text{ кПа}$ сопротивление увеличивается на 43-50% ($\rho = 1,30-1,35 \text{ г/см}^3$); при давлении в интервале $q = 300-350 \text{ кПа}$ сопротивление обработки повышается на 58-65% ($\rho = 1,40-1,45 \text{ г/см}^3$); при нормальном давлении $q \geq 400 \text{ кПа}$ сопротивление больше на 70-90% ($\rho = 1,48 \text{ г/см}^3$).

Относительный прирост сопротивления определяем по формуле:

$$\xi_{k_o} = 1 - k_o/k_{в\text{след}} \quad (3)$$

Экспериментальные данные сравнивали с результатами расчетов прироста сопротивления обработке почвы по предложенной зависимости (табл. 4, рисунок). Использовали различные варианты сочетаний составляющих формулы (1). Расчетные значения сравнивали с экспериментальными данными изменения коэффициента сопротивления обработке почвы.

Выводы. Предельное значение нормального давления под движителями машин, занятых на полевых работах, следует ограничить до 150-175 кПа в зависимости от исходного состояния почвы плотностью 1,00-1,08 г/см³. Экологический порог нормального давления не должен превышать 120-135 кПа, оптимальные

значения нормального давления – 80-100 кПа при предельном значении нормального давления движителя на почву, соответствующем критическому уплотнению почвы 350 кПа (влажность почвы – 20-23%). Экологический порог уплотнения составляет 1,20-1,25 г/см³; критическим следует считать значение 1,30 г/см³.

На уборочных и уборочно-транспортных работах

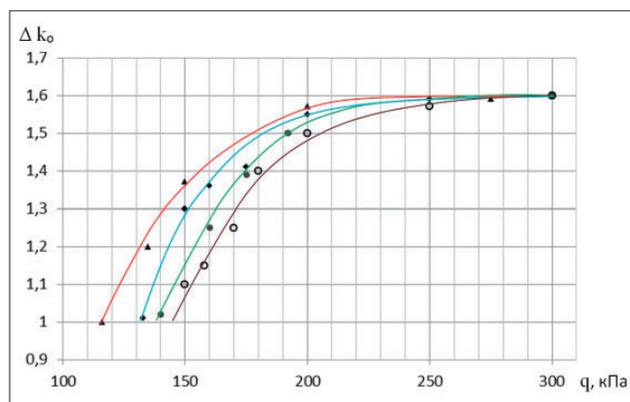


Рисунок. Зависимость прироста коэффициента сопротивления обработке почвы от нормального давления под движителем при различных значениях экологического порога уплотняющего воздействия ($q_{эк}$)

Figure. Dependence of the increase in the coefficient of resistance to tillage on the normal pressure under the propulsion drive at various values of the ecological threshold of the compaction effect ($q_{эк}$)

при влажности почвы не более 23% экологический порог нормального давления не должен превышать 250-300 кПа. Критический порог уплотнения – 1,34-1,40 г/см³, при этом прирост сопротивления почвы обработке в следе движителя приближается к своему предельному значению. Найденная эмпирическая за-

висимость реально описывает изменения физических свойств почвы под воздействием нормальных нагрузок от движителей машин и может быть использована

для расчета прироста сопротивления почвы обработке для суглинистых и глинистых лугово-черноземных почв в пахотном горизонте.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Русанов В.А. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения. М.: ВИМ. 1998. 368 с.
2. Гуськов В.В., Велеев Н.Н., Атоманов Ю.Е. Тракторы. М.: Машиностроение. 1988. 376 с.
3. Захарова Е.Б. Структура и продуктивность соевого агрофитоценоза в зависимости от уплотнения почвы // *Земледелие*. 2010. N7. С. 39-40.
4. Щитов С.В. Пути снижения техногенного воздействия колесной энергетики в условиях Дальнего Востока: монография. Благовещенск: ДальГА. 2004. 212 с.
5. Панасюк А.Н., Кашбулгаев Р.А., Липкань А.В. Методологические основы оценки экологической и энергетической эффективности технологических систем в растениеводстве // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2017. N91. С. 55-63.
6. Гуреев И.И. Экологические последствия применения комплексов машин для механизации обработки почвы // *До-*

