

DOI:10.26104/NNTIK.2023.68.15.006

Тургунбаев М.С.

ЖЕР КАЗУУЧУ МАШИНАНЫН КЕСУУЧУ АСПАБЫ
МЕНЕН ДИСПЕРСТУУ ТОПУРАКТЫ КЕСУУ ЖЫЙЫНТЫКТАРЫНЫН
СТАТИСТИКАЛЫК АНАЛИЗИ

Тургунбаев М.С.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕЗАНИЯ
ДИСПЕРСНОГО ГРУНТА С КАМЕНИСТЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ РЕЖУЩИМ
ИНСТРУМЕНТОМ ЗЕМЛЕРОЙНОЙ МАШИНЫ

M. Turgunbaev

STATISTICAL ANALYSIS OF THE RESULTS OF CUTTING
OF DISPERSED SOIL WITH STONY INCLUSION BY THE CUTTING
TOOL OF AN EARTHMOVING MACHINE

УДК: 624.131.533

Жер казуучу машинанын кууч кесуучу аспабы менен ири таштуу дисперстүү топуракты кесүү подсистемасы каралат. Топурактын минералдык бөлүкчөлөрү Пуассондук бөлүштүрүүгө баш ийет жана анын негизинде топурактын структурасы моделденет. Симметриялуулуктун, нормалдуулуктун, ортогоналдуулуктун жана ротатабелдүүлүктүн талаптарын эске алуу менен таштуу топуракты кесүү экспериментинин планы түзүлдү. Таасир этүүчү факторлор жана алардын өзгөрүү диапазондору, сызыктуу эмес экспоненциалдык регрессиялык модель тандалат. Эксперименталдык планды ишке ашыруунун натыйжасында пайда болгон эмпирикалык жыйындысы дескриптивдик статистикасынын, корреляциялык, регрессиялык жана дисперстик талдоолордун негизинде статистикалык анализ жүргүзүлдү. Эмпирикалык маалыматтардын нормалдуу бөлүштүрүлүшү Колмогоров-Смирнов, Шапиро-Уилктын макулдук критерийлери жана регрессиялык моделдин шайкештиги эксперименталдык маалыматтарды аппроксимациялоонун орточо болжолдуу катасы менен текшерилет. Топуракты кесүүгө каршылык көрсөтүү күчүнө таасир этүүчү факторлордун: топурактын тыгыздыгы, ири таштын өлчөмү жана кесүү туурасынын таасир этүү даражалары аныкталды.

Негизги сөздөр: кесуучу аспап, дисперстик топурак, эксперименттин планы, дескриптивдик статистика, Колмогоров-Смирнов критерийи, Шапиро-Уилк критерийи, корреляциялык талдоо, регрессиялык талдоо, дисперстик талдоо, аппроксимация катасы.

Рассматривается подсистема: резание узким режущим инструментом землеройной машины дисперсного грунта, содержащего крупное каменное включение. Структура грунта моделируется на основе Пуассоновского распределения минеральных частиц грунта. Составлен план эксперимента по резанию грунта с каменным включением с учетом требований симметричности, нормированности, ортогональности и ротатабельности. Выбраны влияющие факторы и их диапазоны варьирования, аппроксимирующая нелинейная экспоненциальная регрессионная модель. Проведен статистический анализ эмпирической совокупности, сформированной в результате реализации плана эксперимента на основе дескриптивной статистики, корреляционного, регрессионного и дисперсного анализов. Нормальность распределения эмпирических данных проверена с помощью критериев согласия Колмогорова-Смирнова, Шапиро-Уилка, а адекватность регрессионной модели - с помощью средней ошибки аппроксимации опытных

данных. Определены степени влияния влияющих факторов: плотности грунта, размера крупного обломка и ширины резания на силу сопротивления грунта резанию.

Ключевые слова: режущий инструмент, дисперсный грунт, план эксперимента, дескриптивная статистика, критерий Колмогорова-Смирнова, критерий Шапиро-Уилка, корреляционный анализ, регрессионный анализ, дисперсный анализ, ошибка аппроксимации.

The subsystem is considered: cutting with a narrow cutting tool of an earthmoving machine of dispersed soil containing a large rocky inclusion. The soil structure is modeled based on the Poisson distribution of mineral soil particles. An experiment plan for cutting soil with a rocky inclusion has been drawn up, taking into account the requirements of symmetry, normality, orthogonality and rotatability. The influencing factors and their ranges of variation, approximating nonlinear exponential regression model are selected. A statistical analysis of the empirical population formed as a result of the implementation of the experimental plan on the basis of descriptive statistics, correlation, regression and dispersion analyses is carried out. The normality of the distribution of empirical data was verified using the Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk agreement criteria, and the adequacy of the regression model was verified using the average approximation error of experimental data. The degrees of influence of the influencing factors: the density of the soil, the size of a large fragment and the cutting width on the strength of the resistance of the soil to cutting are determined.

Key words: cutting tool, dispersed soil, experimental plan, descriptive statistics, Kolmogorov-Smirnov criterion, Shapiro-Wilk criterion, correlation analysis, regression analysis, dispersion analysis, approximation error.

Моделирование структуры грунта по теоретическому закону распределения, варьирования природной влажностью и размером, формой каменного включения позволяют проводить опытные работы по резанию грунта различных видов [1].

Для повышения эффективности опытных работ составляются планы эксперимента, к которым предъявляются требования симметричности относительно центра плана, нормированности, ортогональности и ротатабельности [2],[3]. Планы эксперимента также должны обладать свойствами оптимальности, удовлетворяющие критериям оптимальности D – критерию, согласно которому обобщенная дисперсия оце-

нок коэффициентов регрессионной модели должна быть минимальной. Такими свойствами обладают полно факторные планы [2].

На процесс разрушения грунта рабочим органом землеройной машины влияют физико-механические характеристики грунта, геометрические формы, размеры и глубина залегания каменистого включения, а также параметры резания грунта. Из априорной информации [4],[5] известно, что оптимальными углом резания и глубиной резания грунта являются: $\alpha = 30^{\circ}$, $h = 0,15 \dots 0,2$ м.

Независимыми управляемыми переменными величинами (факторами), влияющими на процесс резания принимаются: плотность грунта – x_1 (интегральная характеристика физического состояния грунта), средние размеры полуоси эллипсоидного каменистого включения - x_2 , ширина резания – x_3 . В процессе экспериментальных исследований каждый вид грунта содержит эллипсоидное, эллипсоидное сжатое и шаровидное каменистое включение [6]. Для экспериментальных исследований по резанию грунта постоянно влияющими факторами устанавливаются: $\alpha = 30^{\circ}$, $h = 0,15$ м.

Факторы в процессе экспериментальных исследований принимают минимальные и максимальные значения (уровни), образующие область определения факторов. Варьирование факторов эксперимента от нижнего уровня до верхнего образует диапазон варьирования, в пределах которого факторы: управляемы, т.е. задается нужное значение; независимы, т.е. значе-

ния факторов задаются не зависимо друг от друга, они не коррелированы между собой; однозначны, т.е. факторы измеряются с необходимой точностью; совместимы, т.е. комбинации факторов, согласно плану эксперимента, реализуемы и безопасны.

Для аппроксимации эмпирической совокупности принимается нелинейная экспоненциальная регрессионная модель по оцениваемым параметрам [2]:

$$y = a_0 + e^{b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3} \quad (1)$$

где a_0 – свободный параметр регрессионной модели, b_0, b_1, b_2, b_3 – параметры регрессионной модели.

Параметры нелинейной регрессионной модели оцениваются нелинейно, в форме итерации метода наименьших квадратов. Расхождение между эмпирическими данными – y_i и аппроксимированными данными – \hat{y}_x определяется посредством средней ошибки аппроксимации [7], [8], %:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{|y_i - \hat{y}_x|}{y_i} \cdot 100 \quad (2)$$

где n – количество опытов.

Выбор экспоненциальной модели обусловлен тем, что рост силы сопротивления резанию интенсивнее в интервале резания грунта с крупными каменистыми включениями, чем, когда грунт содержит более мелкие каменистые включения. Параметры нелинейной регрессионной модели оцениваются на основе полного факторного плана с участием трех влияющих факторов (табл. 1).

Таблица 1

Полный факторный план для трех влияющих факторов.

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_2 x_3$	$x_1 x_3$	Отклики
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	y_1
2	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y_2
3	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	y_3
4	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	y_4
5	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	y_5
6	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y_6
7	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	y_7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_8

Примечание: Кодированные значения факторов принимают значения -1 и +1 соответственно.

Плотность грунта (x_1) изменяется в диапазоне $2,06 \dots 2,09$ т/м³, большая полуось эллипсоидного каменистого включения (x_2) – $0,03 \dots 0,1$ м, а ширина резания (x_3) – $0,08 \dots 0,2$ м.

Результаты экспериментальных исследований образуют эмпирическую статистическую совокупность силы сопротивления грунта резанию, которая должна проверяться на нормальное или близко нормальное распределение, т.к. основная часть параметрических статистических критериев получены на основе нормального закона распределения.

В программном комплексе «Statistica» [9],[10] нормальное распределение экспериментальных данных тестируется посредством *KS*-теста (тест Колмогорова-Смирнова) и с помощью теста Шапиро-Уилка. Выдвигается нулевая гипотеза (H_0) о нормальном распределении и альтернативная гипотеза (H_a) о не нормальном распределении эмпирической совокупности. Критическое значение теста *KS* определяется по формуле:

$$D_{крит} = \begin{cases} \frac{1,36}{\sqrt{N}}, & \alpha_c = 0,05, \\ \frac{1,63}{\sqrt{N}}, & \alpha_c = 0,01. \end{cases} \quad (3)$$

В случае $D < D_{крит}$ принимается нулевая гипотеза на выбранном уровне значимости, в противном случае – альтернативная гипотеза. Граничным значением принятия нулевой гипотезы является: для KS -теста $p > 0,2$, а для теста Шапиро-Уилка $p > 0,05$ [10].

Вычисляется описательная статистика для анализируемого параметра: среднее значение, медиана, асимметрия, стандартная ошибка асимметрии, эксцесс и стандартная ошибка эксцесса (рис. 1а), значения критерия KS и теста Шапиро-Уилка (рис. 1б). Реализовано тестирование о нормальности эмпирических данных с помощью частотной диаграммы (рис. 1в), нормально-вероятностного графика (рис. 1г).

