

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ КОРНЕКЛУБНЕПЛОДОВ

THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THE ROOT CROP CHOPPER

С.Н. ШУХАНОВ, д.т.н.
А.С. ДОРЖИЕВ
А.В. КОСАРЕВА, к.т.н.

Иркутский государственный аграрный университет,
Иркутск, Россия, Shuhanov56@mail.ru

S.N. SHUKHANOV, DSc in Engineering

A.S. DORZHIEV

A.V. KOSAREVA, PhD in Engineering

Irkutsk State Agrarian University, Irkutsk, Russia,
Shuhanov56@mail.ru

Для создания машины с целью измельчения корнеклубнеплодов с заданными размерами изготовлена экспериментальная установка. Объектом исследования является функционирование измельчителя корнеклубнеплодов. Эксперименты и анализ полученных данных проводились с использованием теории планирования экспериментов. При проведении статистического анализа сравнения двух групп по количественным шкалам проводились на основе непараметрического критерия Манна – Уитни. Для описания количественных показателей использовались среднее значение и стандартное отклонение в формате «M±S». Чтобы использовать возможность прогнозирования некоторой целевой количественной переменной на базе нескольких независимых переменных (факторов), применялся метод множественного регрессивного анализа. Величина статической значимости была зафиксирована на уровне вероятности ошибки 0,05. Статистическая обработка данных выполнена с использованием пакетов прикладных программ Statistica 10 и SAS JMP 11.

Одним из основных показателей качества работы машины является ее энергоёмкость. В результате обработки экспериментов получены регрессионные зависимости и поверхности отклика, отражающие описывающие происходящие процессы. По результатам регрессионного моделирования отклика «Энергоёмкость процесса Э, Вт» можно заключить, что наиболее важным сочетанием факторов является набор: «Диаметр корнеклубнеплода», «X4-x5» и «X4-x4». Модель имеет высокий уровень качества прогноза ($R^2 = 98\%$).

Ключевые слова: экспериментальная установка, измельчитель корнеклубнеплодов, статистический анализ, энергоёмкость процесса.

An experimental setup was made to create a machine for the purpose of grinding root crops with specified dimensions. The object of study is the functioning of the root crop chopper. Experiments and analysis of the data obtained were carried out using the theory of experimental design. When conducting a statistical analysis, comparisons of the two groups on quantitative scales were based on the non-parametric Mann-Whitney test. To describe the quantitative indicators, the mean value and standard deviation in the format «M±S» were used. To use the ability to predict some target quantitative variable based on several independent variables (factors), the multiple regression analysis method was used. The value of static significance was fixed at a probability level of error of 0,05. Statistical data processing was performed using the Statistica 10 and SAS JMP 11 application software packages. One of the main indicators of the quality of a machine is its energy intensity. As a result of processing the experiments, regression dependences and response surfaces were obtained, which reflect describing the processes that take place. According to the results of the regression modeling of the response «Energy intensity of the process E, W», it can be concluded that the most important combination of factors is the set: «Root and tubers diameter», «X4-x5» and «X4-x4». The model has a high level of forecast quality ($R^2 = 98\%$).

Keywords: experimental installation, root crop chopper, statistical analysis, process energy intensity.

Введение

Создание технических средств и технологий механизации сельскохозяйственного производства является ключевой задачей научно-технического обеспечения агропромышленного комплекса. В этом ряду проблем особое место занимает разработка машин для животноводства, в том числе обеспечивающие подготовку кормов к поеданию сельскохозяйственными животными [1, 2]. Известно, что измельчение корнеклубнеплодов существенно повышает их поедаемость и усваиваемость. При этом важное значение имеет размер измельченных корнеклубнеплодов. С целью удовлетворения этому требованию изготовлена экспериментальная установка на основе нашего патента [3].

Цель исследований

Исследование факторов, влияющих на энергоемкость процесса резания измельчителя корнеклубнеплодов.