1. *стижения науки и техники АПК*. 2015. Т. 29. N8. С. 77-79.
7. Гуреев И.И., Климов Н.С. Обоснование критерия регионального нормирования механической нагрузки на почву при комплексной механизации агротехнологий // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2017. N2. С. 35-80.
8. Hunger R. Bodenverdichtung: Prävention vor Regeneration. *Schweizer Landtechnik*. 2012. 74, Aug. 46-48.
9. Buliński J., Leszczyński Ł. Effect of multiple passages and the wheel load on soil deformation. *Annals of Warsaw University of Life Sciences*. 2012. N59. 5-12.
10. Емельянов А.М., Бумбар И.В., Канделя М.В., Рябченко В.Н. Гусеничные зерно- и кормоуборочные комбайны. Основы теории и конструктивно-технологические устройства: монография. Благовещенск: ДальГАУ. 2013. 285 с.
11. Eugene G. Exclusive test reveal power loss. *Farm and Power Equipment*. 1995. Vol. 42. N1. 4-6.

REFERENSIS

1. Rusanov V.A. Problema pereuplotneniya pochv dvizhiteleyami i effektivnye puti ee resheniya [The problem of overpopulation of soils by propellers and the effective ways to solve it]. Moscow: VIM. 1998. 368 (In Russian).
2. Gus'kov V.V., Veleev N.N., Atoomanov Yu.E. Traktory [Tractors]. Moscow: Mashinostroenie. 1988. 376 (In Russian).
3. Zakharova E.B. Struktura i produktivnost' soevogo agrofytotsenoza v zavisimosti ot uplotneniya pochvy [The structure and productivity of soybean agrophytocenosis depending on soil compaction]. *Zemledelie*. 2010. N7. 39-40 (In Russian).
4. Shchitov S.V. Puti snizheniya tekhnogennoego vozdeystviya kolesnoy energetiki v usloviyakh Dal'nego Vostoka: monografiya [Ways to reduce the technogenic impact of wheeled energy in the Far East: monograph]. Blagoveshchensk: Dal'GA. 2004. 212 (In Russian).
5. Panasyuk A.N., Kashbulgayanov R.A., Lipkan' A.V. Metodologicheskie osnovy otsenki ekologicheskoy i energeticheskoy effektivnosti tekhnologo-tekhnicheskikh sistem v rastenievodstve [Foundations for Assessing the Environmental and Energy Efficiency of Technological and Technical Systems in Crop Production]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2017. N91. 55-63 (In Russian).
6. Gureev I.I. Ekologicheskie posledstviya primeneniya kom-

1. *pleksov mashin dlya mekhanizatsii obrabotki pochvy* [Environmental consequences of the use of machine complexes for the mechanization of soil tillage]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2015. Vol. 29. N8. 77-79 (In Russian).
7. Gureev I.I., Klimov N.S. Obosnovanie kriteriya regional'nogo normirovaniya mekhanicheskoy nagruzki na pochvu pri kompleksnoy mekhanizatsii agrotekhnologiy [Substantiation of the criterion for regional rationing of mechanical load on the soil with integrated mechanization of agricultural technologies]. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2017. N2. 35-80 (In Russian).
8. Hunger R. Bodenverdichtung: Prävention vor Regeneration. *Schweizer Landtechnik*. 2012. 74, Aug. 46-48.
9. Buliński J., Leszczyński Ł. Effect of multiple passages and the wheel load on soil deformation. *Annals of Warsaw University of Life Sciences*. 2012. N59. 5-12.
10. Emel'yanov, A.M., Bumbar I.V., Kandelya M.V., Ryabchenko V.N. Gusenichnye zerno- i kormouborochnye kombayny. Osnovy teorii i konstruktivno-tekhnologicheskie ustroystva: monografiya [Caterpillar grains- and fodder harvesters. Fundamentals of theory and structural and technological devices: monograph]. Blagoveshchensk: Dal'GAU. 2013. 285 (In Russian).
11. Eugene G. Exclusive test reveal power loss. *Farm and Power Equipment*. 1995. Vol. 42. N1. 4-6.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

**Статья поступила в редакцию 30.07.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 30.07.2020**

**Статья принята к публикации 16.11.2020
The paper was accepted
for publication on 16.11.2020**