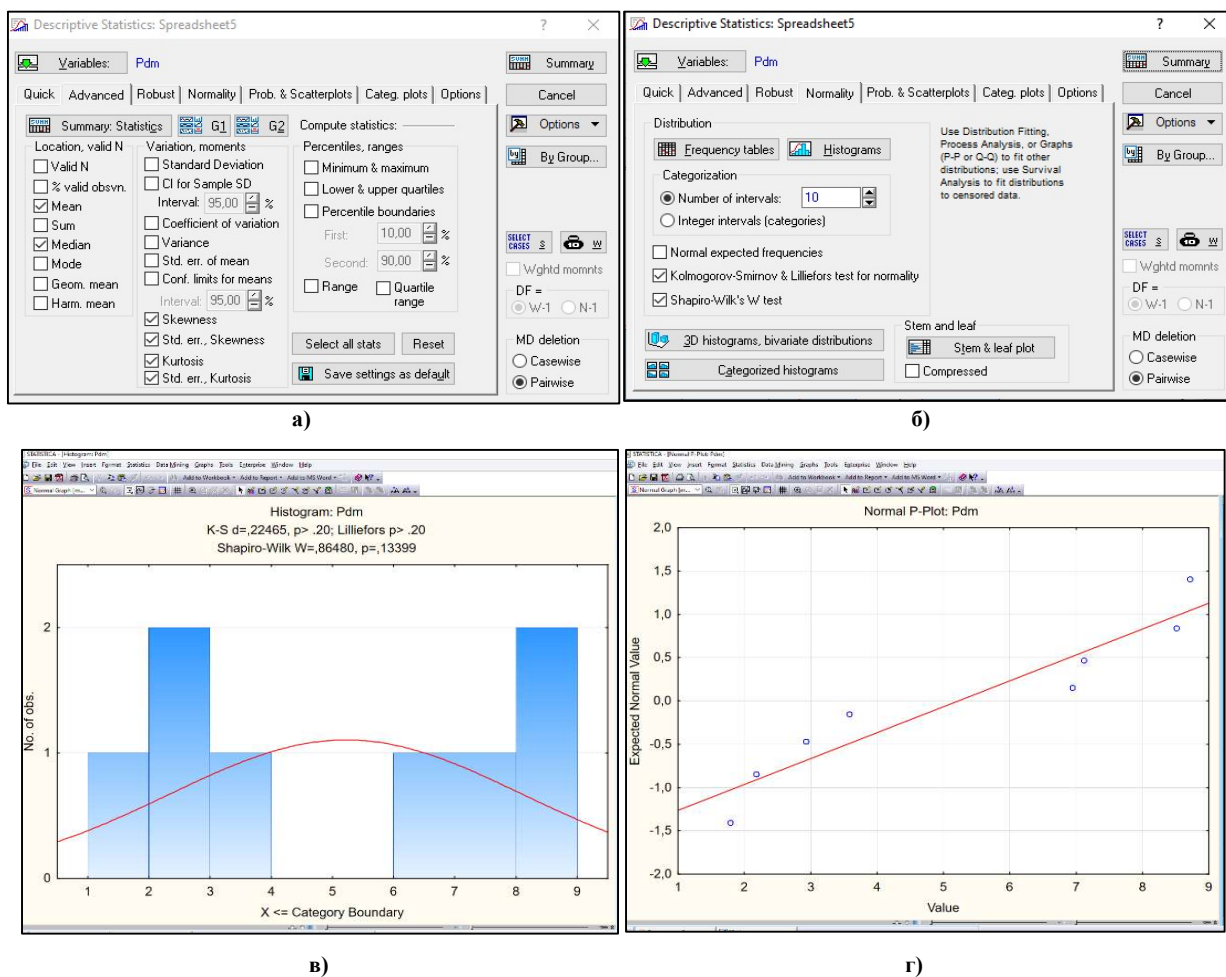


Рис. 1. Статистический анализ силы сопротивления грунта резанию:
 а) описательная статистика; б) статистика Колмогорова-Смирнова и Уилка-Шапиро;
 в) частотная гистограмма; г) нормально-вероятностный график.

Анализ частотной гистограммы показывает, что в середине гистограммы имеется провал значений, но несмотря на это по KS -тесту и тесту Уилкса-Шапиро нулевая гипотеза – гипотеза о нормальном распределении силы сопротивления грунта резанию принимается, данные на нормально-вероятностном графике расположены вдоль теоретической кривой без систематических отклонений, подтверждающие также о нормальном распределении тестируемого параметра. На основе проведенного анализа делается вывод, что распределение силы сопротивления грунта, содержащего крупное каменистое включение, подчиняется нормальному закону.

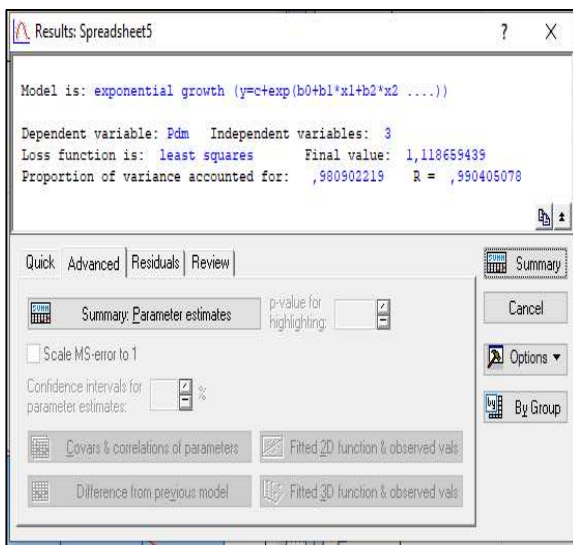
Однородность дисперсий параллельных опытов проверяется критерием Кохрена, для принятия гипотезы об однородности строчных дисперсий эксперимента, расчетное значение критерия Кохрена не должно превышать его табличного значения [2]:

$$G_p \leq G_{табл} \quad (4)$$

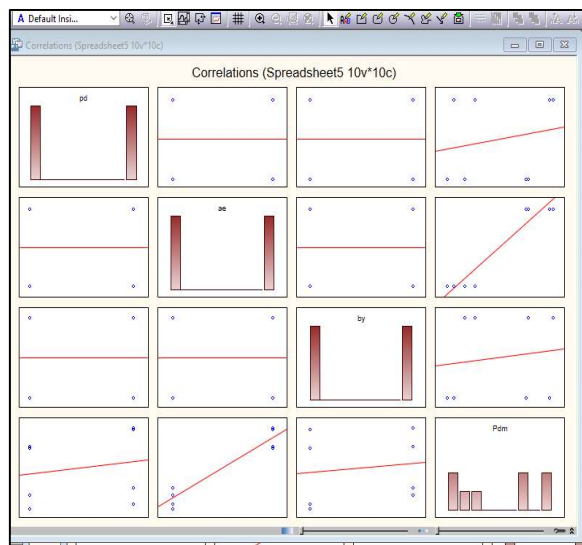
Результаты статистического анализа силы сопротивления резанию дисперсного грунта с крупнообломочным включением приведены на рисунке 2.

Data: коэф рм					
Model is: exponential growth (y=c+exp(b0+b1*x1+b2*x2)) (Spreadsheet5)					
Dependent variable: Pdm Loss: Least squares					
Final loss: 1,118659439 R= ,99041 Variance explained: 98,090%					
N=8	Const.C	Const.B0	pd	ae	by
Estimate	-11,8272	-4,25427	3,252537	4,393443	0,308915

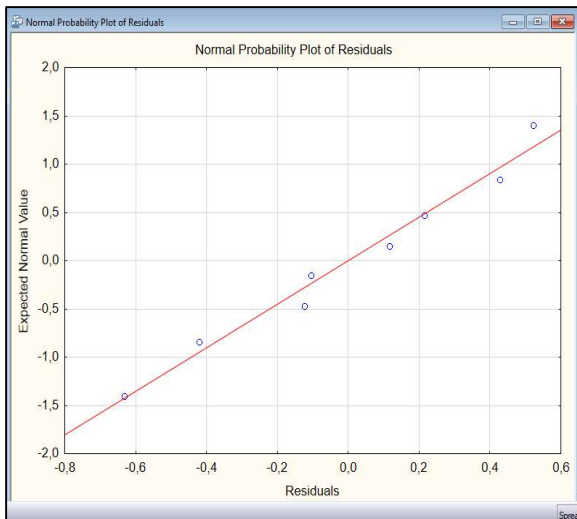
а)



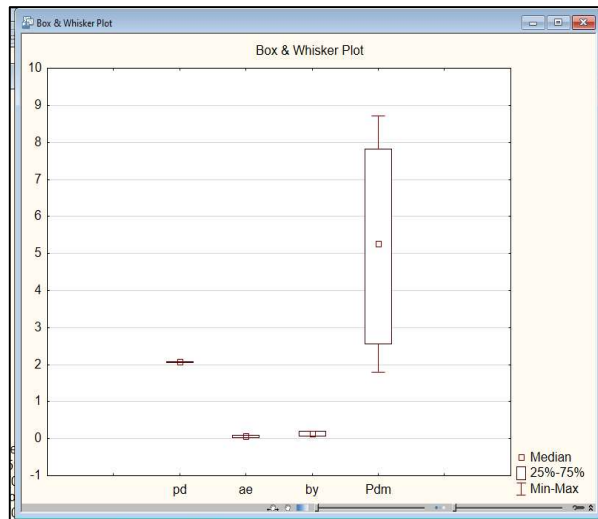
б)



в)



г)



д)

Рис. 2. Результаты корреляционного, регрессионного и дисперсного анализа эмпирической совокупности: а) параметры нелинейной регрессии; б) доля учтенных факторов в регрессионной модели; в) степень влияния факторов на результирующий признак; г) расположение остатков на нормально-вероятностном графике; д) диаграмма размаха.

Интерпретация результатов. В результате оценивания параметров регрессионной модели методом итерации наименьших квадратов получены параметры нелинейного экспоненциального регрессионного уравнения (рис. 2а). По результатам аппроксимации теснота взаимосвязи между факторами и результативным признаком оценивается коэффициентом (индексом) множественной регрессии - $R = 0,99041$, свидетельствующий о высокой статистической взаимосвязи. Доля дисперсий учтенных факторов в регрессионной модели равна 0,9809, свидетельствующая о высокой степени влияния плотности грунта, геометрического размера крупного каменистого включения и ширины резания на силу сопротивления грунта резанию (рис. 2б). Ошибка аппроксимации составляет 9...11%. Анализ рисунка 2в наглядно показывает, что наибольшее влияние на силу сопротивления оказывает размер крупного обломка, далее – плотность грунта и наименьшее - ширина резания грунта. Остатки между эмпирическими и регрессионными данными расположены вдоль теоретической кривой без систематических отклонений, подтверждающий о нормальном распределении остатков (рис. 2г). Рисунок 2д показывает, (боксплот) распределение одномерной вероятности: медиана и квартили распределены равномерно, значение межквартильного размаха (разность между 3 и 1 квартилем) относительно высокое, указывающее на высокую вариативность силы сопротивления резанию, отсутствуют выбросы.

Выводы. Таким образом на основе полно факторного плана эксперимента, тестирования на нормальность опытных данных и корреляционного, ре-

грессионного, дисперсного анализом можно установить нелинейную экспоненциальную регрессионную модель для прогнозирования силы сопротивления дисперсного грунта разрушению при резании его узким режущим инструментом землеройной машины.

Литература:

1. Моделирование структуры дисперсного грунта с крупнообломочными включениями. [Текст] // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана, - Бишкек, 2023. - №4.
2. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента. - М., «Мир», 1981. - 520 с.
3. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей. - М.: Финансы и статистика, 1985.
4. Домбровский Н.Г. Панкратов С.А. Землеройные машины. - М., Гостехиздат, 1961.
5. Домбровский Н. Г. Экскаваторы. - М.: «Машиностроение», 1969.
6. Тургумбаев Ж.Ж. Модель прогнозирования силу сопротивления резанию грунта, содержащего различные каменистые включения [Текст] / Ж.Ж. Тургумбаев, М.С. Тургумбаев // Высокие технологии в строительном комплексе. / Научно-технический журнал. - Воронеж., 2021. - №2. - С. 130-138. www.ttmko.ru ISSN 2618-9054
7. Левенберг К. Метод решения некоторых задач методом наименьших квадратов. Приложение. Математика. - 1944. - Т.2. - С. 164-168.
8. Марквардт Д. Алгоритм оценки нелинейных параметров методом наименьших квадратов. СИАМ Дж. Приложение. Математика. - 1963. - Т. 11. - С. 431-441.
9. Боровиков В.П. Популярное введение в систему STATISTICA. - М., 1998. - 266 с.
10. Программный комплекс Staistica. StatSoft@ Inc. USA. Версия 10.