

УДК 631.3.02: 631.4

## ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ХОДОВЫМ СИСТЕМАМ АВТОМОБИЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

**И.Н. Шило,**

*ректор БГАТУ, докт. техн. наук, профессор*

**Н.Н. Романюк,**

*первый проректор БГАТУ, канд. техн. наук, доцент*

**А.Н. Орда,**

*зав. каф. теоретической механики и теории механизмов и машин БГАТУ, докт. техн. наук, профессор*

**В.А. Шкляревич,**

*ст. преподаватель каф. теоретической механики и теории механизмов и машин БГАТУ*

**А.С. Воробей,**

*ст. науч. сотр. РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», канд. техн. наук*

**Ян Радослав Каминьски,**

*докт. с.-х. наук (Варшавский университет естественных наук)*

*В статье на основании норм допустимого воздействия двигателей на почву, регламентированных соответствующими ГОСТами, и закономерностей, описывающих процессы слеодообразования, рассчитаны показатели уплотняющего воздействия колес автомобилей МАЗ и дана их оценка на соответствие допустимым нормам. Обоснованы рекомендации по снижению глубины следа от воздействия ходовых систем автомобилей на почву.*

*Ключевые слова: автомобиль, ходовая система, сдвоенные колеса, почва, давление, напряжение, глубина следа, плотность почвы.*

*The indicators of the sealing effect of the wheels of MAZ automobiles are calculated and their assessment is made for compliance with permissible norms on the basis of the permissible impact norms of thrusters on the soil, regulated by the corresponding State Standards, and regularities describing the processes of trace formation. Recommendations to reduce the depth of the trail from the impact of road systems of cars on the ground are substantiated.*

*Keywords: automobile, suspension system, twin wheels, soil, pressure, stress, depth of the track, soil density.*

### Введение

Воздействие ходовых систем мобильных машин ведет к увеличению плотности почвы. Так, плотность пахотных слоев почвы под воздействием ходовых систем машинно-тракторных агрегатов возрастает до  $1550 \text{ кг/м}^3$ , в то время как оптимальная плотность для возделывания сельскохозяйственных культур составляет –  $1000\text{-}1350 \text{ кг/м}^3$ . Плотность подпахотных слоев почвы достигает величины –  $1650 \text{ кг/м}^3$ , близкой к критической [1]. Чрезмерное уплотнение почвы приводит к снижению урожайности сельскохозяйственных культур, повышению затрат энергии и расхода топлива, уменьшению производительности при обработке почвы.

К настоящему времени рядом ведущих научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений стран СНГ разработаны нормативы по допустимому воздействию двигателей сельскохозяйственной техники на почву, представленные в виде ГОСТов,

регламентирующих их максимальное давление на почву и напряжение в почве на глубине  $0,5 \text{ м}$  [2].

Цель работы – определить показатели уплотняющего воздействия колес автомобилей МАЗ, согласно ГОСТам, нормирующим допустимый уровень воздействия на почву, и обосновать требования к их ходовым системам при использовании в сельском хозяйстве.

### Основная часть

Рассчитаем согласно ГОСТу 26953-86 геометрические параметры взаимодействия протектора шины колеса с жестким основанием и с почвой. Площадь контакта шины с почвой, приведенную к условиям работы на почвенном основании  $S_{\text{кп}}$ , определим по зависимости [3]:

$$S_{\text{кп}} = S_{\text{кж}} \cdot k_D, \quad (1)$$

где  $S_{\text{кж}}$  – контурная площадь контакта шины с жестким основанием,  $\text{м}^2$ ;

$k_d$  – коэффициент, зависящий от наружного диаметра  $D_{ш}$  шины колеса,  $k_d = 1,1-1,6$  [4].

Контурную площадь контакта шины с жестким основанием  $S_{кж}$  определим согласно методике [5] по формуле:

$$S_{кж} = \alpha_{ш} \cdot \pi \cdot a_k \cdot b_k, \quad (2)$$

где  $\alpha_{ш}$  – коэффициент,  $\alpha_{ш} = 0,98-1,04$  [5];

$a_k$  – половина длины контакта протектора шины с жестким основанием, м;

$b_k$  – половина ширины контакта протектора шины с жестким основанием, м

Половина длины контакта протектора шины с жестким основанием:

$$a_k = k_{ш1} \sqrt{D_{ш1} \cdot [h_{ш1}] - [h_{ш1}]^2}, \quad (3)$$

где  $k_{ш1}$  – коэффициент, зависящий от типа шины и наружного диаметра  $D_{ш}$  шины колеса,  $k_{ш1} = 0,7-0,81$  [5];

$D_{ш}$  – наружный диаметр шины колеса, м;

$[h_{ш}]$  – допустимая деформация шины, м:

$$[h_{ш}] = [\lambda_{ш}] \cdot H_{ш}, \quad (4)$$

где  $[\lambda_{ш}]$  – относительная допустимая деформация шины для тракторов и сельскохозяйственных машин,  $[\lambda_{ш}] = 0,14-0,19$  [6];

$H_{ш}$  – высота профиля шины, м.

