

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЛЕДООБРАЗОВАНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ХОДОВЫХ СИСТЕМ

А.Н. Орда, докт. техн. наук, доцент, А.Б. Селеша, канд. техн. наук,  
С. В. Алешкевич, аспирант, (УО БГАТУ)

### Аннотация

*В статье приводится исследование воздействия на почву тракторов со сдвоенными колесами и тандемом колес. На основании проведенного анализа предложены рекомендации по компоновке ходовых систем. Также приведены результаты исследования зависимости глубины следа от высоты слоя почвы.*

### Введение

Физические свойства почв определяют их плодородие. Поэтому проблема сохранения агрофизических свойств почв на необходимом уровне становится особенно актуальной в связи с уплотняющим воздействием ходовых систем тракторов и сельскохозяйственных машин.

Оптимальные значения плотности основных типов почв в зависимости от выращиваемой сельскохозяйственной культуры следующие: 1100 – 1250 кг/м<sup>3</sup> – суглинистые и глинистые, 1250 – 1400 кг/м<sup>3</sup> – супесчаные.

В настоящее время при интенсивном использовании машинно-тракторных агрегатов происходит переуплотнение почвы ходовыми системами. Плотность почвы в следах тракторов и сельскохозяйственных машин составляет 1350 – 1600 кг/м<sup>3</sup>, что значительно превышает оптимальную.

Чрезмерное уплотнение почвы при воздействии на нее ходовых систем машинно-тракторных агрегатов ведет к снижению урожайности сельскохозяйственных культур. Урожайность зерновых в следах тракторов снижается на 10-15%, а корнеклубнеплодов – на 20-30%. При этом влияние уплотняющего воздействия ходовых систем на снижение урожайности проявляется в последующие несколько лет.

### Основная часть

Энергонасыщенность тракторов и производительность МТА на их базе в последнее время значительно выросли. Изменился и уровень воздействия ходовых систем этих тракторов на почву. Если масса гусеничных тракторов при увеличении мощности практически не выросла, то масса колесных тракторов значительно повысилась. Для развития одного и того же тягового усилия колесные тракторы должны иметь большую массу, чем гусеничные. Это объясняется тем, что площадь опорной поверхности колес меньше, чем у гусениц.

Рассмотрим, как различаются весовые характеристики гусеничных и колесных тракторов при развитии одного и того же тягового усилия. Для количественной оценки трансформации веса трактора в тяговое усилие применяется следующая формула [1, ф. (65)]:

$$\varphi_{кр} = \frac{P_{кр}}{G_{тр}}, \quad (1)$$

где  $\varphi_{кр}$  – коэффициент использования веса;

$P_{кр}$  – крюковое усилие, Н;

$G_{тр}$  – вес трактора, Н.

Крюковое усилие равно разности касательной силы тяги  $P_k$  и силы сопротивления качения  $P_f$ :

$$P_{кр} = P_k - P_f. \quad (2)$$

Касательная сила тяги колеса  $P_k$  зависит от веса  $G_k$ , приходящегося на колесо, и коэффициента сцепления  $\varphi$ :

$$P_k = G_k \cdot \varphi. \quad (3)$$

Сила сопротивления качения колеса  $P_f$  равна:

$$P_f = f \cdot G_k, \quad (4)$$

где  $f$  – коэффициент сопротивления качению.

На основании известных в теории трактора зависимостей (1), (4) получено следующее значение коэффициента использования веса [1, ф. (67)]:

$$\varphi_{кр} = \varphi - f. \quad (5)$$

Коэффициент использования веса  $\varphi_{кр}$  зависит от типа движителя и агрофона. При обработке множества тяговых испытаний тракторов получены следующие значения коэффициента на стерне (табл.) [1]:

Из зависимости (1) выразим вес трактора:

$$G_{тр} = \frac{P_{кр}}{\varphi_{кр}}. \quad (6)$$

**Коэффициент сцепного веса**

Тип и колесная формула трактора	Колесный		Гусеничный
	4К2	4К4	
Коэффициент использования веса $\varphi_{кр}$	0,37-0,39	0,4-0,45	0,5-0,6

Исходя из зависимости (6) и таблицы, найдем, что вес колесного трактора формулы 4К4 равен:

$$G_{кол} = \frac{P_{кр}}{0,45} \dots \frac{P_{кр}}{0,4} \quad (7)$$

Вес гусеничного трактора равен:

$$G_{гус} = \frac{P_{кр}}{0,6} \dots \frac{P_{кр}}{0,5} \quad (8)$$

Из зависимостей (7) и (8) видно, что для развития одного и того же крюкового усилия на стерне вес колесного трактора формулы 4К4 должен быть в 1,25-1,33 раза больше веса гусеничного трактора. Для развития одного и того же тягового усилия при использовании тракторов на почве, подготовленной под посев, соотношение весовых характеристик колесного и гусеничного трактора будет еще большим.

Таким образом, колесные тракторы с традиционной компоновкой ходовых систем будут производить на почву чрезмерное давление. Поэтому следует рассмотреть варианты компоновки ходовых систем с тандем-колесами и со сдвоенными шинами.

Рассмотрим, как изменяются глубина следа, уплотнение почвы и сопротивление качению при сдвигании колес и тандем – колесам.

Известна следующая зависимость коэффициента объемного смятия от размеров колес [2, с. 98]:

$$k_2 = k_1 \sqrt{\frac{D_1 \cdot B_1}{D_2 \cdot B_2}}, \quad (9)$$

где  $k_1$  – коэффициент объемного смятия для колес, оборудованных шиной размерами  $D_1$  и  $B_1$ , Н/м<sup>3</sup>;

$k_2$  – коэффициент объемного смятия для колес, оборудованных шиной размерами  $D_2$  и  $B_2$ , Н/м<sup>3</sup>.

По формуле (9) найдем коэффициент объемного смятия для колес со сдвоенными шинами 23,1R26:

$$k_2 = 2500 \sqrt{\frac{1,74 \cdot 0,75}{1,74 \cdot 2 \cdot 0,75}} = 1768 \frac{кН}{м^3}.$$

Определим площадь контакта шины 23,1R26 ведущего колеса с почвой, приведенную к условиям работы на почвенном основании  $F_{кп}$  по методике [3]:

$$F_{кп} = F_k \cdot k_D, \quad (10)$$

где  $F_k$  – контурная площадь контакта шины, для шины 23,1R26  $F_k = 0,271 \text{ м}^2$ ;

$k_D = 1,1-1,6$  – коэффициент, зависящий от наружного диаметра шины.

Из зависимости (10) определим  $F_{кп}$ :

$$F_{кп} = 0,271 \cdot 1,1 = 0,298 \text{ м}^2.$$

При максимально возможной нагрузке на колесо  $G_{max} = 46,93$ , кН среднее давление на одинарное колесо равно:

$$q_k = \frac{G_{max}}{F_{кп}} \quad (11)$$

$$q_k = \frac{G_{max}}{F_{кп}} = \frac{46,93}{0,298} = 157,5 \text{ кПа}.$$

Максимальное давление колеса на почву  $q_k$  равно:

$$q_k = q_k \cdot k_l, \quad (12)$$

где  $k_l = 1,5$  – коэффициент продольной неравномерности распределения давления по площади контакта шины.

$$q_k = 157,5 \cdot 1,5 = 236,2 \text{ кПа}.$$

Глубина следа под одинарным колесом:

$$h_k = \frac{p_0}{k_1} \text{Arth} \left( \frac{\sigma_1}{p_0} \right), \quad (13)$$

где  $\sigma_1$  – контактное напряжение при первом проходе колеса, Па;

$p_0$  – предел несущей способности почвы, Па.

$$h_k = \frac{500}{2500} \text{Arth} \left( \frac{236,2}{500} \right) = 0,102 \text{ м}.$$

Глубина следа под сдвоенным колесом равна:

$$h_{сд} = \frac{p_0}{k_2} \text{Arth} \left( \frac{\sigma_1}{2 \cdot p_0} \right) = \frac{500}{1768} \text{Arth} \left( \frac{236,2}{2 \cdot 500} \right) = 0,068 \text{ м}.$$

Глубину следа под тандем-колесами найдем из зависимости [4]:

$$h_N = \frac{P_0}{k} \text{Arth} \left( \frac{\sigma_1}{P_0} \right) (1 + k_u \lg N), \quad (14)$$

где  $h_N$  – осадка почвы для N-осного колесного движителя, м;

$k_u$  – коэффициент интенсивности накопления повторных осадок ( $k_u = 0,3$ );

$N$  – число циклов нагружения.

