

МЕТОД ПОДОБИЯ В ОЦЕНКЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОЧВУ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ

Чигарев Ю.В., Романюк Н.Н.

1. Планирование эксперимента

Моделирование процессов, происходящих при взаимодействии колесных движителей с почвой, лучше всего проводить при помощи теории подобия, которая значительно сокращает сроки испытаний и существенно снижает материальные затраты.

Моделирование заключается в исследовании моделируемого объекта на специально сформированной модели, которая подобна оригиналу. При помощи масштабных соотношений можно определить степень влияния проектируемых движителей на почву при известных показателях модели.

В [1] дано уравнение регрессии, связывающее изменение плотности почвы от вибродинамических нагрузок, с основными параметрами колесной ходовой системы.

На уплотнение почвы наибольшее влияние оказывают: нагрузка на ось, давление воздуха в шине, скорость движения, частота колебаний. С учетом [1] зависимость изменения плотности почвы от факторов в критериальном виде примет вид:

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

где ρ_n, ρ_k – соответственно плотность почвы до воздействия деформатора (начальная) и после воздействия (конечная);

E_c – статический модуль упругости почвы;

η – коэффициент вязкости почвы;

V – скорость движения трактора;

l – определяющий линейный размер системы;

G – нагрузка, действующая на ось колеса;

p_w – давление воздуха в шине;

f – частота колебаний оси колеса, c^{-1} .

Уровни варьирования управляемых факторов были определены из следующих соображений.

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

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

Скорость движения колеса V_k определялась согласно данных [2, с.14] о рабочих скоростях по полям сельскохозяйственной техники при выполнении различных операций, которая находится в пределах 3...12 км/ч (1...3 м/с). Согласно [1, с.72] скорость движения колеса модельного образца должна быть в K_l раз меньше, чем у натурального.

Частоты колебаний модели (установки) и натурального образца должны быть одинаковыми [1, с.72]. Согласно исследований, проведенных Е. Я. Улицким и Б. Д. Цвиком [3] доминирующие частоты колебаний тракторов находятся в диапазоне 3-5 Гц, притом наиболее часто встречающиеся 4-5 Гц.

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 ротatableльный 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 таблицу 1 основные уровни изменения факторов. Центр эксперимента (нулевую точку) определяем согласно рекомендаций [4].

Таблица 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 _w]; X2 | скорость движения, м/с, [V _к]; 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 | ϵ_e | 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 |

Интервалы и уровни варьирования факторов в критериальном виде представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Интервалы и уровни варьирования факторов в критериальном виде

| Показатели | Кодированное значение | Факторы в критериальном виде | | | |
|---------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---|---------------------------------------|
| | | X1, $\left(\frac{G}{E_c l^2}\right)$ | X2, $\left(\frac{p_w}{E_c}\right)$ | X3, $\left(\frac{\eta V}{l E_c}\right)$ | X4, $\left(\frac{f \eta}{E_c}\right)$ |
| Верхний уровень | +1 | 0,0428 | 0,1714 | 0,0694 | 0,0607 |
| Основной уровень X ₀ | 0 | 0,0345 | 0,1428 | 0,0545 | 0,0486 |
| Нижний уровень | -1 | 0,0262 | 0,1142 | 0,0396 | 0,0365 |
| Интервал варьирования | ϵ_e | 0,0083 | 0,0286 | 0,0149 | 0,0121 |
| Верхнее звездное плечо | +2 | 0,0511 | 0,2000 | 0,0843 | 0,0728 |
| Нижнее звездное плечо | -2 | 0,0179 | 0,0856 | 0,0247 | 0,0244 |

2. Описание и конструкция лабораторного стенда

Параметры и конструкция экспериментальной лабораторной установки по исследованию уплотнения почвы от действующих вибрационных нагрузок выбирались исходя из требований, предъявляемых методикой эксперимента и критериями подобия процессов деформации почвы.

Согласно исследованиям В.И. Баловнева [5, с.368] критический размер l_0 должен находиться в пределах 20-100мм в зависимости от типа почвогрунта и величины прикладываемой нагрузки.

Ю.А. Брянский и Е.Д. Каран [6, с.66] указывают на возможность испытания натурального (оригинального) колеса и модели на одинаковых почвенных поверхностях при условии $K_l < 4 \div 5$, потому что результаты испытания модели при соблюдении геометрического подобия шин дают в этих условиях хорошую количественную сходимость с результатами испытания натурной машины. Исходя из этих соображений, принимаем колесо 4.50-9.

Поскольку, на уплотнение почвы влияет не только наружный диаметр D , но и ширина профиля шины $B_{ш}$, согласно [7, с.162] в качестве параметра линейного размера следует принимать выражение:

$$l_0 = \sqrt{D \cdot B}. \quad (2)$$

Для исследования процессов взаимодействия колеса с почвой под действием вибродинамических нагрузок, используется лабораторный стенд (рисунок 1), конструкция которого защищена патентом на полезную модель [8].

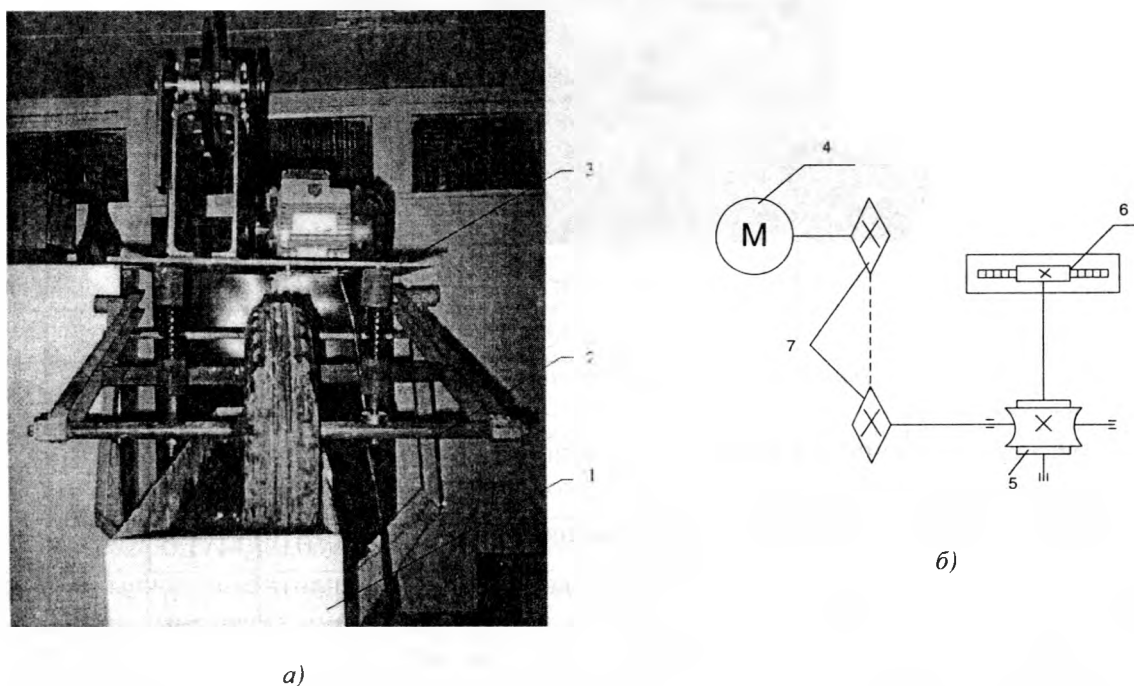


Рисунок 1. Стенд для исследования взаимодействия колес с почвой при вибродинамическом нагружении:
а) общий вид; б) привод колеса

Стенд содержит контейнер для почвы 1, имеющий возможность горизонтального перемещения, ось 2 с колесом на которой установлена площадка с вибратором 3. При перемеще-

нии контейнера 1, почва, находящаяся в нем воздействует на колесо, преобразуя поступательное движение почвы во вращательное движение колеса. Привод контейнера 1 осуществляется от электродвигателя 4 через червячный редуктор 5 и зубчато реечное зацепление 6. Скорость передвижения контейнера 1 регулируется за счет изменения передаточного отношения цепной передачи 7.