Материалы и методы

Объектом исследования является функционирование измельчителя корнеклубнеплодов. Эксперименты и анализ полученных данных проводились с использованием теории планирования экспериментов. При проведении статистического анализа сравнения двух групп по количественным шкалам проводились на основе непараметрического критерия Манна – Уитни. Для описания количественных показателей использовались среднее значение и стандартное отклонение в формате « $M \pm S$ ». Чтобы использовать возможность прогнозирования некоторой целевой количественной переменной на базе нескольких независимых переменных (факторов), применялся метод множественного регрессивного анализа. Величина статической значимости был зафиксирован на уровне вероятности ошибки 0,05. Статистическая обработка данных выполнена с использованием пакетов прикладных программ Statistica 10 и SAS JMP 11 [4–6].

Результаты обсуждения

Сущность устройства [3] заключается в следующем. Вертикальные ножи жестко и под углом 90 градусов установлены к горизонтальным ножам, причем с образованием вертикальных окон, сформированных сверху плоскостью горизонтального ножа, снизу – плоскостью диска, а слева и справа – плоско-

стями вертикальных ножей. Крайние вертикальные ножи пристыкованы своими боковыми плоскостями к торцевым поверхностям окна. Противорез имеет возможность работать с горизонтальными и вертикальными ножами. Расстояние между вертикальными ножами в перпендикулярном направлении к их боковым поверхностям находится в пределах от 15 до 50 мм. В совокупности это позволяет создать режущий аппарат измельчителя корнеплодов, обеспечивающий получение кусочков по форме параллелепипеда.

На рис. 1–4 показан режущий аппарат измельчителя корнеплодов. В частности на рис. 1 показан разрез А–А, на рис. 2 – разрез Б–Б, на рис. 3 – разрез В–В (увеличенно), на рис. 4 – вид Г (увеличенно). Режущий аппарат состоит: из цилиндрического корпуса 4, который одновременно является приемным бункером; диска 6 с вертикальными 2 и горизонтальными 3 ножами, который жестко соединен с валом 1 электродвигателя (не показан); противорезов 5, жестко соединенных с корпусом 4. Кроме того, к диску 6 со стороны, противоположной стороне, на которой размещены ножи 2 и 3, жестко присоединены швырялки 8, а к корпусу 4, напротив швырялок 8, – выгрузной бункер 7. В диске 6 под горизонтальными 3 ножами выполнены окна по форме прямоугольника. Вертикальные 2 ножи жестко и под углом 90 градусов установлены к горизонтальным 3 ножам, причем с образованием вертикальных окон, сформированных сверху плоскостью горизонтального 3 ножа, снизу – плоскостью диска 6, а слева и справа – плоскостями вертикальных 2 ножей. Крайние вертикальные 2 ножи пристыкованы своими боковыми плоскостями к торцевым поверхностям окна, противорезы 5 взаимодействуют с горизонтальными 3 и вертикальными 2 ножами. Расстояние между вертикальными 2 ножами в перпендикулярном направлении к их боковым поверхностям находится в пределах от 15 до 50 мм.

Режущий аппарат работает следующим образом. При включении измельчителя (электродвигателя) диск 6 с ножами 2 и 3, а также со швырялками 8 приводится во вращение (против часовой стрелки) от электродвигателя (не показан) посредством вала 1. Загружают продукт в корпус 4 через его верхний срез, который поступает на диск 6 и при взаимодействии с противорезами 5 равномерно распределяется на его торцевой поверхности