Половина ширины контакта протектора шины с жестким основанием:

$$b_k = \sqrt{B_{ш1} \cdot [h_{ш1}] - [h_{ш1}]^2}, \quad (5)$$

где  $B_{ш}$  – ширина протектора шины колеса, м.

Используя зависимости (1) ... (5), рассчитаем геометрические параметры взаимодействия шин ко-

лес автомобилей МАЗ с жестким основанием и почвой, и отразим их в таблице 1. При расчетах наружный  $D_{ш}$  и внутренний  $d_{ш}$  диаметры шины колеса, ширину протектора шины колеса  $B_{ш}$  и высоту профиля шины  $H_{ш}$  определяли согласно характеристикам завод-изготовителей шин [7].

Значения режимов нагружения и параметров колес автомобилей определены на основании публикаций [8, 9].

Полученные расчетные значения геометрических размеров взаимодействия шин с жестким основанием и почвой используем для определения величин, характеризующих процесс слеодообразования при воздействии ходовых систем автомобилей на почву и сравним с допустимыми значениями разработанных рекомендаций по эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники. К таким величинам относятся нормируемые по ГОСТу 26955-86: максимальное давление  $q_{max}$  колесного движителя на почву, максимальное нормальное напряжение в почве на глубине – 0,5 м ( $\sigma_{0,5}$ ). Определим также глубину следа  $h$ , плотность верхнего слоя почвы в следе  $\rho$  и глубину проникновения деформации в почве  $x_h$ .

Среднее давление единичного колесного движителя на почву при наибольшей эксплуатационной массе [3]:

$$q_{cp} = \frac{G_k}{S_{кп}}, \quad (6)$$

где  $G_k$  – статическая нагрузка на почву единичным колесным движителем, Н.

Максимальное давление колесного движителя на почву равно [3]:

$$q_{max} = q_{cp} \cdot k_{ш2}, \quad (7)$$

**Таблица 1. Геометрические параметры взаимодействия колес автомобилей МАЗ с основанием**

Марка автомобиля	Обозначение и маркировка шин		Параметры шин					Расчетные параметры взаимодействия шин с основанием			
			$D_{ш}$ , м	$d_{ш}$ , м	$B_{ш}$ , м	$H_{ш}$ , м	$[h_{ш}]$ , м	$a_k$ , м	$b_k$ , м	$S_{кж}$ , м <sup>2</sup>	$S_{кп}$ , м <sup>2</sup>
МАЗ-5516	передняя ось	Бел-116 12.00R20	1,112	0,508	0,313	0,302	0,048	0,159	0,113	0,056	0,079
	задняя ось	Бел-116 12.00R20	1,112	0,508	0,313	0,302	0,048	0,170	0,113	0,060	0,078
МАЗ-5516	передняя ось	Бел-95 16.00R20	1,343	0,508	0,44	0,418	0,067	0,219	0,158	0,109	0,141
	задняя ось	Бел-95 16.00R20	1,112	0,508	0,44	0,302	0,048	0,181	0,138	0,078	0,086
МАЗ-5551	передняя ось	Бел-116 12.00R20	1,112	0,508	0,313	0,302	0,048	0,170	0,113	0,060	0,078
	задняя ось	Бел-116 12.00R20	1,112	0,508	0,313	0,302	0,048	0,181	0,113	0,064	0,071
МАЗ-6517	передняя ось	Бел-95 16.00R20	1,343	0,508	0,44	0,418	0,067	0,219	0,158	0,109	0,141
	задняя ось	Бел-95 16.00R20	1,343	0,508	0,44	0,418	0,067	0,234	0,158	0,116	0,127
МАЗ-6517	передняя ось	Бел-66А 525/70R21	1,285	0,533	0,525	0,376	0,060	0,217	0,167	0,114	0,137
	задняя ось	Бел-66А 525/70R21	1,285	0,533	0,525	0,376	0,060	0,217	0,167	0,114	0,125

где  $q_{cp}$  – среднее давление колеса на почву, кПа;  
 $k_{m2}$  – коэффициент продольной неравномерности распределения давления по площади контакта шины с почвой,  $k_{m2} = 1,5$ .

Нормируемое максимальное нормальное напряжение в почве на глубине 0,5 м определяем по формуле [4]:

$$\sigma_{0,5} = 0,637 \cdot q_{cp} \cdot \left[ \arctg \left( \frac{a_k \cdot b_k}{0,5 \sqrt{a_k^2 + b_k^2 + 0,5^2}} \right) + \frac{0,5 \cdot a_k \cdot b_k (a_k^2 + b_k^2 + 2 \cdot 0,5^2)}{(a_k^2 + 0,5^2)(b_k^2 + 0,5^2) \sqrt{a_k^2 + b_k^2 + 0,5^2}} \right] \cdot (8)$$

При воздействии на почву ходовых систем деформация почвы  $h$  растет не только из-за ее уплотнения, но и в результате выдавливания частиц почвы из-под движителя с образованием валов выпирания. В конце фазы уплотнения под движителем начинает формироваться ядро уплотнения почвы, имеющее форму конуса, основанием которого служит опорная поверхность движителя, которое в дальнейшем и выдавливает почву в стороны.

В результате воздействия колес на почву образуются зоны уплотнения и зоны сдвигов в поперечной (рис. 1а) и продольной (рис. 1б) вертикальных плоскостях к направлению движения автомобиля.

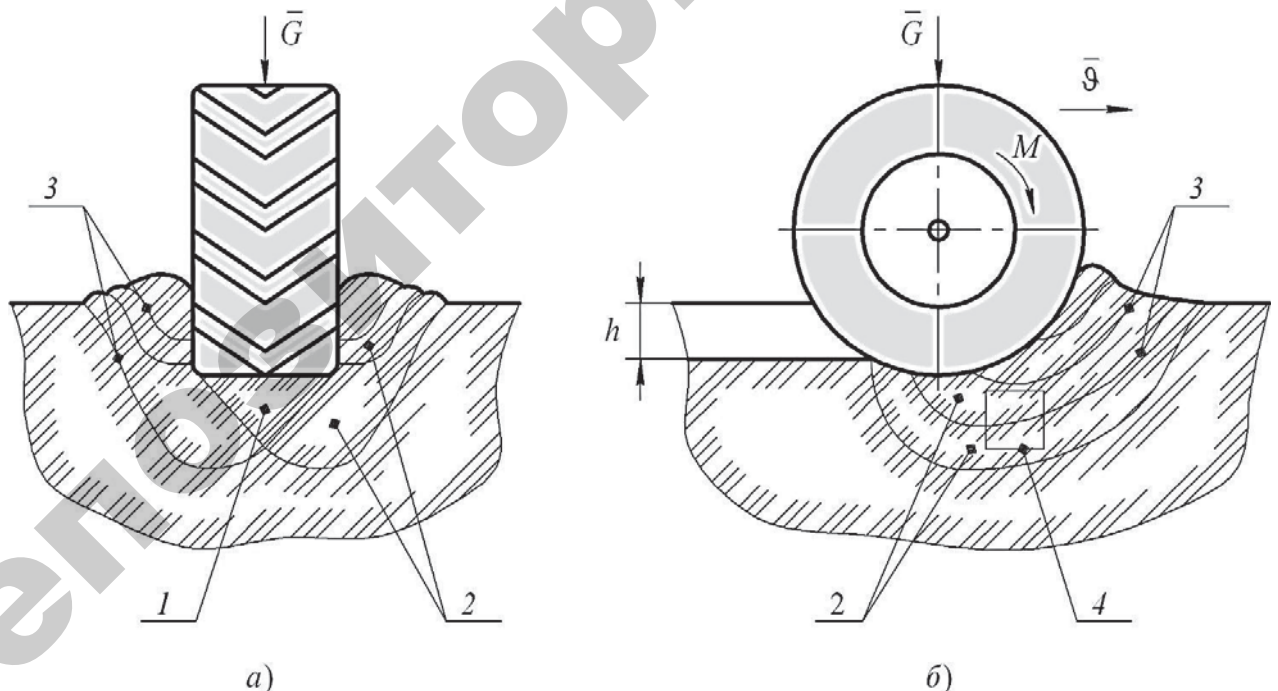


Рис. 1. Схема образования уплотненной зоны в почве под движителем в поперечной (а) и продольной (б) плоскостях к направлению движения автомобиля: 1 – ядро уплотнения; 2 – зоны пластических деформаций; 3 – поверхности скольжения; 4 – кубик почвы

Для определения глубины следа колесного движителя при однократном нагружении в случае, когда опорным основанием является почва с одинаковыми по глубине физико-механическими свойствами (стерня), воспользуемся зависимостью гиперболического тангенса между деформацией и напряжением почвы, предложенной В.В. Кацыгиным [10]:

$$h = \frac{p_0}{k} \operatorname{Arth} \left( \frac{\sigma}{p_0} \right), \quad (9)$$

где  $\sigma$  – контактное напряжение в почве под колесом, кПа;

$p_0$  – предел несущей способности почвы, кПа;

$k$  – коэффициент объемного смятия почвы, кН/м<sup>3</sup>.

Плотность почвы с одинаковыми по глубине физико-механическими свойствами в следе после прохода колеса найдем по зависимости [11]:

$$\rho = \rho_0 \left( 1 + \frac{\beta}{k} \sigma \right), \quad (10)$$

где  $\rho_0$  – плотность верхнего слоя почвы до нагружения, кг/м<sup>3</sup>;

$\beta$  – коэффициент распределения напряжений в почве, зависящий от свойств почвы и размеров колес, м<sup>-1</sup> [11].

В зависимости (9), (10) входит коэффициент объемного смятия почвы, который определим аналитическим путем. При сдвигании колес возрастает их ширина опорной поверхности, из-за чего изменяется коэффициент объемного смятия  $k$ , который зависит

как от свойств почвы, так и размеров колес, что выражается следующей зависимостью [11]:

$$k_j = k_i \sqrt{\frac{D_{ши} \cdot B_{ши}}{D_{шj} \cdot B_{шj}}}, \quad (11)$$

где  $k_i$  – коэффициент объемного смятия почвы для колеса, оборудованного шиной с размерами  $D_{ши}$  и  $B_{ши}$ , кН/м<sup>3</sup>;

$k_j$  – коэффициент объемного смятия почвы для колеса, оборудованного шиной с размерами  $D_{шj}$  и  $B_{шj}$ , кН/м<sup>3</sup>.

Глубину проникновения уплотнения под воздействием колес определим из зависимости [11]:

$$x_h = \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{\sigma}{\sigma_{упр}} \right), \quad (12)$$

где  $\sigma_{упр}$  – напряжение, которое соответствует условиям развития в его зоне действия только упругих деформаций почвы, Па. Его значение обусловлено свойствами почвы и колеблется в пределах 5-20 кПа;

Влияние параметров шин на величину коэффициента распределения напряжений определяется по формуле:

$$\beta_j = \beta_i \sqrt{\frac{D_{ши} \cdot B_{ши}}{D_{шj} \cdot B_{шj}}}, \quad (13)$$

где  $\beta_i$  – коэффициент распределения напряжений в почве для колеса, оборудованного шиной с размерами  $D_{ши}$  и  $B_{ши}$ , м<sup>-1</sup>;

$\beta_j$  – коэффициент распределения напряжений в почве для колеса, оборудованного шиной с размерами

ми  $D_{шj}$  и  $B_{шj}$ , м<sup>-1</sup>.

Результаты показателей воздействия колес автомобилей МАЗ на почву по формулам (6)-(13) представлены в таблице 2.

Анализ результатов, приведенных в таблице 2, показывает, что автомобили МАЗ не соответствуют допустимым нормам воздействия их движителей из-за превышения значений максимального давления  $q_{max}$  колесного движителя на почву и нормальных напряжений в почве на глубине – 0,5 м.

На процесс слеодообразования колесными системами автомобилей влияют как реологические факторы (время запаздывания деформации, период релаксации), так и неизучаемые в реологии явления, связанные с переукладкой частиц почвы при повторных нагружениях. Определим закономерность нарастания осадки сильно упрочняющихся почв при повторных нагружениях (рис. 2).

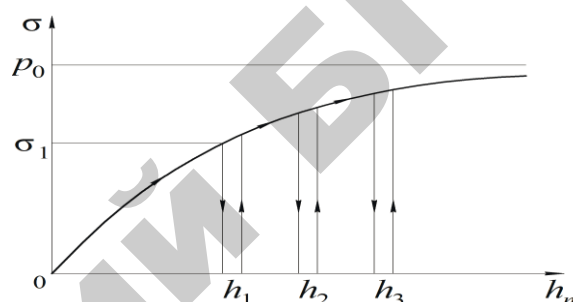


Рис. 2. Закономерности накопления повторных осадок для упрочняющихся связных почв под воздействием многоосной ходовой системы

Согласно зависимости Больцмана, энтропия процесса  $S$  пропорциональна логарифму вероятности данного состояния  $W$  (статистическая интерпретация