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

Вибратор установлен на площадку 1. Два вала 2 с одинаковыми эксцентриками 5 вращаются в противоположных направлениях синхронно и синфазно, что обеспечивается двумя дисками 4, представляющими собой фрикционную передачу. Горизонтальные составляющие центробежных сил каждого из эксцентриков в любом положении взаимно уравниваются, а вертикальные – складываются, давая суммарную вертикальную направленную периодическую возмущающую силу [9, с.8]. Вращение 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

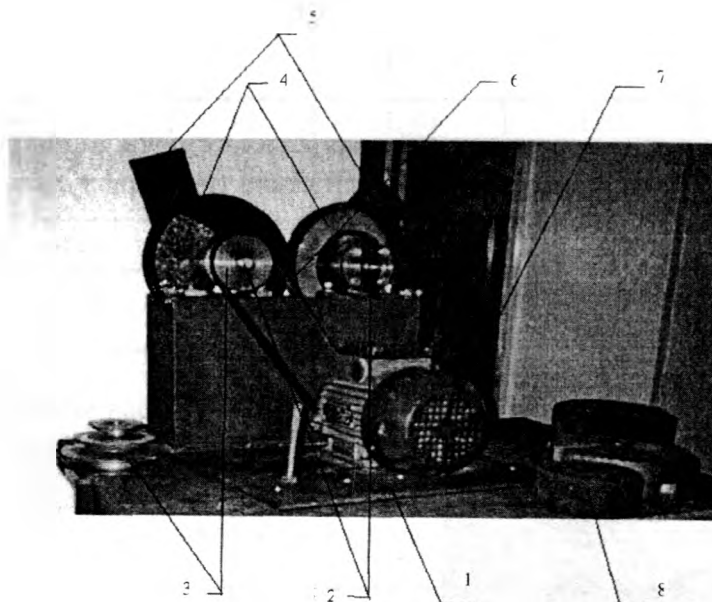


Рисунок 2. Вибровозбудитель направленных действий

создается при помощи сменных грузов 8, устанавливаемых на площадку 1 или ось колеса.

3. Результаты экспериментальных исследований

Как отмечалось выше, при исследовании закономерностей уплотнения почвы от вибродинамических нагрузок основными детерминирующими факторами выявлены: нагрузка на ось колеса, давление воздуха в шине, скорость движения колеса и частота колебаний. Интервалы и уровни варьирования факторов в натуральном виде приведены в таблице 1, в критерииальном – в таблице 2.

Опыты проводились на дерново-подзолистой супесчаной почве. В первом случае при плотности $\rho_n = 1126 \text{ кг/м}^3$ и влажности $W = 12 \%$, при этих показателях статический модуль упругости и коэффициент вязкости составили соответственно $E_c = 700 \text{ кПа}$, $\eta = 8,5 \text{ кПа} \cdot \text{с}$.

В соответствии со схемой проведено 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 [4, с.159].

Результаты опытов и расчетные значения по критерию $y \left(\frac{\rho_K}{\rho_H} \right)$ приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты опытов и расчетные значения по критерию $y \left(\frac{\rho_K}{\rho_H} \right)$

| № п/п | Значения | | | | Результаты | | | | Расчет | | |
|----------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | $\left(\frac{G}{E_c l^2} \right)$ | $\left(\frac{p_w}{E_c} \right)$ | $\left(\frac{\eta v}{l E_c} \right)$ | $\left(\frac{f \eta}{E_c} \right)$ | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Ys | YR | YR0 |
| 1 | 0,0262 | 0,1142 | 0,0396 | 0,0365 | 1,1421 | 1,1794 | 1,1581 | 1,1741 | 1,1634 | 1,2695 | 1,2769 |
| 2 | 0,0428 | 0,1142 | 0,0396 | 0,0365 | 1,1545 | 1,1936 | 1,1687 | 1,1794 | 1,1741 | 1,2820 | 1,2769 |
| 3 | 0,0262 | 0,1714 | 0,0396 | 0,0365 | 1,2629 | 1,2336 | 1,2496 | 1,2274 | 1,2434 | 1,3507 | 1,3598 |
| 4 | 0,0428 | 0,1714 | 0,0396 | 0,0365 | 1,2735 | 1,2416 | 1,2629 | 1,2522 | 1,2575 | 1,3658 | 1,3598 |
| 5 | 0,0262 | 0,1142 | 0,0694 | 0,0365 | 1,1545 | 1,1332 | 1,1456 | 1,1705 | 1,1510 | 1,2589 | 1,2769 |
| 6 | 0,0428 | 0,1142 | 0,0694 | 0,0365 | 1,1350 | 1,1670 | 1,1794 | 1,1723 | 1,1634 | 1,2722 | 1,2769 |
| 7 | 0,0262 | 0,1714 | 0,0694 | 0,0365 | 1,2398 | 1,2114 | 1,2451 | 1,2060 | 1,2256 | 1,3373 | 1,3598 |
| 8 | 0,0428 | 0,1714 | 0,0694 | 0,0365 | 1,2611 | 1,2345 | 1,2238 | 1,2540 | 1,2434 | 1,3533 | 1,3598 |
| 9 | 0,0262 | 0,1142 | 0,0396 | 0,0607 | 1,1456 | 1,1794 | 1,1892 | 1,1821 | 1,1741 | 1,2820 | 1,2769 |
| 10 | 0,0428 | 0,1142 | 0,0396 | 0,0607 | 1,1599 | 1,1989 | 1,2025 | 1,1847 | 1,1865 | 1,2926 | 1,2769 |
| 11 | 0,0262 | 0,1714 | 0,0396 | 0,0607 | 1,2380 | 1,2806 | 1,2664 | 1,2451 | 1,2575 | 1,3666 | 1,3598 |
| 12 | 0,0428 | 0,1714 | 0,0396 | 0,0607 | 1,2433 | 1,2780 | 1,2904 | 1,2682 | 1,2700 | 1,3799 | 1,3598 |
| 13 | 0,0262 | 0,1142 | 0,0694 | 0,0607 | 1,1936 | 1,1421 | 1,1687 | 1,1492 | 1,1634 | 1,2731 | 1,2769 |
| 14 | 0,0428 | 0,1142 | 0,0694 | 0,0607 | 1,1945 | 1,1696 | 1,1545 | 1,1776 | 1,1740 | 1,2846 | 1,2769 |
| 15 | 0,0262 | 0,1714 | 0,0694 | 0,0607 | 1,2327 | 1,2380 | 1,2611 | 1,2487 | 1,2451 | 1,3551 | 1,3598 |
| 16 | 0,0428 | 0,1714 | 0,0694 | 0,0607 | 1,2380 | 1,2433 | 1,2842 | 1,2647 | 1,2576 | 1,3693 | 1,3598 |
| 17 | 0,0179 | 0,1428 | 0,0545 | 0,0486 | 1,1687 | 1,1758 | 1,2078 | 1,2149 | 1,1918 | 1,3059 | 1,3192 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 18 | 0,0511 | 0,1428 | 0,0545 | 0,0486 | 1,1936 | 1,2211 | 1,2398 | 1,2265 | 1,2203 | 1,3325 | 1,3192 |
| 19 | 0,0345 | 0,0856 | 0,0545 | 0,0486 | 1,0959 | 1,1545 | 1,1368 | 1,1243 | 1,1279 | 1,2443 | 1,2443 |
| 20 | 0,0345 | 0,2000 | 0,0545 | 0,0486 | 1,3321 | 1,3011 | 1,2922 | 1,2753 | 1,3002 | 1,4101 | 1,4101 |
| 21 | 0,0345 | 0,1428 | 0,0247 | 0,0486 | 1,2167 | 1,2291 | 1,1794 | 1,1989 | 1,2060 | 1,3236 | 1,3130 |
| 22 | 0,0345 | 0,1428 | 0,0843 | 0,0486 | 1,1750 | 1,1865 | 1,1918 | 1,2211 | 1,1936 | 1,3023 | 1,3130 |
| 23 | 0,0345 | 0,1428 | 0,0545 | 0,0244 | 1,1599 | 1,1972 | 1,2060 | 1,1758 | 1,1847 | 1,2997 | 1,3139 |
| 24 | 0,0345 | 0,1428 | 0,0545 | 0,0728 | 1,2398 | 1,2256 | 1,2149 | 1,1865 | 1,2167 | 1,3281 | 1,3139 |
| 25 | 0,0345 | 0,1428 | 0,0545 | 0,0486 | 1,1599 | 1,2300 | 1,1892 | 1,2345 | 1,2034 | 1,2025 | 1,2025 |
| 26 | 0,0345 | 0,1428 | 0,0545 | 0,0486 | 1,1519 | | | | 1,2034 | 1,2025 | 1,2025 |
| 27 | 0,0345 | 0,1428 | 0,0545 | 0,0486 | 1,2416 | | | | 1,2034 | 1,2025 | 1,2025 |
| 28 | 0,0345 | 0,1428 | 0,0545 | 0,0486 | 1,2487 | | | | 1,2034 | 1,2025 | 1,2025 |
| 29 | 0,0345 | 0,1428 | 0,0545 | 0,0486 | 1,1519 | | | | 1,2034 | 1,2025 | 1,2025 |
| 30 | 0,0345 | 0,1428 | 0,0545 | 0,0486 | 1,1847 | | | | 1,2034 | 1,2025 | 1,2025 |
| 31 | 0,0345 | 0,1428 | 0,0545 | 0,0486 | 1,2416 | | | | 1,2034 | 1,2025 | 1,2025 |