Подставив значения параметров формулы (14) получим:

$$h_2 = \frac{500}{2500} \text{Arth} \left( \frac{236,2}{2 \cdot 500} \right) \times (1 + 0,3 \cdot \lg 2) = 0,051 \text{ м}.$$

Плотность почвы в следе для одинарных колес найдем по зависимости [4]:

$$\rho = \rho_n \left( 1 + k_{пред} - \frac{k_e \cdot \beta}{k} \ln \frac{P_o}{\sigma + \sigma_0} \right), \quad (15)$$

где  $\rho_n$  – первоначальная плотность почвы, Па;

$k_e$  – коэффициент взаимосвязи параметров уплотнения, Н/м<sup>2</sup>;

$\beta_1$  – коэффициент распределения напряжений, м<sup>-1</sup>;

$k_{пред}$  – коэффициент предельного увеличения плотности;

$\sigma_0$  – структурная плотность почвы, Па.

После подстановки значений в выражение (15) получим:

$$\rho = 1200 \left( 1 + 0,4 - \frac{100 \cdot 5}{2500} \ln \frac{500}{236,2 + 5} \right) = 1505 \text{ кг/м}^3.$$

Для ходовых систем с повторными проходами колес по следу используем зависимость нарастания плотности почвы [4]:

$$\rho_N = \rho_n \left( 1 + k_{пред} - \frac{k_e \cdot \beta}{k} \ln \frac{P_o}{\sigma + \sigma_0} \right) \times (1 + k_u \lg N), \quad (16)$$

где  $\rho_N$  – плотность почвы в следе после прохода N-осного движителя, кг/м<sup>3</sup>.

Допускаем, что нагрузка между колесами распределена равномерно. С учетом этого из зависимости (16) найдем плотность почвы после прохода тандем-колес:

$$\rho_2 = 1200 \left( 1 + 0,4 - \frac{100 \cdot 5}{2500} \ln \frac{500}{236,2 / 2 + 5} \right) \times (1 + 0,3 \cdot \lg 2) = 1464 \text{ кг/м}^3.$$

Для сдвоенных колес изменятся коэффициент объемного смятия и коэффициент распределения напряжений. Коэффициент объемного смятия для сдвоенных шин 23,1R26, определенный по формуле (9), равен 1768 кН/м<sup>3</sup>.

Зависимость коэффициента распределения напряжений от размеров колес имеет вид [2, с. 99]:

$$\beta_2 = \beta_1 \sqrt{\frac{D_1 \cdot B_1}{D_2 \cdot B_2}}, \quad (17)$$

где  $\beta_1$  – коэффициент распределения напряжений для колес, оборудованных шиной размерами  $D_1$  и  $B_1$ , м<sup>-1</sup>;

$\beta_2$  – коэффициент распределения напряжений для колес, оборудованных шиной размерами  $D_2$  и  $B_2$ , м<sup>-1</sup>.

По формуле (17) найдем коэффициент распределения напряжений для колес со сдвоенными шинами 23,1R26:

$$\beta_2 = 5 \sqrt{\frac{1,74 \cdot 0,75}{1,74 \cdot 2 \cdot 0,75}} = 3,54 \text{ м}^{-1}.$$

Плотность почвы в следе сдвоенных колес найдем из зависимости (15) с учетом распределения нагрузки на 2 колеса:

$$\rho_{сд} = 1200 \left( 1 + 0,4 - \frac{100 \cdot 3,54}{1768} \times \ln \frac{500}{236,2 / 2 + 5} \right) = 1343 \text{ кг/м}^3.$$

Расчеты по зависимостям (9) – (17) показали, что сдваивание шин и тандем-колеса способствуют значительному снижению глубины следа и уплотнения почвы. При этом глубина следа у тандем-колес ( $h_2 = 0,051$  м) меньше, чем глубина следа у сдвоенных шин ( $h_{сд} = 0,068$  м). Однако плотность почвы в следах сдвоенных колес меньше, чем у тандем-колес ( $\rho_{сд} = 1343$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2 = 1464$  кг/м<sup>3</sup>). Для объяснения этого явления рассмотрим, на какую глубину проникает уплотнение почвы сравниваемых вариантов движителей.

Глубина проникновения уплотнения под воздействием колес определяется из зависимости [5]:

$$x_h = \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{\sigma}{\sigma_h} \right), \quad (18)$$

где  $\sigma_h$  – напряжение в нижних слоях почвы, Па.

Для тандем-колес глубина проникновения уплотнения будет равна:

$$x_{h2} = \frac{1}{5} \ln \left( \frac{236,2}{2 \cdot 10} \right) = 0,494 \text{ м}.$$

Для сдвоенных колес глубина проникновения равна:

$$x_{hcd} = \frac{1}{3,54} \ln \left( \frac{236,2}{2 \cdot 10} \right) = 0,697 \text{ м.}$$

При расчетах в обоих случаях принималась величина  $\sigma_h = 10$  кПа [5, с. 91].

Таким образом, при сдвигании колес глубина проникновения уплотняющего воздействия ( $x_{hcd} = 0,697$  м) значительно превышает глубину проникновения уплотнения тандем-колес ( $x_{h2} = 0,494$  м). Это объясняется различным характером распределения напряжений у колес с одинарными и сдвоенными шинами.

Сопротивление качению для одинарных колес найдем по зависимости [6]:

$$P_f = B \frac{p_0^2}{k} \ln \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\sigma_1^2}{p_0^2}}}, \quad (19)$$

где  $B$  – ширина колеса, м.

$$P_f = 0,75 \frac{500^2}{2500} \ln \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{236,2^2}{500^2}}} = 9,47 \text{ кН.}$$

Коэффициент сопротивления качению:

$$f = \frac{P_f}{G} = \frac{9,47}{46,93} = 0,202.$$

Для одинарных колес получен очень большой коэффициент сопротивления качению.

Найдем сопротивление качению при других вариантах. Сопротивление качению для тандем-колес найдем по следующей зависимости [6]:

$$P_f = B \frac{p_0^2}{k} \ln \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\sigma_1^2}{p_0^2}}} (1 + k_u \lg N). \quad (20)$$

Подставив значения параметров в формулу (20) получим:

$$P_f = 0,75 \frac{500^2}{2500} \ln \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(236,2/2)^2}{500^2}}} \times$$

$$\times (1 + 0,3 \lg 2) = 2,35 \text{ кН.}$$

Коэффициент сопротивления качению:

$$f = \frac{P_f}{G} = \frac{2,35}{46,93} = 0,05.$$

Из зависимости (20) найдем формулу для определения сопротивления качению при сдвигании шин:

$$P_f = 2B \frac{p_0^2}{k_{cd}} \ln \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\sigma_1^2}{p_0^2}}}, \quad (21)$$

где  $k_{cd}$  – коэффициент объемного смятия почвы для сдвоенных шин, Н/м<sup>3</sup>.

Из зависимости (9) найдем коэффициент объемного смятия почвы для сдвоенных шин:

$$k_{cd} = k_1 \sqrt{\frac{D \cdot B}{D \cdot 2 \cdot B}} = \sqrt{\frac{1}{2}} k_1. \quad (22)$$

С учетом формулы для определения коэффициента объемного смятия почвы для сдвоенных шин (22) зависимость (21) примет вид:

$$P_{fcd} = 2\sqrt{2} B \frac{p_0^2}{k_1} \ln \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\sigma_1^2}{p_0^2}}}. \quad (23)$$

По зависимости (23) найдем сопротивление качению для колеса, оборудованного сдвоенными шинами 23,1R26:

$$P_{fcd} = 2\sqrt{2} \cdot 0,75 \cdot \frac{500^2}{2500} \ln \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(236,2/2)^2}{500^2}}} =$$

$$= 6,1 \text{ кН.}$$

Коэффициент сопротивления качению:

$$f = \frac{P_f}{G} = \frac{6,1}{46,93} = 0,13.$$

Из приведенного анализа зависимостей (20) – (23) следует, что для почв с одинаковыми по глубине свойствами, у тандем-колес коэффициент сопротивления качению меньше, чем у колес со сдвоенными шинами. При этом у тандем-колес меньшая глубина следа и уплотняющее воздействие проникает на меньшую глубину.

Рассмотрим теперь результаты исследования зависимости глубины следа от высоты слоя почвы.

Так как почвенные условия и ходовые системы разнообразны, то при проведении исследований применялось физическое моделирование и планирование эксперимента, позволяющие получить уравнения регрессии в критериальном виде. Критерии подобия позволяют распространить результаты исследований на ходовые системы различных размеров.

При обосновании критериев подобия процесса деформации и уплотнения почвы использованы разработки В.В. Кацыгина, А.Н. Орды, В.М. Мацепуро и других ученых. Критериями подобия процесса уплотнения почвы были приняты следующие выражения:

$$\frac{k}{p_0} h, \frac{H}{B}, \frac{q}{p_0}, \frac{\rho_n}{\rho}, \frac{\kappa_6 \cdot \beta}{\kappa}, \frac{p_0}{\sigma_0}.$$

Для проведения экспериментальных исследований была сконструирована и изготовлена лабораторная установка (рис. 1).

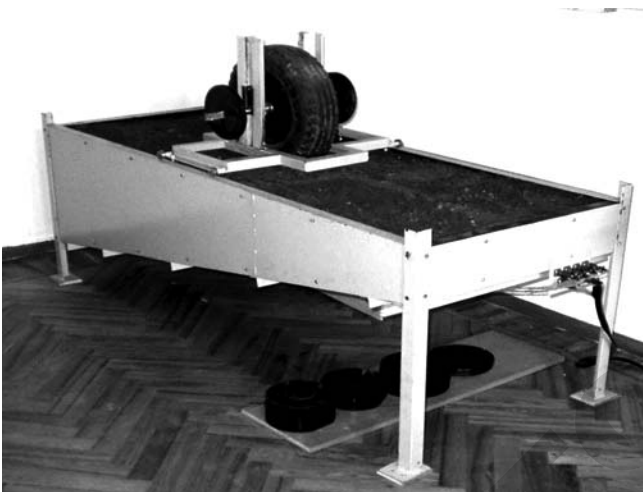


Рисунок 1. Стенд для исследования взаимодействия колес с почвой.

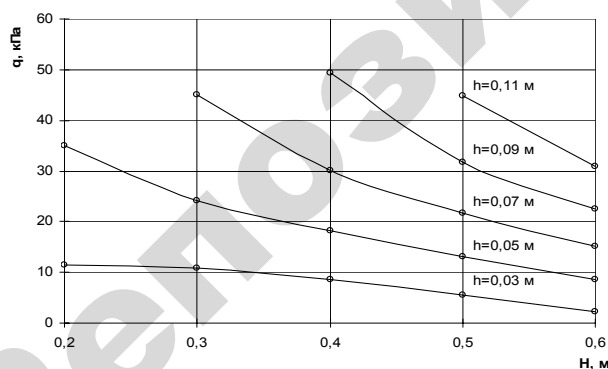


Рисунок 2. Влияние среднего давления и высоты слоя почвы на глубину следа ( $P_0=500$  кПа,  $\kappa=300$  кН/м<sup>3</sup>).

Установка представляет собой контейнер призматической формы, заполненный почвой. В верхней

части контейнера в тележке установлено колесо, которое имеет возможность перемещаться по поверхности почвы в горизонтальном направлении. Вертикальное нагружение колеса производится при помощи грузов, которые устанавливаются на ось колеса. Основание контейнера моделирует плотную плужную подошву. Выполнение основания контейнера под наклоном (10°) позволяет в рамках одного опыта зарегистрировать давление на плужную подошву при различной толщине верхнего рыхлого слоя почвы.

На основании теории планирования экстремального эксперимента были проведены исследования процесса слеодообразования. Влажность почвы во время эксперимента равнялась  $W=13\%$ , первоначальная плотность почвы  $\rho = 1020$  кг/м<sup>3</sup>. Получено нелинейное критериальное уравнение, связывающее глубину следа, давление колеса на почву, коэффициент объемного смятия, предел несущей способности, высоту слоя почвы и ширину шины:

$$\begin{aligned} \frac{k}{p_0} h = & 31,454 + 462 \frac{q}{p_0} - 16,34 \frac{H}{B} + \\ & + 253,8 \frac{q}{p_0} \cdot \frac{H}{B} - 4,94 \cdot 10^3 \left( \frac{q}{p_0} \right)^2 + \\ & + 2,89 \left( \frac{H}{B} \right)^2. \end{aligned} \quad (24)$$

На основании уравнения регрессии построены кривые отклика (рис. 2), позволяющие оценить влияние режимов нагружения и свойств почвы на глубину следа.

Выявлено, что с увеличением высоты слоя почвы растет и глубина следа.

На основании уравнения (24) построены также изолинии, характеризующие зависимость глубины следа от коэффициента объемного смятия почвы, среднего давления и глубины рыхлого слоя (рис. 3, 4).

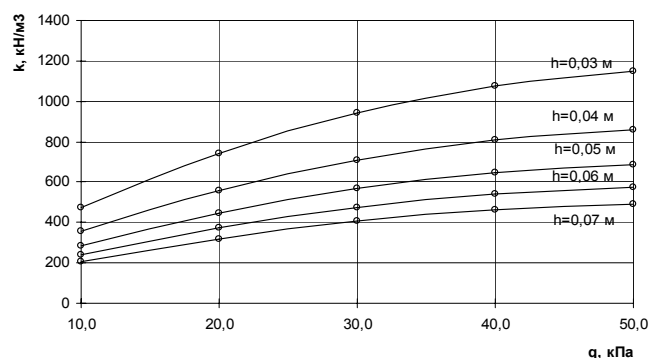


Рисунок 3. Влияние коэффициента объемного смятия и среднего давления на глубину следа ( $p_0=500$  кПа,  $H=0,3$  м).

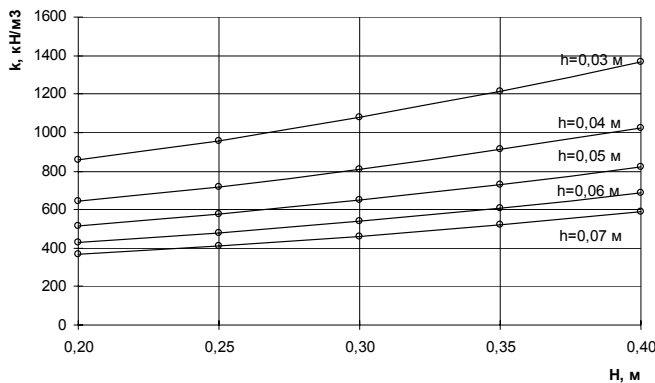


Рисунок 4. Влияние коэффициента объемного смятия и высоты слоя почвы на глубину следа ( $p_0=500$  кПа,  $q=40$  кПа).

### Выводы

1. На почвах с одинаковыми по глубине свойствами уплотняющее воздействие на почву у тандем-колес меньше по сравнению со сдвоенными шинами. Сопротивление качению также меньше у тандем-колес.

2. На почвах, подготовленных под посев, происходит разрушение ядра уплотнения до завершения его формирования. Из-за этого на таких почвах предпочтительнее колеса со сдвоенными шинами. При применении тандем-колес происходит дальнейшее разрушение ядра уплотнения при повторных проходах, из-за чего возрастает глубина следа.

3. На основании теории планирования экстремального эксперимента проведены исследования процесса следообразования. Получено нелинейное критериальное уравнение, связывающее глубину следа, давление колеса на почву, коэффициент объемно-

го смятия, предел несущей способности, высоту слоя почвы и ширину шины.

4. На основании уравнения регрессии построены кривые отклика, позволяющие оценить влияние режимов нагружения и свойств почвы на глубину следа. Выявлено, что с увеличением высоты слоя почвы растет и глубина следа.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кутьков, Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства / Г.М. Кутьков. – М.: Колос, 2004. – 504 с.

2. Перспективные мобильные энергетические средства для сельскохозяйственного производства / В.В.Кацыгин [и др.]; под общ. ред. В.В. Кацыгина. – Минск: Наука и техника, 1982. – 272 с.

3. Техника сельскохозяйственная мобильная: ГОСТ 26953-86. – Введен. 14.07.86. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 4 с.

4. Орда, А.Н. Уплотнение почвы под действием ходовых систем / А.Н. Орда, А.Б. Селеши // Агропанорама, №1, 2007. – С. 13-16.

5. 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.

6. Шило, И.Н. Энергетическая эффективность многоосных движителей машинно-тракторных агрегатов / И.Н. Шило, А.Н. Орда, В.А. Шкляревич, А.Б. Селеши // Торф в решении проблем энергетики, сельского хозяйства и экологии: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 29 мая – 2 июня 2006 г. / НАНБ. – Минск, 2006. – С. 79-81.

**“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.**

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по сельскохозяйственным и техническим наукам (сельскохозяйственное машиностроение, транспорт, геоэкология, энергетика). Журнал выходит раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842. Стоимость подписки на второе полугодие 2008 года: для индивидуальных подписчиков - 17700 руб., ведомственная подписка - 35400 руб.