

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПНЕВМОКОЛЕСНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ НА УПЛОТНЕНИЕ ПОЧВЫ МЕТОДОМ ПОДОБИЯ

И.Н. Шилов, докт. техн. наук, профессор, Ю.В. Чигарев, докт. физ.-мат. наук, профессор, Н.Н. Романюк, ст. преподаватель (УО БГАТУ)

### Аннотация

*Рассматривается влияние вибродинамических нагрузок на изменение плотности почвы с помощью теории подобия. Обоснован выбор параметров модели. По результатам исследований получены уравнения регрессии, связывающие между собой критерий отклика и критерии подобия. Внесение пожнивных остатков в почву приводит к изменению ее реологических свойств и уменьшению уплотняемости.*

### 1. Планирование эксперимента

Использование моделирования для исследований значительно сокращает сроки испытаний и существенно снижает материальные затраты. Моделирование заключается в исследовании объекта на специально сформированной модели, которая подобна оригиналу. Для этого вначале между независимыми факторами устанавливаются связь в критериальной форме с помощью теории подобия и анализа размерностей, получают масштабные соотношения, позволяющие найти степень влияния движителей проектируемой машины при известных показателях модели.

Анализ литературы по данной проблеме показывает, что наибольшее влияние на уплотнение почвы оказывают следующие факторы: нагрузка на ось колеса  $G$ , давление воздуха в шине  $p_w$ , скорость движения трактора  $V$ , частота колебаний  $f$ .

Приняв почву в виде реологического тела обобщенной вязкоупругой среды, согласно [1] зависимость изменения плотности почвы от факторов в критериальном виде с учетом перечисленных факторов будет иметь вид:

$$\frac{\rho_K}{\rho_H} = \varphi \left( \frac{G}{E_c l^2}; \frac{p_w}{E_c}; \frac{\eta V}{E_c}; \frac{f \eta}{E_c} \right) \quad (1)$$

где  $\rho_H, \rho_K$  – соответственно плотность почвы до воздействия движителя (начальная) и после воздействия (конечная);

$E_c$  – статический модуль упругости почвы;

$\eta$  – коэффициент вязкости почвы;

$l$  – определяющий линейный размер системы.

При проведении эксперимента на модели необходимо обосновать ее параметры.

В.И. Баловнев доказал, что критический размер  $l_0$  должен находиться в пределах 20-100 мм в зависи-

мости от типа почвогрунта и величины прикладываемой нагрузки [2, с.368].

В [3, с.66] указывается возможность испытания проектируемого колеса и модели на одинаковых почвенных поверхностях при условии  $K_f < 4 \div 5$ .

Поскольку на уплотнение почвы влияет не только наружный диаметр  $D$ , но и ширина профиля шины  $B_{ш}$ , согласно [3, с.162] в качестве параметра линейного размера следует принимать выражение:

$$l = \sqrt{D \cdot B_{ш}} \quad (2)$$

Исходя из этих суждений, в качестве модельного принято колесо 4.50-9.

Уровни варьирования управляемых факторов определялись из следующих соображений.

Нагрузка  $G$ , приходящаяся на ось колеса, выбиралась из ТУ 38.10421 - 85 на шину 4,5 – 90 в зависимости от давления воздуха в ней. Величина нагрузки на ось натурального образца определяется с учетом зависимости [1, с.72]:

$$G_{ш} = G_w K_f^2 \quad (3)$$

Пределы изменения давления воздуха в шине  $p_w$  получены исходя из требований, предъявляемых к шинам для выполнения различных операций. Согласно [1, с.72] давление воздуха в натурном и модельном колесах одинаково.

Скорость движения колеса  $V$  определялась согласно [5, с.14], где даны рабочие скорости (1...5 м/с) сельскохозяйственной техники при выполнении различных операций. Согласно [1, с.72] скорость движения колеса модельного образца должна быть в  $K_f$  раз меньше, чем натурального.

Частоты колебаний модели (установки) и натурального образца должны быть одинаковыми [1, с.72]. Согласно [6] доминирующие частоты колебаний тракторов находятся в диапазоне 3-5 Гц, причем наиболее часто встречающиеся 4-5 Гц.