Математическую модель изменение критерия отклика $y \left(\frac{\rho_K}{\rho_H} \right)$ можно записать в следующем виде [4, с.97]:

$$y = b_0 + \sum_1^K b_i \cdot x_i + \sum_{i < j}^K b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_1^K b_{ii} \cdot x_i^2, \quad (3)$$

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.

Уравнение второго порядка (3) в случае четырехфакторного эксперимента примет следующий вид:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{44} \cdot x_4^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4. \quad (4)$$

Коэффициенты регрессии определяются по формулам 63-66 [4, с.102]:

$$b_0 = a_1 \sum_{u=1}^N \bar{y}_u - a_2 \sum_{i=1}^K \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \cdot \bar{y}_u; \quad (5)$$

$$b_i = a_3 \sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot \bar{y}_u; \quad (6)$$

$$b_{ij} = a_4 \sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot \bar{y}_u; \quad i \neq j; \quad i, j = 1, 2, \dots, K; \quad (7)$$

$$b_{ii} = a_5 \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \cdot \bar{y}_u + a_6 \sum_{i=1}^K \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \cdot \bar{y}_u - a_7 \sum_{u=1}^N \bar{y}_u, \quad (8)$$

где a_1, \dots, a_7 - коэффициенты, определенные по [4, с.103]:

$$a_1 = 0.14285; \quad a_2 = 0.03572; \quad a_3 = 0.04167; \quad a_4 = 0.06250;$$
$$a_5 = 0.03125; \quad a_6 = 0.00372; \quad a_7 = 0.03497;$$

\bar{y}_u - среднее значение коэффициента оптимизации, полученное в u -ом опыте;

N - число строк в матрице эксперимента (количество опытов).

Для расчета коэффициентов регрессии применим компьютерную программу [10], измененную для нашего случая и получим их значения:

$$b_0 = 1.202470, \quad b_1 = 0.006663, \quad b_2 = 0.041451, \quad b_3 = -0.005330, \quad b_4 = 0.007103,$$
$$b_{11} = 0.029180, \quad b_{22} = 0.031180, \quad b_{33} = 0.027627, \quad b_{44} = 0.027852, \quad b_{12} = 0.000666,$$
$$b_{13} = 0.000228, \quad b_{14} = -0.000444, \quad b_{23} = -0.000662, \quad b_{24} = 0.000884, \quad b_{34} = 0.000447.$$

С учетом коэффициентов регрессии математическая модель (4) примет следующий вид:

$$y_1 = 1.202470 + 0.006663 \cdot x_1 + 0.041451 \cdot x_2 - 0.005330 \cdot x_3 + 0.007103 \cdot x_4 + 0.029180 \cdot x_1^2 +$$
$$+ 0.031180 \cdot x_2^2 + 0.027627 \cdot x_3^2 + 0.027852 \cdot x_4^2 + 0.000666 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.000228 \cdot x_1 \cdot x_3 -$$
$$- 0.000444 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0.000662 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0.000884 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0.000447 \cdot x_3 \cdot x_4. \quad (9)$$

Для оценки точности математического описания, значения параметра оптимизации определены во всех экспериментальных точках (таблица 3).

Проверка соответствия экспериментальных данных с расчетными показала, что отклонение между Y_s и Y_R доходит в некоторых случаях до 9,75 %.

Дисперсия неадекватности математической модели, описывающей изменение критерия отклика, и дисперсия ошибки эксперимента по данным шести опытов в центре плана соответственно равны: $S_{LF}^2 = 0.00306$ и $S_y^2 = 0.002$.

Критерий Фишера будет равен: $F=1.53$.

Чтобы принять гипотезу об адекватности, полученное значение критерия Фишера F должно быть меньше табличного. По табличным данным [4] значение критерия Фишера при 5%-ном уровне значимости и числе степеней свободы 20 и 75 составляет $F_{0.05} = 1.72$.

Так как $F_{\text{экс}} = 1,53 < F_{0.05} = 1.72$, гипотезу об адекватности описания уравнением (9) результатов эксперимента можно считать верной с 95 %-ой вероятностью.

Выполним проверку значимости коэффициентов регрессии, которая осуществляется путем вычисления доверительных интервалов, в пределах которых должна находиться истинная величина коэффициентов регрессии.

На основе результатов расчета, при помощи компьютерной программы [10], получаем, что коэффициенты регрессии (9) $b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}$ незначимы, а знак перед значением коэффициента указывает в какую сторону изменится критерий оптимизации при соответственном изменении x_i .

С помощью компьютерной программы [10] делаем пересчет значения параметра оптимизации Y_{R0} (таблица 3).

Проверка соответствия экспериментальных данных с расчетными показала, что отклонение между Y_s и Y_{R0} увеличилось и составляет в некоторых случаях $\approx 11\%$.

Расчетное значение критерия Фишера будет: $F=1.54$.

По табличным данным значение критерия Фишера при 5%-ном уровне значимости и числе степеней свободы 20 и 75 составляет $F_{0.05} = 1.72$.

Так как $F=1,54 < F_{0,05}=1,72$, то гипотеза адекватности принимается.

Уравнение регрессии, описывающее процесс уплотнения почвы от вибродинамических нагрузок в критериальной форме будет иметь вид:

$$\frac{\rho_k}{\rho_n} = 3.0960 - 29.2267 \cdot \left(\frac{G}{E_c l^2} \right) - 9.4376 \cdot \left(\frac{p_w}{E_c} \right) - 13.5640 \cdot \left(\frac{\eta V}{l E_c} \right) - 18.4907 \cdot \left(\frac{f \eta}{E_c} \right) +$$

$$+ 423.5759 \cdot \left(\frac{G}{E_c l^2} \right)^2 + 38.1194 \cdot \left(\frac{p_w}{E_c} \right)^2 + 124.4404 \cdot \left(\frac{\eta V}{l E_c} \right)^2 + 190.2330 \cdot \left(\frac{f \eta}{E_c} \right)^2. \quad (10)$$

На рисунке 3 показана зависимость изменения критерия отклика от влияния основных критериев подобия.

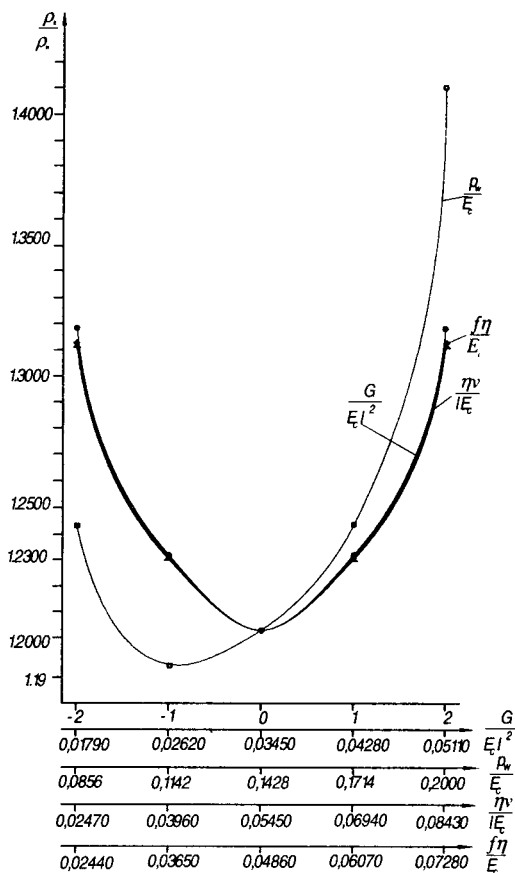


Рисунок 3. Зависимость изменения критерия отклика $y \left(\frac{\rho_k}{\rho_n} \right)$ от влияния основных критериев подобия

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

Выводы

1 Исследования, проведенные на лабораторном стенде, конструкция которого, защищена патентом на полезную модель, позволили изучить влияние одних факторов при варьировании других на изменение плотности почвы в критериальном виде с помощью теории подобия и анализа размерностей.

2 По результатам исследований получено уравнение регрессии (10) связывающие между собой в критериальном виде критерий отклика от критериев подобия.

3 Коэффициенты регрессии b_{12} , b_{13} , b_{14} , b_{23} , b_{24} , b_{34} выбыли из уравнения (9), это говорит о том, что при совместном действии двух факторов на результат эксперимента происходит их простое математическое сложение.

4 Подтверждена адекватность экспериментальных результатов исследований по критерию Фишера при 5%-ном уровне значимости.

5 Из рисунка 3 видно, что при увеличении нагрузки на ось колеса, повышении давления воздуха в шине, увеличении скорости движения и частоты колебаний значение плотности почвы увеличивается (значение факторов X_1 , X_3 , на уровнях от -2 до 0, а фактора X_2 от -2 до -1 находятся в виртуальной области условий работы сельскохозяйственной техники, поэтому ими можно пренебречь).

6 Наименьшее уплотнение почвы наблюдается тогда, когда все критерии подобия находятся на основном (нулевом) уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Czigarew, J.W. Badania wibro-udarowego oddziaływania kol ciągnica na glebe metoda modeli fizycznych / J.W. Czigarew, N.N. Romaniuk, W.M. Mikula // Ekologiczne aspekty mechanizacji produkcji roślinnej: XI Międzynarodowe sympozjum, Warszawa, 13–14 wrzesnia 2005r. / Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Inżynierii produkcji. – Warszawa, 2005. – P.67–73.

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

3. 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.

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

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

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

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

8. Стенд для исследования взаимодействия колес с почвой при статическом и вибродинамическом характере нагружения: пат. Респ. Беларусь, МПК G 01M17/00 / Н.Н. Романюк [и др.]; заявитель Учрежд. Образ. «Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. – № u ; заявл. . .06; опубл. . .06// Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № . – С.

9. Быховский, И.И. Центробежный вибрационный привод строительных и дорожных машин / И.И. Быховский, А.М. Виленкин. – Москва: ЦНИИТЭстроймаш, 1968. – 58с.

10. 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.