

## 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  $\rho_n, \rho_k$  – соответственно плотность почвы до воздействия деформатора (начальная) и после воздействия (конечная);

$E_c$  – статический модуль упругости почвы;

$\eta$  – 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 данным [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 <sub>w</sub> ]; X2	скорость движения, м/с, [V <sub>к</sub> ]; 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	$\epsilon_e$	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 <sub>0</sub>	0	0,0345	0,1428	0,0545	0,0486
Нижний уровень	-1	0,0262	0,1142	0,0396	0,0365
Интервал варьирования	$\epsilon_e$	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].

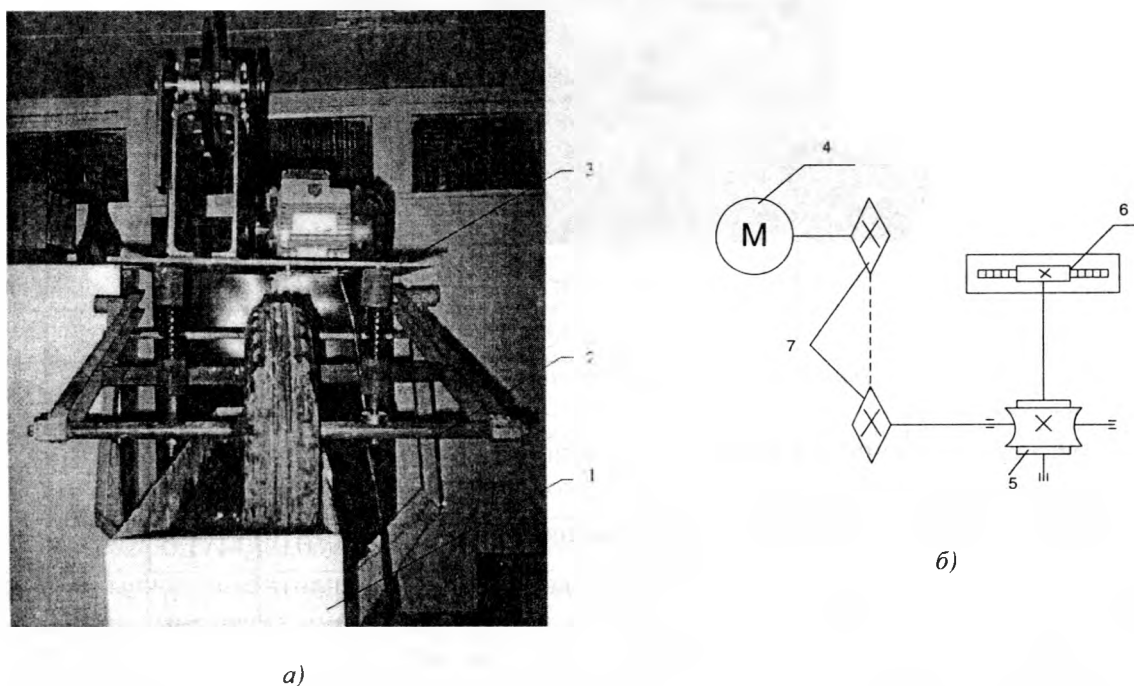


Рисунок 1. Стенд для исследования взаимодействия колес с почвой при вибродинамическом нагружении:  
а) общий вид; б) привод колеса

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

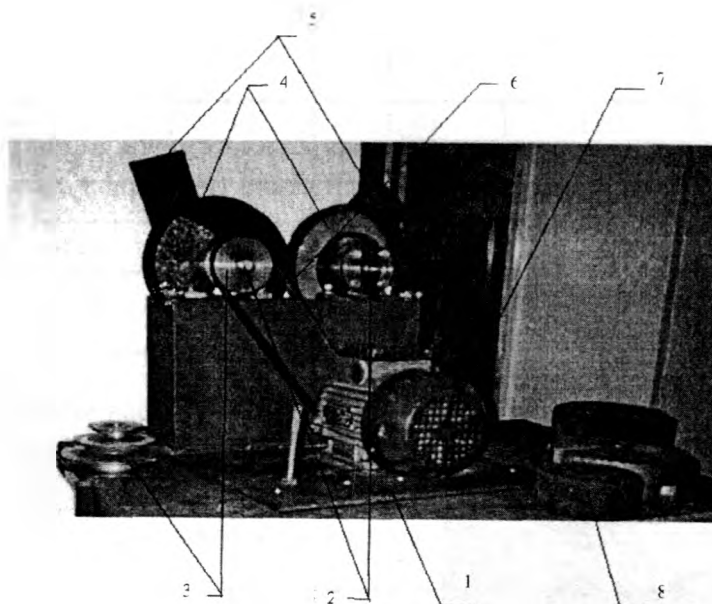


Рисунок 2. Вибровозбудитель направленных действий

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.

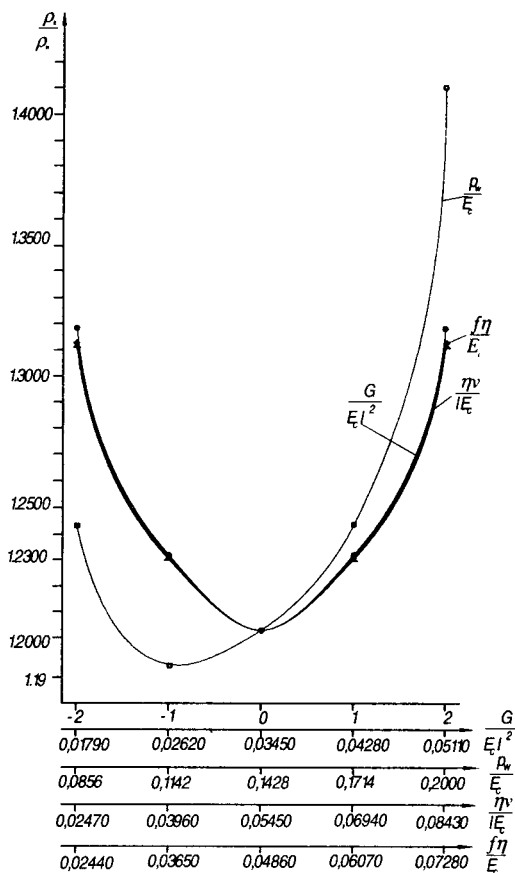


Рисунок 3. Зависимость изменения критерия отклика  $y \left( \frac{\rho_k}{\rho_n} \right)$  от влияния основных критериев подобия

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

### 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. Рошин. – 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.