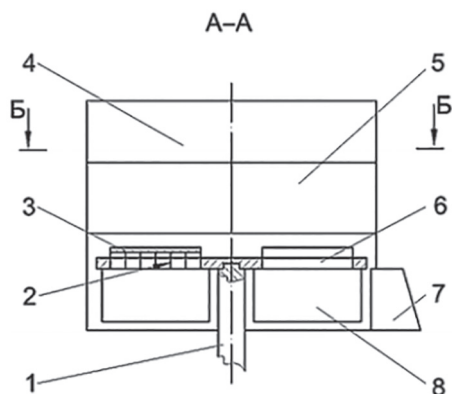


Рис. 1. Режущий аппарат измельчителя корнеплодов.
Разрез А-А

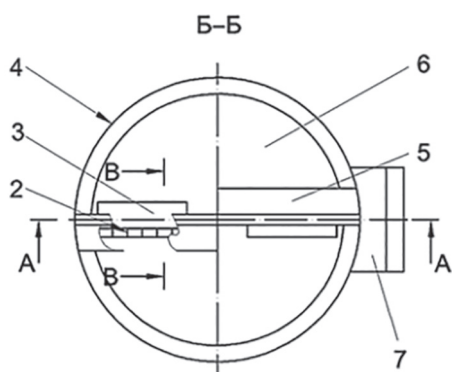


Рис. 2. Режущий аппарат измельчителя корнеплодов.
Разрез Б-Б

и подвергается обработке. Горизонтальные и вертикальные ножи оказывают силовое воздействие на продукт, в результате он продукт разделяется на кусочки по форме параллелепипеда, одна из граней которого соответствует профилю окон, образованных поверхностями деталей режущего аппарата. Длина полученных кусочков равна расстоянию между вертикальными 2 ножами в перпендикулярном направлении к их боковым поверхностям. Измельченный продукт под воздействием на него ножей 2 и 3 поступает в полость швырялки 8 через окна, выполненные в диске 6 под ножами 3, и далее под воздействием швырялки 8 – в выгрузной бункер 7.

Одним из основных качественных показателей работы измельчителя корнеклубнеплодов является энергоёмкость процесса измельчения.

1. Регрессионное моделирование целевого показателя «Энергоёмкость процесса Э, Вт» для одного горизонтального ножа

Ниже представлены результаты регрессионного моделирования целевого показателя

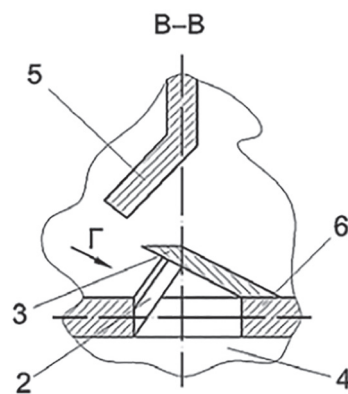


Рис. 3. Режущий аппарат измельчителя корнеплодов.
Разрез Б-Б

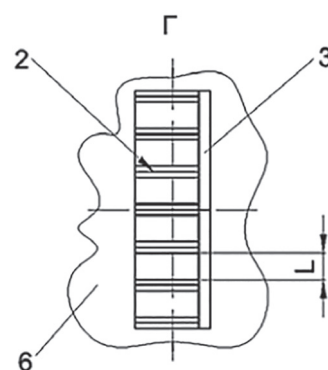


Рис. 4. Режущий аппарат измельчителя корнеплодов.
Вид Г

«Энергоёмкость процесса Э, Вт» для одного горизонтального ножа. Для построения итоговой модели этого показателя для одного горизонтального ножа использовался метод шагового регрессионного анализа, алгоритм включения. Входными факторами являлись «Диаметр корнеклубнеплода» (X4), «Угол наклона противореза» (X5).

В результате анализа были получены следующие результаты.

В табл. 1 представлены коэффициенты и бета-коэффициенты регрессионной модели для целевого показателя «Энергоёмкость процесса Э, Вт» для следующих факторов: «Диаметр корнеклубнеплода», «X4-x5» и «X4-x4».

Факторы «Диаметр корнеклубнеплода» и «X4-x5» имеют положительное влияние на целевой показатель «Энергоёмкость процесса Э, Вт», а фактор «X4-x4» оказывает отрицательный вклад. Следует отметить, что все факторы являются статистически значимыми, что говорит о тесной интеграции их в единую регрессионную модель.