### 1. Значение факторов в кодированном и натуральном виде

Показатели	Кодированное значение	Факторы в натуральном виде			
		нагрузка на ось, кН, [G]; X1	давление воздуха в шине, кПа [p <sub>w</sub> ]; X2	скорость движения, м/с, [Vк]; X3	частота колебаний, Гц [f]; X4
Верхний уровень	+1	1,80	120	1,4	5
Основной уровень (X0)	0	1,45	100	1,1	4
Нижний уровень	-1	1,10	80	0,8	3
Интервал варьирования	$\varepsilon_{\theta}$	0,35	20	0,3	1
Верхнее звездное плечо	+2	2,15	140	1,7	6
Нижнее звездное плечо	-2	0,75	60	0,5	2

Как показал теоретический анализ, влияние данных факторов на уплотнение почвы носит нелинейный характер, поэтому для более точной формализации используется план второго порядка – полный центральный композиционный ротатбельный эксперимент типа  $2^4$ , при котором варьирование факторов осуществляется на двух уровнях.

Соответствуя требованиям ортогональности для четырех переменных, устанавливаем значения уровней в принятом масштабе и заносим в табл. 1 основные уровни изменения факторов. Центр эксперимента (нулевую точку) определяем согласно рекомендациям [7].

### 2. Описание и конструкция лабораторного стенда

Для исследования процессов взаимодействия колеса с почвой под действием вибродинамических нагрузок использовался лабораторный стенд (рис. 1),

конструкция которого защищена патентом на полезную модель [8].

Стенд содержит: контейнер для почвы 1, имеющий возможность горизонтального перемещения, состоящий из неподвижных боковых стенок, часть одной из которых выполнена из оргстекла со шкалой для определения вертикального уплотнения почвы 2; ось 3 с колесом 4. На оси 3 установлена площадка с вибратором 5. При перемещении контейнера 1, почва, находящаяся в нем, воздействует на колесо 4, преобразуя поступательное движение почвы во вращательное движение колеса. Привод контейнера 1 осуществляется от электродвигателя 6 через червячный редуктор 7 и зубчато-реечное зацепление 8. Скорость передвижения контейнера 1 регулируется за счет изменения передаточного отношения цепной передачи 9.

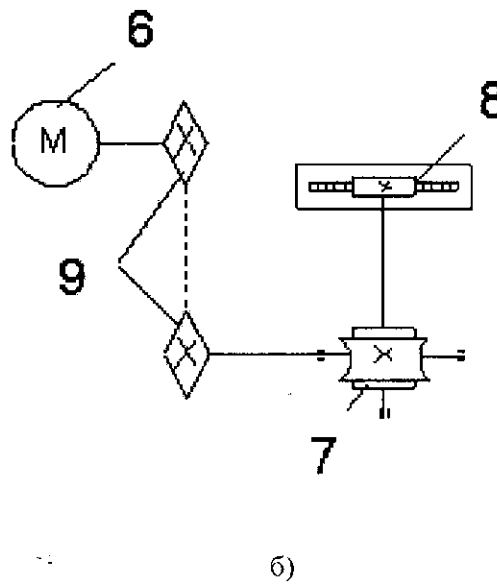
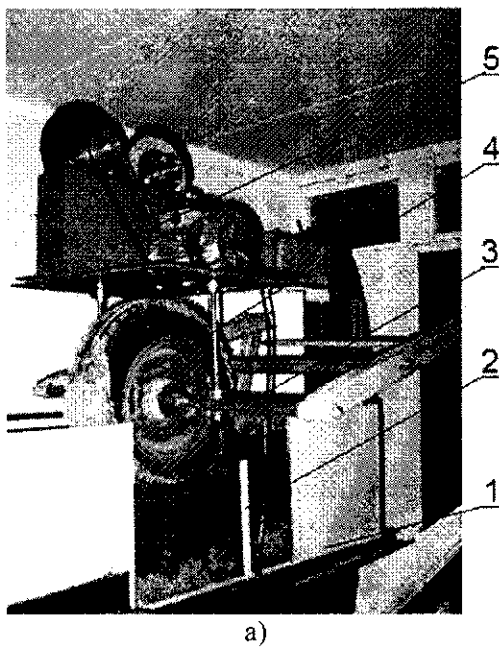


Рис. 1. Стенд для исследования взаимодействия колес с почвой при вибродинамическом нагружении: а) – общий вид; б) – привод колеса

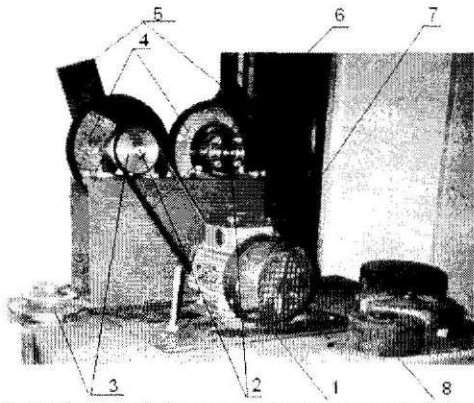


Рис. 2. Вибровозбудитель направленных действий

Вибродинамические нагрузки создаются при помощи вибратора направленного действия (рис. 2).

Вибратор установлен на площадку 1. Два вала 2 с одинаковыми эксцентриками 5 вращаются в противоположных направляющих синхронно и синфазно, что обеспечивается двумя дисками 4, представляющими собой фрикционную передачу. Горизонтальные составляющие центробежных сил каждого из эксцентриков в любом положении взаимно уравновешиваются, а вертикальные – складываются, давая суммарную вертикальную направленную периодическую возмущающую силу. Привод вибратора осуществляется от электродвигателя 7 через ременную передачу 6, имеющую сменные шкивы 3. Частота колебаний вибратора зависит от числа оборотов вала вибратора. Изменение оборотов вала вибратора осуществляется при помощи сменных шкивов 3 различного диаметра. Требуемая нагрузка на колесо создается при помощи сменных грузов 8, устанавливаемых на площадку 1 или ось колеса.

### 3. Результаты экспериментальных исследований

Опыты проводились на дерново-подзолистой супесчаной почве. В первом случае при плотности  $\rho_n = 1126 \text{ кг/м}^3$  и влажности  $W = 12\%$  статический модуль упругости и коэффициент вязкости составили соответственно  $E_c = 700 \text{ кПа}$ ,  $\eta = 8,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Во втором случае в почву вносились пожнивных остатков при дозе соломы 2000 кг/га, плотность почвы составила  $\rho_n = 1090 \text{ кг/м}^3$  при влажности  $W = 10,8\%$ . При этих показателях статический модуль упругости и коэффициент вязкости составили соответственно  $E_c = 800 \text{ кПа}$ ,  $\eta = 7,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

В соответствии со схемой для каждого случая проведено по двадцать пять опытов: шестнадцать точек с варьированием факторов на уровнях (+1; -1) сочетаются с девятью точками, из которых восемь звездных точек с плечами (+2; -2) и одна центральная (0). Для оценки кривизны поверхности отклика добавляем шесть параллельных точек в центре плана.

Все эксперименты проведены в четырехкратной повторности. Полученные результаты усреднены и округлены. Опыт в центре плана проведен с шестикратной повторностью.

С целью обеспечения равномерного внесения элемента случайности влияния неуправляемых и неконтролируемых факторов на отклик был использован принцип рандомизации, который предусматривал случайный порядок реализации опытов. Для чего использовались таблицы случайных чисел [7, с.159].

Математическую модель изменения критерия отклика  $y \left( \frac{\rho_k}{\rho_n} \right)$  можно записать в следующем виде [7, с.97]:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^K b_i \cdot x_i + \sum_{i < j}^K b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^K b_{ii} \cdot x_i^2, \quad (4)$$

где  $y$  – критерий оптимизации (отклик);

$b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  – коэффициенты уравнения регрессии;

$x_i, x_j$  – независимые переменные факторы;

$K$  – число независимых переменных факторов.

Обработка экспериментальных данных с помощью компьютерной программы [9] позволила получить уравнения регрессии, описывающие процесс уплотнения почвы от вибродинамических нагрузок в критериальной форме:

– для первого случая (без внесения в почву пожнивных остатков):

$$\begin{aligned} \frac{\rho_k}{\rho_n} = & 3.0960 - 29.2267 \cdot \left( \frac{G}{E_c \cdot l^2} \right) - 9.4376 \cdot \left( \frac{\rho_w}{E_c} \right) - \\ & - 13.5640 \cdot \left( \frac{\eta^V}{l E_c} \right) - 18.4907 \cdot \left( \frac{f \eta}{E_c} \right) + \\ & + 423.5759 \cdot \left( \frac{G}{E_c \cdot l^2} \right)^2 + 38.1194 \cdot \left( \frac{\rho_w}{E_c} \right)^2 + \\ & + 124.4404 \cdot \left( \frac{\eta^V}{l E_c} \right)^2 + 190.2330 \cdot \left( \frac{f \eta}{E_c} \right)^2. \end{aligned} \quad (5)$$

– для второго случая (с внесением в почву пожнивных остатков):

$$\begin{aligned} \frac{\rho_k}{\rho_n} = & 3.1188 - 32.9675 \cdot \left( \frac{G}{E_c \cdot l^2} \right) - 10.9273 \cdot \left( \frac{\rho_w}{E_c} \right) - \\ & - 18.6537 \cdot \left( \frac{\eta^V}{l E_c} \right) - 23.8208 \cdot \left( \frac{f \eta}{E_c} \right) + \\ & + 545.8198 \cdot \left( \frac{G}{E_c \cdot l^2} \right)^2 + 49.3125 \cdot \left( \frac{\rho_w}{E_c} \right)^2 + \\ & + 207.0060 \cdot \left( \frac{\eta^V}{l E_c} \right)^2 + 317.6103 \cdot \left( \frac{f \eta}{E_c} \right)^2. \end{aligned} \quad (6)$$

**Выводы**

1. По результатам исследований получены уравнения регрессии (5) и (6), связывающие между собой

критерий отклика  $y\left(\frac{\rho_k}{\rho_n}\right)$  и критерии подобия:

$$\left(\frac{G}{E_c l^2}\right), \left(\frac{p_w}{E_c}\right), \left(\frac{\eta v}{l E_c}\right), \left(\frac{f \eta}{E_c}\right).$$

2. Внесение пожнивных остатков влияет на реологические свойства почвы, а именно на повышение ее упругих свойств. Это ведет к снижению уплотняющего воздействия на почву вибродинамических нагрузок, т.е. уменьшению критерия отклика  $y\left(\frac{\rho_k}{\rho_n}\right)$ .

3. Анализ уравнений регрессии (5) и (6) показывает, что при увеличении нагрузки на ось колеса  $G$ , повышении давления воздуха в шине  $p_w$ , увеличении скорости движения  $V$  и частоты колебаний  $f$  значенные плотности почвы увеличивается.

4. Наименьшее уплотнение почвы в первом и во втором экспериментах наблюдается тогда, когда все критерии подобия находятся на основном (нулевом) уровне.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Czigarew, J.W. Badania wibro-udarowego oddziaływania kol ciągnika na glebie metoda modeli fizycznych / J.W. Czigarew, N.N. Romaniuk, W.M. Mikula // Ekologiczne aspekty mechanizacji produkcji roślinnej: XI Międzynarodowe sympozjum, Warszawa, 13-14 września 2005r. / Szkoła

Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Inżynierii produkcji. –Warszawa, 2005.–P.67-73.

2. Баловнев, В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В.И. Баловнев. – Москва: Машиностроение, 1994. – 432с.

3. Брянский, Ю.А. Взаимодействие пневматических колес с деформируемыми опорными поверхностями / Ю.А. Брянский, Е.Д. Каран. – Москва: ЦНИИТЭстроймаш, 1971. – 71с.

4. Орда, А.Н. Эколого-энергетические основы формирования машинно-тракторных агрегатов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03/ А.Н. Орда. – Минск, 1997. – 269с.

5. Бойков, В.П. Шины для тракторов и сельскохозяйственных машин / В.П. Бойков, В.Н. Белковский. – Москва: Агропромиздат, 1988. – 240с.

6. Улицкий, Е.Я. Влияние колебаний на работу колёсного трактора / Е.Я. Улицкий, Б.Д. Цвик, В.Е. Степанов // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1980. – № 9. – С. 33 – 36.

7. Мельников, С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рошин: 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Колос, 1980. – 168с.

8. Стенд для исследования взаимодействия колес с почвой при статическом и вибродинамическом характере нагружения: пат 3002 Респ. Беларусь, МПК G 01M17/00 / Н.Н. Романюк [и др.]; заявитель учрежд. образ. «Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. – № u 20060112; заявл.22.02.2006; опубл. 30.08.2006.

9 Научное обоснование технологии получения белково-витаминного концентрата из сока бобовых трав с применением ультрафильтрации: отчет о НИР / БГАТУ; рук. темы К.Ф. Терпиловский. – Минск, 1998. – 82 с. – № ГР 19982469.

**“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 2007 года: для индивидуальных подписчиков - 17700 руб., ведомственная подписка - 35400 руб.**