Таблица 2. Показатели воздействия колес автомобилей МАЗ на почву

Марка автомобиля	Обозначение и маркировка шин		Значения показателей воздействия						
			$G_k$ , кН	$q_{ср}$ , кПа	$q_{max}$ , кПа	$\sigma_{0,5}$ , кПа	$x_h$ , м	$h$ , м	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
МАЗ-5516	передняя ось	Бел-116 12.00R20	35,7	452,5	678,8	55,1	0,67	0,118	1678
	задняя ось	Бел-116 12.00R20	33,0	420,4	630,6	54,3	0,69	0,066	1476
МАЗ-5516	передняя ось	Бел-95 16.00R20	35,7	252,9	379,4	53,8	0,70	0,074	1511
	задняя ось	Бел-95 16.00R20	33,0	382,9	574,4	62,3	0,79	0,071	1460
МАЗ-5551	передняя ось	Бел-116 12.00R20	33,5	426,8	640,2	55,1	0,66	0,108	1657
	задняя ось	Бел-116 12.00R20	28,75	405,8	608,7	55,3	0,68	0,063	1470
МАЗ-6517	передняя ось	Бел-95 16.00R20	37,5	265,7	398,5	56,5	0,71	0,078	1522
	задняя ось	Бел-95 16.00R20	32,5	255,1	382,7	56,9	0,69	0,051	1407
МАЗ-6517	передняя ось	Бел-66А 525/70R21	37,5	274,1	411,1	60,8	0,77	0,087	1529
	задняя ось	Бел-66А 525/70R21	32,5	259,1	388,7	57,5	0,74	0,055	1408

второго начала термодинамики). При повторных деформациях вероятность  $W$  данного состояния увеличивается с ростом числа нагружений  $n$ . Тогда зависимость Больцмана примет вид [12]:

$$S = c_1 \cdot \ln n + c_2, \quad (14)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – постоянные величины.

Энтропия процесса деформации сильно упрочняющейся почвы выразится уравнением [12]:

$$S = c \cdot \frac{p_0^2}{k} \ln ch \left( \frac{k}{p_0} h \right), \quad (15)$$

где  $c$  – коэффициент, зависящий от свойств почвы.

После преобразований с учетом зависимостей (14) и (15) получена закономерность накопления повторных осадок для сильно упрочняющихся почв [13]:

$$h_n = \frac{p_0}{k} \cdot \text{Arch} \left( \frac{n^B}{\sqrt{1 - \sigma^2 / p_0^2}} \right), \quad (16)$$

где  $B$  – коэффициент накопления повторных осадок связанных почв;

$n$  – число нагружений, шт.

При повторных нагружениях слабо упрочняющихся почв с одинаковой по глубине плотностью рост напряжения от цикла к циклу незначительный, а нарастание осадки штампа весьма ощутимо (рис. 3). Нарастание осадки деформатора на таких почвах при повторных нагружениях подчиняется зависимости [13]:

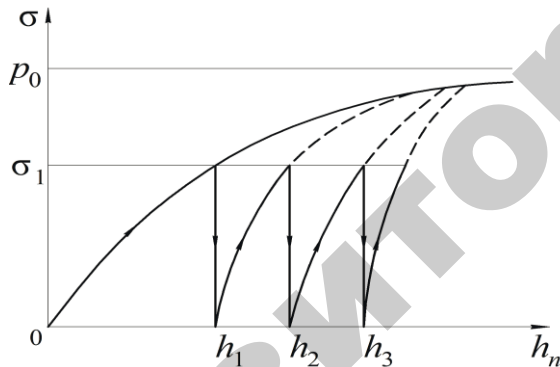


Рис. 3. Закономерности накопления повторных осадок для слабо упрочняющихся почв под воздействием многоосной ходовой системы

$$h_n = \frac{p_0}{k} (1 + k_u \cdot \lg n) \cdot \text{Arth} \left( \frac{\sigma}{p_0} \right), \quad (17)$$

где  $k_u$  – коэффициент интенсивности накопления необратимой деформации.

Зависимость между напряжением и повторными деформациями описывается кусочно-непрерывной функцией. Функция  $\sigma = f(h)$  при каждом повторном нагружении подчиняется зависимости гиперболического тангенса. Рассмотрим, чему равны при этом константы  $p_0$  и  $k$ . Сопротивление почвы при повторных нагружениях может уменьшаться, или увеличиваться по сравнению с первым приложением нагруз-

ки в зависимости от физико-механических свойств почвы и величины давления на нее. В соответствии с этим будут изменяться коэффициенты  $p_0$  и  $k$ . Снижение сопротивления происходит в том случае, если при первом нагружении структура почвы разрушается (особенно, когда верхние слои почвогрунта прочнее нижележащих). Несущая способность и коэффициент объемного смятия при этом уменьшаются. Увеличение сопротивления характерно для почв, способных к уплотнению и упрочнению структуры (почвы низкой влажности). Повторное деформирование в данном случае связано с преодолением сил трения покоя, которые превосходят по величине силы трения скольжения.