В табл. 2 представлены показатели качества и формула регрессионной модели для воз-

Таблица 1

Структура регрессионной модели для целевого показателя «Энергоемкость процесса Э, Вт»

Фактор	Бета-коэффициент	Коэффициент регрессии	Уровень P
Константа		18,333	0,3766
Диаметр корнеклубнеплода	9,671	9,671	<0,0001
X4·x5	0,016	0,016	<0,0001
X4·x4	-0,062	-0,062	<0,0001

Таблица 2

Показатели качества и формула регрессионной модели показателя «Энергоемкость процесса Э, Вт»

Значимость регрессии	$R^2 = 97,1 \%$; уровень $P < 0,0001$
Формула регрессии	Энергоемкость процесса Э, Вт = $18,33 + 9,67 \cdot \text{Диаметр корнеклубнеплода} + 0,02 \cdot X4 \cdot x5 - 0,06 \cdot X4 \cdot x4$

возможности подставлять текущие значения факторов и строить прогноз. Коэффициент детерминации со значением 97 % говорит о высоком прогножном качестве модели (уровень $P < 0,0001$).

Рис. 5 наглядно демонстрирует возможности построенной модели делать прогнозы, а также насколько эти прогнозы соответствуют наблюдаемым значениям отклика. Облако точек хорошо выстраивается вдоль линии регрессии, что говорит о тесной связи между прогнозными и реальными значениями отклика.

Форма поверхности полученной модели представлена на рис. 6.

По результатам регрессионного моделирования отклика «Энергоемкость процесса Э, Вт» можно заключить, что наиболее важным сочетанием факторов является набор: «Диаметр корнеклубнеплода», «X4·x5»

и «X4·x4». Модель имеет высокий уровень качества прогноза ($R^2 = 97 \%$).

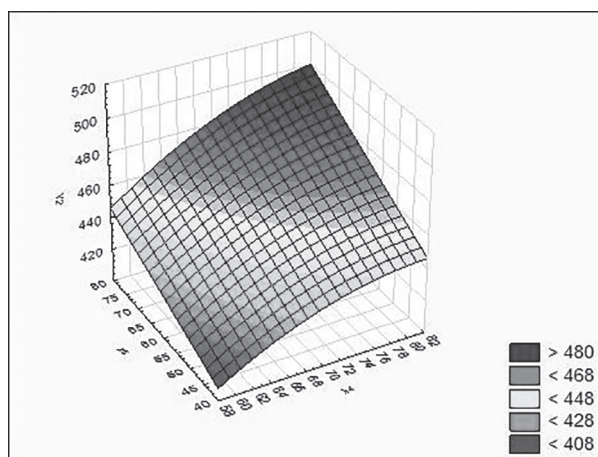


Рис. 6. График прогнозных значений показателя «Энергоемкость процесса Э, Вт» для одного горизонтального ножа в зависимости от X4, X5

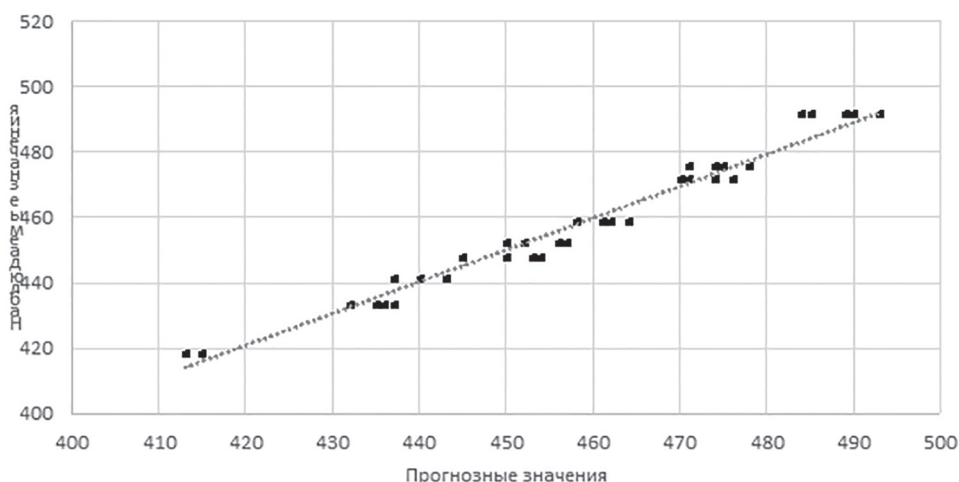


Рис. 5. