

РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗАВИСИМОСТИ МАКСИМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ КОЛЕС ТРАКТОРА НА ПОЧВУ ОТ ПАРАМЕТРОВ ТРАКТОРА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВЫ.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Хафизов К.А., Хафизов Р.Н.

Реферат. На основе использования теории подобия выявлены критерии подобия для определения зависимости максимального давления колеса трактора на почву. Каждый критерий подобия включает несколько параметров, характеризующих трактор, его движитель и физико-механические свойства почвы. Критерии подобия приняты в качестве факторов в многофакторном эксперименте. Были запланированы и проведены многофакторные экспериментальные исследования. Для обработки результатов экспериментов составлена программа с использованием подсистемы Statistics Toolbox системы компьютерной математики Matlab. В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения зависимости максимального давления колеса трактора на почву от параметров трактора и физико-механических свойств почвы. Статистические данные по уравнениям, такие как – коэффициент множественной корреляции, критерий Фишера, критерий Стьюдента, свидетельствуют о значимости полученных уравнений по вариантам экспериментов, а также значимости коэффициентов уравнений регрессии.

Ключевые слова: многофакторный эксперимент, давление колеса на почву, параметры трактора, твердость почвы, плотность почвы, диаметр колеса, ширина профиля шины, нагрузка на колесо, давление в шинах.

Ведение. На основе использования теории подобия были выявлены некоторые возможные варианты уравнения, описывающего зависимость максимального давления колес трактора на почву от параметров трактора, его движителя и свойств почвы, представленных в виде критериев подобия [1, 2]:

$$1. \quad \frac{q_{\max}}{\rho_w} = \varphi \left(\frac{B}{D}; \frac{M}{D^3 \rho_n}; \frac{H}{\rho_w} \right)$$

$$2. \quad \frac{q_{\max}}{\rho_w} = \varphi \left(\frac{B}{D}; \frac{H}{\rho_w} \right);$$

$$3. \quad \frac{q_{\max}}{\rho_w} = \varphi \left(\frac{B}{D}; \frac{H}{\rho_w}; \frac{V_p \sqrt{M}}{\sqrt{D^3} \sqrt{\rho_w}} \right),$$

где q_{\max} – максимальное давление колеса на почву, kH/m^2 ; ρ_w – давление воздуха в шинах, H/m^2 ; D – диаметр колеса, м; M – масса трактора, приходящаяся на одно колесо, кг; B – ширина профиля колеса, м; H – твердость почвы, Па; ρ_n – плотность почвы, кг/м^3 ; V_p – линейная скорость оси колеса, м/с.

Была разработана методика проведения серии многофакторных экспериментов для выявления зависимости максимального давления колеса трактора от перечисленных параметров [3].

В данной статье приводятся результаты статистического анализа материалов, полученных в ходе экспериментальных исследований.

Цель работы. Обработать результаты экспериментальных исследований, методика которых описана в работе [3] и получить уравнения, адекватно отражающие результаты экспериментов.

Методы исследования. Для обработки результатов экспериментов с целью получения уравнений максимального давления тракторных колес на почву была разработана программа расчетов с использованием подсистемы Statistics Toolbox системы компьютерной математики Matlab. Результаты полнофакторных экспериментов по определению зависимости давления движителей трактора на почву от параметров трактора, его движителя и физико-механических свойств почвы приведены в таблицах 1, 2, 3, и 4.

Статистический анализ данных. В таблице 1 приведены результаты первого варианта многофакторного эксперимента, проведенного с использованием трактора МТЗ-320. Статистический анализ проводился с использованием полиномов различного вида, для выявления наиболее приемлемого уравнения максимального давления колеса на почву, адекватно отражающего результаты экспериментов. После обработки массива данных, приведенных в таблице 1, получены коэффициенты уравнения регрессии для полиномов всех принятых видов – таблица 5.

Как видно из таблицы 5, принятые уравнения статистически значимы, что определяется коэффициентом множественной корреляции R и критерием Фишера F , который для всех уравнений многократно выше табличного значения F_T .

Статистические данные значимости коэффициентов для первого вида полинома приведены в таблице 6.

Все коэффициенты уравнения значимы, что видно из таблицы 6. Величина рассчитан-

Таблица 1 – Результаты трехфакторного эксперимента с трактором МТЗ-320

№ опыта	Фон поля	В, м	D, м/ D ³ , м ³	V/D	X1	H, Н/м ² (Па)	ρ _w , Н/ м ² (Па)	H/ρ _w	X2	ρ _n , кг/ м ³	M, кг	ρ _n D ³ /M	X3	Y q _{max} /ρ _w
1	После вспашки	0,284	0,913/ 0,76	0,31	-	2,5·10 ⁵	2,4·10 ⁵	0,83	-	800	506	1,2	-	0,97
2	После вспашки	0,284	0,913/ 0,76	0,31	+	2,5·10 ⁵	2,4·10 ⁵	0,83	-	800	506	1,2	-	0,97
3	Залежь	0,284	0,913/ 0,76	0,31	-	16·10 ⁵	0,8·10 ⁵	20	+	1300	820	1,2	-	2,71
4	Залежь	0,284	0,913/ 0,76	0,31	+	16·10 ⁵	0,8·10 ⁵	20	+	1300	820	1,2	-	2,71
5	После вспашки	0,284	0,913/ 0,76	0,31	-	2,5·10 ⁵	2,4·10 ⁵	0,83	-	800	302	2	+	0,71
6	После вспашки	0,284	0,913/ 0,76	0,31	+	2,5·10 ⁵	2,4·10 ⁵	0,83	-	800	302	2	+	0,71
7	Залежь	0,284	0,913/ 0,76	0,31	-	16·10 ⁵	0,8·10 ⁵	20	+	1300	494	2	+	1,558
8	Залежь	0,284	0,913/ 0,76	0,31	+	16·10 ⁵	0,8·10 ⁵	20	+	1300	494	2	+	1,558

Таблица 2 – Результаты трехфакторного эксперимента с трактором МТЗ-82

№ опыта	Фон поля	В, м	D, м (D ³ , м ³)	V/D	X1	H, Н/м ² (Па)	ρ _w , Н/ м ² (Па)	H/ρ _w	X2	ρ _n , кг/ м ³	M, кг	ρ _n D ³ /M	X3	Y q _{max} /ρ _w
1	После вспашки	0,244	1,54/ 3,65	0,16	-	2·10 ⁵	2,4·10 ⁵	0,83	-	800	973	3	-	1,1508
2	После вспашки	0,429	1,54/ 3,65	0,28	+	2·10 ⁵	2,4·10 ⁵	0,83	-	800	973	3	-	0,797
3	Залежь	0,244	1,54/ 3,65	0,16	-	12·10 ⁵	0,8·10 ⁵	15	+	1200	1460	3	-	3,2426
4	Залежь	0,429	1,54/ 3,65	0,28	+	12·10 ⁵	0,8·10 ⁵	15	+	1200	1460	3	-	2,9730
5	После вспашки	0,244	1,54/ 3,65	0,16	-	2·10 ⁵	2,4·10 ⁵	0,83	-	800	921	3,2	+	1,0528
6	После вспашки	0,429	1,54/ 3,65	0,28	+	2·10 ⁵	2,4·10 ⁵	0,83	-	800	921	3,2	+	0,8566
7	Залежь	0,244	1,54/ 3,65	0,16	-	12·10 ⁵	0,8·10 ⁵	15	+	1200	1368	3,2	+	2,6043
8	Залежь	0,429	1,54/ 3,65	0,28	+	12·10 ⁵	0,8·10 ⁵	15	+	1200	1368	3,2	+	2,5517

Таблица 3 – Результаты двухфакторного эксперимента с тракторами МТЗ-82 и МТЗ-320

№ опыта	Фон поля	Марка трактора	В, м	D, м/ D ³ , м ³	V/D	X1	H, Н/м ² (Па)	ρ _w , Н/м ² (Па)	H/ρ _w	X2	Y q _{max} /ρ _w
1	После вспашки	МТЗ-82	0,345	1,54/3,65	0,22	-	10·10 ⁵	2,4·10 ⁵	4,2	-	0,518
2	После вспашки	МТЗ-320	0,284	0,913/0,76	0,31	+	10·10 ⁵	2,4·10 ⁵	4,2	-	0,687
3	Залежь	МТЗ-82	0,345	1,54/3,65	0,22	-	30·10 ⁵	0,8·10 ⁵	37,5	+	1,741
4	Залежь	МТЗ-320	0,284	0,913/0,76	0,31	+	30·10 ⁵	0,8·10 ⁵	37,5	+	1,709

Таблица 4 – Результаты трехфакторного эксперимента с тракторами МТЗ-82 и МТЗ-320

№ опыта	Фон поля	Марка трактора	B, м	D, м/ D ³ , м ³	B/D	X1	H, Н/ м ² (Па)	p _w , Н/м ² (Па)	H/p _w	X2	V, м/с	M, кг	$\frac{V_p \sqrt{M}}{\sqrt{D^3} \sqrt{p_w}}$	X3	Y q _{max} / p _w
1	После вспашки	МТЗ-82	0,345	1,54/ 3.65	0,22	-	10·10 ⁵	2,4·10 ⁵	4,2	-	2,54	1355	0,10	-	1,4813
2	После вспашки	МТЗ-320	0,284	0,913/ 0,76	0,31	+	10·10 ⁵	2,4·10 ⁵	4,2	-	1,72	608	0,10	-	1,5796
3	Залежь	МТЗ-82	0,345	1,54/ 3.65	0,22	-	30·10 ⁵	0,8·10 ⁵	37,5	+	1,46	1355	0,10	-	3,5342
4	Залежь	МТЗ-320	0,284	0,913/ 0,76	0,31	+	30·10 ⁵	0,8·10 ⁵	37,5	+	1,00	608	0,10	-	3,0388
5	После вспашки	МТЗ-82	0,345	1,54/ 3.65	0,22	-	10·10 ⁵	2,4·10 ⁵	4,2	-	8,12	1355	0,32	+	1,1613
6	После вспашки	МТЗ-320	0,284	0,913/ 0,76	0,31	+	10·10 ⁵	2,4·10 ⁵	4,2	-	5,53	608	0,32	+	1,1511
7	Залежь	МТЗ-82	0,345	1,54/ 3.65	0,22	-	30·10 ⁵	0,8·10 ⁵	37,5	+	4,70	1355	0,32	+	2,7913
8	Залежь	МТЗ-320	0,284	0,913/ 0,76	0,31	+	30·10 ⁵	0,8·10 ⁵	37,5	+	3,20	608	0,32	+	3,3313

Таблица 5 – Статистические данные при определении коэффициентов уравнений регрессии различных видов

Вид полинома	Статистика (Stats)	
	Коэффициент множественной корреляции R	Критерий Фишера F/F_T
$Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_3X_3+b_4X_1X_2+b_5X_1X_3+b_6X_2X_3$	0,93872	43,400/2,60
$Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_3X_3+b_4X_1X_3+b_5X_2X_3$	0,93655	53,141/2,71
$Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_3X_3+b_4X_1X_2+b_5X_2X_3$	0,92759	46,114/2,71
$Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_3X_3+b_4X_1X_2+b_5X_1X_3$	0,91324	45,253/2,71
$Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_3X_3+b_4X_1X_3$	0,90526	45,389/2,87
$Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_3X_3+b_4X_1X_2$	0,88072	35,073/2,87
$Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_3X_3+b_4X_2X_3$	0,91187	49,149/2,87
$Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_3X_3$	0,86282	41,931/3,10

Таблица 6 – Коэффициенты (b0, b1, b2, b3, b4, b5, b6) уравнения регрессии

Коэффициенты уравнения регрессии		Значимость коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента (t)	95% доверительные интервалы для b - коэффициентов уравнения регрессии (bint)	
			нижний	верхний
b0	-537,03	-2,3532	-1004,2	-69,917
b1	1739,2	2,3598	230,64	3247,8
b2	4,8528	0,77122	-8,0265	17,732
b3	254,99	1,7014	-51,768	561,75
b4	-15,253	-0,75138	-56,805	26,298
b5	-824,87	-1,7047	-1815,3	165,54
b6	-0,041826	-2,9253	-0,071092	-0,01256

ных коэффициентов уравнения находится в 95% доверительном интервале для коэффициентов уравнения регрессии.

Разница между экспериментальными и расчетными значениями функции находится в пределах 95%-го доверительного интервала.

Окончательное уравнение по полиному первого вида из таблицы 5 для расчета максимального давления колеса трактора на почву в натуральных показателях представляет из себя выражение:

$$q_{max} = ((1739,2 \rho_w B M + 4,85 D H M + 255 \rho_n B D^4 - 15,25 B H M - 824,87 \rho_w \rho_n B D^3 - 0,04183 \rho_n H D^4) / D M) - 537 \rho_w .$$

Как видно из уравнения, использование полинома первого вида усложняет формулу расчета максимального давления колеса на почву, при переводе уравнения регрессии на натуральные показатели, она становится громоздкой и неудобной для использования в расчетах. Поэтому, при небольшом ущербе для точности отображения экспериментальных данных, окончательно остановимся на последнем виде полинома из таблицы 5.

Тогда уравнение регрессии для расчета максимального давления колеса на почву в натуральных показателях (по данным таблицы 1) представится в следующем виде:

$$q_{max} = 431,67 B p_w / D - 31,41 p_w + 0,063845 H - 0,91676 \rho_n p_w D^3 / M. \quad (1)$$

В таблице 2 приведены результаты первого варианта полнофакторного эксперимента с использованием трактора МТЗ-82, что позволяет расширить границы предельных значений принятых критериев подобия. По экспериментальным данным проведен статистический анализ, где в качестве полинома принято уравнение вида:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3.$$

По результатам анализа получено уравнение в натуральных показателях:

$$q_{max} = 5,1987 p_w - 2,0027 B p_w / D + 0,13413 H - 1,2597 * (p_w p_w D^3) / M. \quad (2)$$

Коэффициент множественной корреляции $R=0,984$ и критерий Фишера $F_7=82,669/3,01$ показывают статистическую значимость уравнения.

Для повышения качества предсказания максимального давления колеса на почву за пределами экспериментальных значений факторов, решено объединить результаты экспериментальных данных таблицы 1 и таблицы 2, что должно улучшить качество работы искомого уравнения, особенно качество экстраполяции выходного показателя.

Проведен совмещенный статистический анализ данных, приведенных в таблице 1 и 2.

В качестве полинома принято уравнение вида:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3.$$

В результате анализа получено уравнение регрессии в натуральных показателях:

$$q_{max} = 3,46 p_w - 7,4493 B p_w / D + 0,075552 H - 0,23353 (p_w p_w D^3) / M. \quad (3)$$

Коэффициент множественной корреляции $R=0,694$ и критерий Фишера $F/F_7=21,13/2,82$ показывают статистическую значимость уравнения.

В таблице 3 приведены результаты двухфакторного эксперимента по второму варианту экспериментальных исследований, учитывающий, из физико-механических свойств почвы, только ее твердость.

В результате обработки статистического материала получено уравнение регрессии в натуральных показателях:

$$q_{max} = 0,2430 p_w + 1,0593 p_w B / D + 0,0289 H. \quad (4)$$

Коэффициент множественной корреляции $R=0,88$ и критерий Фишера $F/F_7=32,34/4,26$ доказывают статистическую значимость уравнения.

В таблице 4 приведены результаты экспериментальных исследований, где в качестве одного из факторов, влияющих на максимальное давление колеса на почву, принята рабочая скорость трактора. Эксперименты проведены для проверки информации, имеющейся в литературе [4, 5, 6, 7], что изменение линейной скорости колесного движителя не влияет на давление колеса на почву.

По результатам статистического анализа уравнение регрессии для расчета максимального давления колеса на почву в натуральных показателях представляет из себя следующее выражение:

$$q_{max} = 0,3623 \rho_w B / D + 1,3008 \rho_w + 0,055 H - 1,3562 \rho_w V \sqrt{M} / (\sqrt{D^3} \sqrt{\rho_w}). \quad (5)$$

Коэффициент множественной корреляции $R=0,96$ и критерий Фишера $F/F_7=32,51/3,10$ показывают статистическую значимость уравнения.

Выводы. В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения зависимости максимального давления колеса трактора на почву от параметров трактора и физико-механических свойств почвы. Статистические данные по уравнениям, такие как – коэффициент множественной корреляции, критерий Фишера, критерий Стьюдента, свидетельствуют об адекватности полученных уравнений по вариантам экспериментов, а также значимости коэффициентов уравнений регрессии. Зависимость максимального давления колес трактора на почву от парамет-

ров трактора и физико-механических свойств почвы носит сложный характер – от линейного до кубического. Необходимо провести графический анализ полученных уравнений и выявить характер влияния параметров тракто-

ра и свойств почвы на давление колеса трактора на почву, а также возможность использования уравнений за пределами экспериментальных значений факторов.

Литература

1. Хафизов Р.Н. Метод расчета энергии урожая, потерянного из-за негативного воздействия движителей // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2015. № 3 (37). – С. 81-85.
2. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. - М.: «Наука», 1977. – 440 с.
3. Хафизов Р.Н. Методика многофакторного эксперимента по определению зависимости давления движителей трактора на почву от параметров трактора, движителя и физико-механических свойств почвы // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 3 (37). – С. 86-92.
4. Кseneвич И.П. Ходовая система – почва – урожай / И.П. Кseneвич, В.А. Скотников, М.И. Ляско – М.: Агропромиздат, 1985.–304 с.
5. Ногтиков А.А. Влияние параметров навесных систем трактора ЛТЗ-155 на степень уплотнения почвы / А.А. Ногтиков, С.А. Хапров // Достижения науки и техники АПК. – 2007. – № 9. – С. 38-39.
6. Ходовые системы тракторов: (Устройство, эксплуатация, ремонт): Справочник/В. М. Забродский, А. М. Файнлейб, Л. Н. Кугин, О. Л. Уткин-Любовцов. – М.: Агропромиздат, 1986, – 271 с.
7. Хафизов К.А. Методика расчета МТА по критерию «Совокупные энергозатраты» // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2006. – №3. – С. 46 - 51.
8. Хафизов К.А. Пути снижения энергетических затрат на производственных процессах в сельском хозяйстве. – Казань: Изд-во КГУ, 2007. – 272 с.
9. Щитов С.В. Техногенное воздействие на почву колесных тракторов / С.В. Щитов, П.В. Тихончук, Н.В. Спириданчук // Достижения науки и техники АПК. – 2012. – № 6. – С. 73-74.