Напряжение  $\sigma_n$  в конце каждого цикла нагружения равно напряжению  $\sigma_1$ , развиваемому в конце первого цикла. Исходя из этого, найдем условный коэффициент объемного смятия почвы [11]:

$$k_{yn} = \frac{p_0}{\Delta h_n} \text{Arth} \left( \frac{\sigma_1}{p_0} \right).$$

Приращение осадки при  $n$ -м приложении нагрузки равно:

$$\Delta h_n = k_u \cdot \lg \frac{n}{n-1} \cdot \frac{p_0}{k} \text{Arth} \left( \frac{\sigma_1}{p_0} \right).$$

Проанализируем, как влияют параметры ходовой системы (давление, количество осей, нагрузка, приходящаяся на ходовую систему, размеры колес) на слеодообразование.

В случае изменения давления в зависимости, обратно пропорциональной количеству осей  $N$ , глубина следа для сильно упрочняющихся почв определяется из зависимости (16)

$$H_N = \frac{p_0}{k} \cdot \text{Arch} \frac{N^{b \cdot k / p_0}}{\sqrt{1 - (\xi \cdot Q / F_k \cdot N \cdot p_0)^2}}, \quad (18)$$

где  $\xi$  – коэффициент, учитывающий закономерность распределения давлений под опорной поверхностью колеса.

Из рис. 4, построенного на основании зависимости (18), видно, что при увеличении количества осей многоосной ходовой системы глубина следа уменьшается.

Для слабо упрочняющихся почв эффект уменьшения глубины следа и уплотнения почвы при увеличении количества осей снижается по сравнению со слеодообразованием на сильно упрочняющихся почвах.

Рассмотрим, с каким количеством осей движитель предпочтительнее по слеодообразованию при одинаковом давлении. В этом случае размеры колес будут увеличиваться при уменьшении числа осей. Отношение диаметра колеса к ширине  $D/B$  принимаем постоянным. Так как диаметры подобных колес соотносятся между собой как и длины площадей контакта, то размеры колес  $D$  и  $B$  находятся в следующей зависимости от количества осей:

$$D_1 = \sqrt{N} \cdot D_N, \quad B_1 = \sqrt{N} \cdot B_N, \dots, D_{N-1} = \sqrt{N / (N-1)} \cdot D_N$$

$$B_{N-1} = \sqrt{N / (N-1)} \cdot B_N, \quad (19)$$

где  $N$  – число осей ходовой системы, шт.

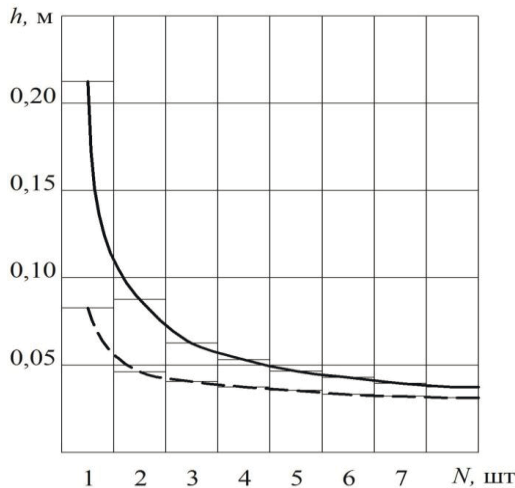


Рис. 4. Зависимость глубины следа сильно упрочняющейся почвы от числа осей:

— при  $\xi \cdot Q / F_k \cdot p_0 = 0,8$ ;  
- - - при  $\xi \cdot Q / F_k \cdot p_0 = 0,4$ .

Увеличение размеров колеса у ходовых систем при уменьшении числа осей приводит к снижению коэффициента объемного смятия. Коэффициент объемного смятия почвы  $k$ , приведенный к размерам колеса, равен:

$$k = \frac{k'}{100 \cdot \sqrt{B \cdot D}}, \quad (20)$$

где  $k'$  – коэффициент объемного смятия, определяемый с помощью твердометра, Н/м<sup>3</sup>;  $B$  и  $D$  – размеры колеса, м.

На основании зависимости (20) находим

$$k' = 100 \cdot k_1 \sqrt{D_1 \cdot B_1} = 100 \cdot k_2 \sqrt{D_2 \cdot B_2} = \dots = 100 \cdot k_N \sqrt{D_N \cdot B_N}$$

Тогда, если при воздействии на почву колес  $N$ -осного движителя коэффициент объемного смятия  $k_N$  известен, для колес одно-, двух- и  $(N - 1)$ -осного хода он определится по следующим формулам:

$$k_1 = k_N \sqrt{\frac{D_N \cdot B_N}{D_1 \cdot B_1}}, k_2 = k_N \sqrt{\frac{D_N \cdot B_N}{D_2 \cdot B_2}}, \dots,$$

$$k_{N-1} = k_N \sqrt{\frac{D_N \cdot B_N}{D_{N-1} \cdot B_{N-1}}}$$

или, с учетом равенств (19)

$$k_1 = k_N \sqrt{\frac{1}{N}}, k_n = k_N \sqrt{\frac{n}{N}}, \dots, k_{N-1} = k_N \sqrt{\frac{N-1}{N}}. \quad (21)$$

Подставив полученные выражения в формулу (16), получаем зависимость для определения глубины следа сильно упрочняющихся почв в зависимости от числа осей

$$h_n = \frac{p_0}{k} \sqrt{\frac{N}{n}} \cdot \text{Arch} \left( \frac{n^{b(k_N/p_0^2) \cdot \sqrt{n/N}}}{\sqrt{1 - q^2 / p_0^2}} \right), \quad (22)$$

В данной формуле через  $N$  обозначено максимальное количество осей ходовой системы, а через  $n$  – количество осей сравниваемых систем ( $n$  изменяется от 1 до  $N$ ).

Для слабо упрочняющихся почв глубина следа будет равна

$$h_n = \frac{p_0}{k} \cdot \sqrt{N/n} \cdot \text{Arth} \frac{q}{p_0} (1 + k_u \cdot \lg N). \quad (23)$$

Из рис. 5, построенного по зависимостям (22) и (23), видно, что для сильно упрочняющихся почв для уменьшения глубины следа целесообразнее увеличивать количество осей ходовой системы по сравнению

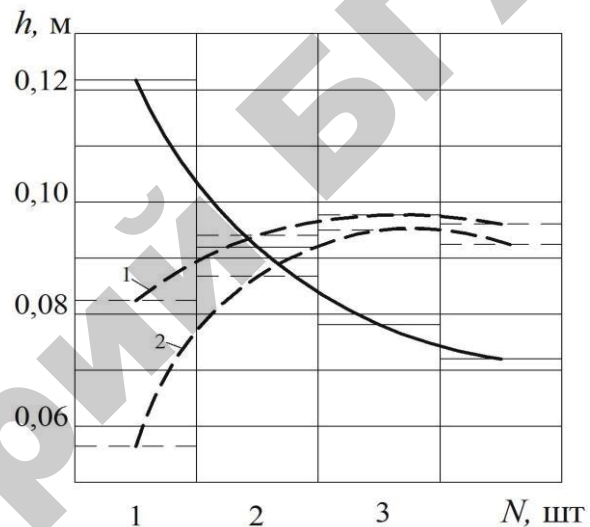


Рис. 5. Нарастание глубины следа при одинаковом давлении:

— — — — — сильно упрочняющаяся почва;  
- - - - - слабо упрочняющаяся почва;  
кривая 1 – при  $k_u = 2$ ; кривая 2 – при  $k_u = 4$

с размерами колес. Для увлажненных слабо упрочняющихся почв ( $k_u = 2$ ) одинаково эффективным для снижения слеодообразования является увеличение количества осей и опорной поверхности колес. Для переувлажненных почвогрунтов ( $k_u = 4$ ) эффективнее увеличение размеров колес ходовых систем.

Задачу снижения уплотняющего воздействия автомобилей при его движении по почвам и сокращения затрат энергии на передвижение предложено решить установкой дополнительных выдвигаемых колес [14]. Установка по обоим бокам основного колеса 1 дополнительных выдвигаемых колес 2, управляемых гидросистемой транспортного средства, шириной  $b_{м2} = 1,0 \dots 1,5 b_{м1}$  и диаметром  $d_{м2} = 0,2 \dots 0,25 d_{м1}$  (рис. 6) позволяет уменьшить глубину следа и повысить проходимость автомобилей за счет устранения выпирания почвы по краям следа основного колеса 1 и увеличения ширины контакта колесного движителя с почвой на величину  $2b_{м}$ .

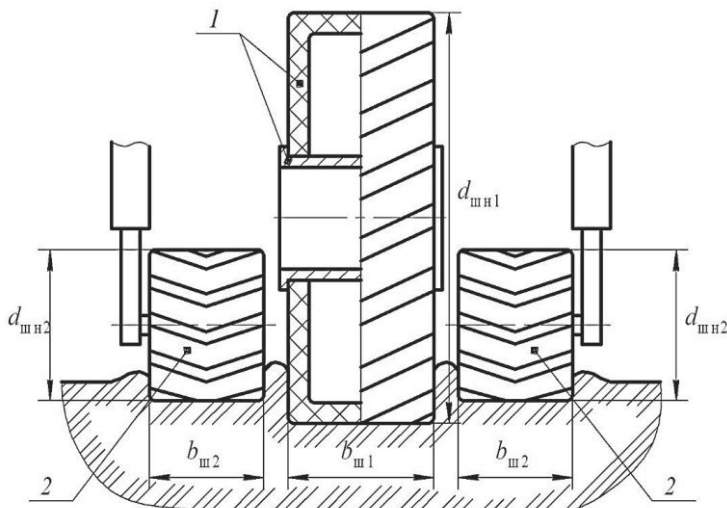


Рис. 6. Колесо транспортного средства повышенной проходимости [14]: 1 – основное колесо; 2 – дополнительные выдвигающиеся колеса

### Заключение

При воздействии на почву колес автомобилей МАЗ рассмотренных модификаций, максимальное давление  $q_{max}$  колесного движителя на почву и напряжения в ней на глубине 0,5 м превышают величины, допускаемые ГОСТом.

Для снижения глубины следа (под воздействием колес автомобилей) сильно упрочняющейся почвы рекомендуется увеличение числа осей при сохранении постоянной нагрузки на ходовую систему.

Для слабо упрочняющейся почвы низкой влажности, для снижения глубины следа, при сохранении постоянного давления, также эффективно увеличение числа осей, а для переувлажненной почвы – увеличение размеров колес.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву: ГОСТ 26955-86. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 7 с.
3. Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву: ГОСТ 26953-86. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 18 с.
4. Техника сельскохозяйственная мобильная. Метод определения максимального нормального

напряжения в почве: ГОСТ 26954-86. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 5 с.

5. Гедроить, Г.И. Допустимый уровень воздействия ходовых систем сельскохозяйственной техники на почву / Г.И. Гедроить, Ю.И. Томкунас, А.Д. Четкин // Агропанорама. – 2013. – № 5. – С. 10-15.

6. Чигарев, Ю.В. Земледельческая механика / Ю.В. Чигарев, А.Н. Орда, Г.А. Лазарев. – Мн.: БГАТУ, 1994. – 76 с.

7. Каталог продукции предприятия «Белшина» [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

[www.belshinajsc.by/catalog/shiny-dlya-tractorov-i-selskokhozyaystvennykh-mashin](http://www.belshinajsc.by/catalog/shiny-dlya-tractorov-i-selskokhozyaystvennykh-mashin). – Дата доступа: 11.12.2018.

8. Бобровник, А.И. О применении автомобилей МАЗ в агропромышленном комплексе Республики Беларусь / А.И. Бобровник, Ю.М. Жуковский, В.В. Михалков // Агропанорама. – 2012. – № 4. – С. 2-7.

9. Гедроить, Г.И. Применение автомобильной техники в полевых условиях / Г.И. Гедроить, В.В. Михалков // Инновационные технологии в производстве сельскохозяйственной продукции: материалы междунар. науч.-практич. конф., Минск, 2-3 июня 2015 г. – Минск: БГАТУ. – 2015. – С. 33-37.

10. 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.

11. Орда, А.Н. Эколого-энергетические основы формирования машинно-тракторных агрегатов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03 / А.Н. Орда; Белорус. аграр. техн. ун.-т. – Минск, 1997. – 36 с.

12. Шило, И.Н. Закономерности накопления повторных осадков при воздействии ходовых систем мобильной сельскохозяйственной техники / И.Н. Шило, Н.Н. Романюк, А.Н. Орда, В.А. Шкляревич, А.С. Воробей // Агропанорама. – 2014. – № 6. – С. 2-7.

13. Шило, И.Н. Влияние почвенных условий на формирование машинно-тракторных агрегатов / И.Н. Шило, А.Н. Орда, Н.А. Гирейко, А.Б. Селешы // Агропанорама. – 2006. – № 1. – С. 7-11.

14. Транспортное средство повышенной проходимости: пат. 18340 Респ. Беларусь, МПК В 60В 11/02/ А.Н. Орда, В.А. Агейчик, В.А. Шкляревич, О.В. Ляхович, А.С. Воробей; заяв. Белор. гос. аграр. техн. ун.-т. – № а 20111434; заявл. 28.10.11; опубл. 30.06.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектаул. уласнасці. – 2013. – № 3.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 03.01.2019