

$$h_n = \frac{p_0}{\kappa} \left[\text{Arch} \frac{2^{\frac{b \cdot \kappa}{p_0^2}}}{\sqrt{1 - \frac{q_1^2}{p_0^2}}} + \sum_{i=3}^n \left(\text{Arch} \frac{(i-1)^{\frac{b \cdot \kappa}{p_0^2}}}{\sqrt{1 - \frac{\sigma_{i-1}^2}{p_0^2}}} \right) + \sum_{i=2}^n \left(\text{Arth} \frac{\sigma_i}{p_0} - \text{Arth} \frac{\sigma_{i-1}}{p_0} \right) \right] \quad (9)$$

Глубина следа после n проходов колес в случае убывания давлений при каждом последующем проходе равна:

$$h_n = \frac{p_0}{\kappa} \left[\text{Arth} \left(\frac{\sigma_1}{p_0} \right) + \kappa \sum_{i=2}^n \lg \left(\frac{i}{i-1} \right) \text{Arth} \left(\frac{\sigma_i}{p_0} \right) \right]. \quad (10)$$

Заключение

Используя приведенные зависимости, возможно определение приращения плотности почвы и глубины следа при многократных нагружениях с учетом самовосстановления почвы во времени.

УДК 631.431

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ПОЧВЫ РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ХОДОВЫХ СИСТЕМ

Орда А.Н., Алешкевич С.В., Селеши А.Б., Бушик А.Г. (БГАТУ)

Дается обоснование применения различных схем компоновки ходовых систем. Приводится исследование воздействия на почву тракторов со сдвоенными колесами и тандем-колесами.

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/м³ – суглинистые и глинистые, 1250 - 1400 кг/м³ – 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/м³, 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)]:

$$\varphi_m = \frac{P_m}{G_{mp}}, \quad (1)$$

где φ_m - коэффициент использования веса;

P_m - тяговое усилие, Н;

G_{mp} - вес трактора, Н.

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

$$P_m = P_k - P_f. \quad (2)$$

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

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

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)]:

$$\varphi_m = \mu - f. \quad (5)$$

Коэффициент использования веса φ_m зависит от типа движителя и агрофона. При обработке множества тяговых испытаний тракторов получены следующие значения коэффициента на стерне (таблица 1) [1].

Таблица 1 - Коэффициент сцепного веса

Тип и колесная формула трактора	Колесный		Гусеничный
	4К2	4К4	
Коэффициент использования веса φ_m	0,37-0,39	0,4-0,45	0,5-0,6

Из зависимости (1) выразим вес трактора:

$$G_{mp} = \frac{P_m}{\varphi_m}. \quad (6)$$

Исходя из зависимости (6) и таблицы 1 найдем, что вес колесного трактора формулы 4К4 равен:

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

Вес гусеничного трактора равен:

$$G_{\text{зyc}} = \frac{P_m}{0,6} \dots \frac{P_m}{0,5} \quad (8)$$

Из зависимостей (7) и (8) видно, что для развития одного и того же тягового 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 - колесом.

Известна 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/м³;

k_2 - коэффициент объемного смятия для колес, оборудованных шиной размерами D_2 и B_2 , Н/м³.

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

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

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

$$F_{\text{кп}} = F_{\text{к}} \cdot k_{\text{д}}, \quad (10)$$

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

$k_{\text{д}} = 1,1-1,6$ - коэффициент, зависящий от наружного диаметра шины.

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

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

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

$$\bar{q}_{\text{к}} = \frac{G_{\text{max}}}{F_{\text{кп}}}, \quad (11)$$

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

Максимальное давление колеса на почву $q_{\text{к}}$ равно:

$$q_{\text{к}} = \bar{q}_{\text{к}} \cdot k_1, \quad (12)$$

где $k_1 = 1,5$ - коэффициент продольной неравномерности распределения давления по площади контакта шины.

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

Глубина следа под одинарным колесом:

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

где σ_1 - контактное напряжение при первом проходе колеса, Па;

p_0 - предел несущей способности почвы, Па.

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

Глубина следа под сдвоенным колесом равна:

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

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

$$h_N = \frac{p_0}{k} \operatorname{Arth} \left(\frac{\sigma_1}{p_0} \right) (1 + k_u \lg N), \quad (14)$$

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:

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

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

$$\rho = \rho_n \left(1 + k_{пред} - \frac{k_s \cdot \beta}{\kappa} \ln \frac{p_0}{\sigma + \sigma_0} \right), \quad (15)$$

где ρ_n - первоначальная плотность почвы, Па;

k_s - коэффициент взаимосвязи параметров уплотнения, Н/м²;

β - коэффициент распределения напряжений, м⁻¹;

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

σ_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]:

$$\rho_N = \rho_n \left(1 + k_{пред} - \frac{k_s \cdot \beta}{\kappa} \ln \frac{p_0}{\sigma + \sigma_0} \right) (1 + k_u \lg N), \quad (16)$$

где ρ_N - плотность почвы в следе после прохода N -осного движителя, кг/м³.

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

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

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/м³.

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

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

где β_1 - коэффициент распределения напряжений для колес, оборудованных шиной размерами D_1 и B_1 , м⁻¹;

β_2 - коэффициент распределения напряжений для колес, оборудованных шиной размерами D_2 и B_2 , м⁻¹.

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:

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

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 ($h_2 = 0,051 \text{ м}$) меньше, чем глубина следа у сдвоенных шин ($h_{сд} = 0,068 \text{ м}$). Однако плотность почвы в следах сдвоенных колес меньше, чем у тандем-колес ($\rho_{сд} = 1343 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2 = 1464 \text{ кг/м}^3$). 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 σ_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:

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

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

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

Соппротивление 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 сдвигании колес. 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:

$$P_f = 0,75 \frac{500^2}{2500} \ln \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(236,2/2)^2}{500^2}}} (1 + 0,3 \lg 2) = 2,35 \text{ кН}.$$

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:

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

где $k_{сд}$ - коэффициент объемного смятия почвы для сдвоенных шин, Н/м³.

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

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

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

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

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

$$P_{fсд} = 2\sqrt{2} \cdot 0,75 \cdot \frac{500^2}{2500} \ln \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(236,2/2)^2}{500^2}}} = 6,1 \text{ кН}.$$

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.

Заключение

В результате работы можно сделать следующие выводы

1. Колесные тракторы с традиционной компоновкой ходовых систем производят на почву чрезмерное давление. Для уменьшения давления рекомендуется компоновка ходовых систем с тандем-колесами и со сдвоенными шинами.
2. Глубина следа у тандем-колес меньше, чем глубина следа у сдвоенных шин. Однако плотность почвы в следах сдвоенных колес меньше, чем у тандем-колес, что объясняется большей глубиной проникновения уплотнения.
3. Сопротивление качению у тандем-колес меньше чем у сдвоенных шин.

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 общей редакцией В.В. Кацыгина. - Минск: Наука и техника, 1982.-272 с.
3. Техника сельскохозяйственная мобильная: ГОСТ 26953-86. - Введен впервые 14.07.86. - М.: Издательство стандартов. Методы определения воздействия движителей на почву, 1986. 4 с.
4. Орда, А.Н. Уплотнение почвы под действием ходовых систем / А.Н. Орда, А.Б. Селеша // 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. Селеша // Торф в решении проблем энергетики, сельского хозяйства и экологии: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 29 мая - 2 июня 2006 г. / НАН-Б. - Минск, 2006. - с. 79-81.

УДК 631. 43

СНИЖЕНИЕ УПЛОТНЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ХОДОВЫХ СИСТЕМ НА ПОЧВУ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНИРОВАННЫХ ШИРОКОЗАХВАТНЫХ АГРЕГАТОВ

Орда А.Н., Шкляревич В.А., Мурин А. П. (БГАТУ)

Рассмотрены пути снижения площади уплотнения поля ходовыми системами машинно-тракторных агрегатов, показаны преимущества использования комбинированных широкозахватных агрегатов для снижения уплотняющего воздействия их ходовых систем на почву.

Введение

Анализ существующих технологий возделывания различных сельскохозяйственных культур показывает, что число выполняемых операций колеблется от 10 до 25. Такие операции, как лущение стерни, внесение органических и минеральных удобрений, вспашка почвы, ее выравнивание, культивация, боронование, посев, уход за посевами и уборка урожая осуществляются раздельно и к тому же некоторые из них многократно. Машинно-тракторные агрегаты, выполняющие эти операции, отличаются количественным составом, типами сельскохозяйственных машин, способами агрегатирования, что и определяет разницу в ширине их захвата. Все это приводит к тому, что при многократных циклических движениях агрегатов по полю после каждого прохода оно покрывается уплотненными полосами, суммарная площадь которых может приближаться или даже превышать саму