Сведения об авторах:

Хафизов Камил Абдулхакович – доктор технических наук, профессор кафедры, e-mail: fts-kgau@mail.ru

Хафизов Рамил Наилевич – старший преподаватель, e-mail: ramilajz@mail.ru

ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», г. Казань, Россия.

RESULTS OF MULTIVARIATE EXPERIMENT TO DETERMINE DEPENDENCE OF THE MAXIMUM PRESSURE OF TRACTOR WHEELS ON THE SOIL FROM TRACTOR'S PARAMETERS AND PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SOIL. STATISTICAL ANALYSIS

Khafizov K.A., Khafizov R.N.

Abstract. A similarity criteria were revealed to determine the dependence of maximum pressure of the tractor wheel on the soil on the basis of the use of similarity theory. Each similarity criterion includes several parameters, characterizing the tractor, its propeller and physical and mechanical properties of the soil. The similarity criteria is taken as factors in the multivariate experiment. Multifactorial experimental studies were planned and carried out. We used Statistics Toolbox subsystem of Matlab computer mathematics system for processing the results of experiments. As a result of statistical processing of the experimental data by the equation we obtained a dependence of maximum pressure of the tractor wheel on the soil from tractor parameters, and physical and mechanical properties of the soil. Statistical data on the equations, such as - multiple correlation coefficient, Fisher's criterion, Student's criterion, indicate the significance of equations of the experiments variants, as well as the significance of the coefficients of the regression equations.

Key words: multivariate experiment, wheel pressure on the ground, the tractor's parameters, hardness of soil, soil density, the diameter of the wheel, the width of a tire, a load on wheel, pressure in tires.

References

1. Khafizov R.N. Method of crop energy calculating, lost due to the negative impact of propulsion. [Metod rascheta energii urozhaya, poteryannogo iz-za negativnogo vozdeystviya dvizhiteley]. // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. – *The Herald of Kazan State Agrarian University*. 2015. № 3 (37). P. 81-85.
2. Khafizov R.N. Methods of complex experiment to determine the dependence of the tractor propellers pressure on the soil according to the tractor parameters, propeller and mechanical properties of the soil. [Metodika mnogofaktornogo eksperimenta po opredeleniyu zavisimosti davleniya dvizhiteley traktora na pochvu ot parametrov traktora, dvizhitelya i fiziko-mekhanicheskikh svoystv pochvy]. // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. – *The Herald of Kazan State Agrarian University*. 2015. № 3 (37). P. 86-92.
3. Ksenevich I.P. *Khodovaya sistema – pochva – urozhay*. [Suspension system - soil – crop]. / I.P. Ksenevich, V.A. Skotnikov, M.I. Lyasko – М.: Агропромиздат, 1985.–P. 304.
4. Nogtikov A.A. Influence of parameters of hinged systems of the LTZ-155 tractor on extent of consolidation of the soil [Vliyanie parametrov navesnykh sistem traktora LTZ-155 na stepen uplotneniya pochvyi] / A.A. Nogtikov, S.A. Naprov // *Dostizheniya nauki i tekhniki apk. – Advances in agriculture science and technology*. –2007. – № 9. – P. 38-39.
5. Shitov S.V. Anthropogenic impact on soil by wheeled tractors [Tehnogennoe vozdeystvie na pochvu kolesnykh traktorov] / S.V. SHitov , P.V. Tikhonchuk , N.V. Spiridanchuk // *Dostizheniya nauki i tekhniki apk. – Advances in agriculture science and technology*. –2012. – № 6. – P. 73-74.

Authors:

Khafizov Kamil Abdulkhakovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: fts-kgau@mail.ru

Khafizov Ramil Nailevich - Senior lecturer, e-mail: ramilajz@mail.ru

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia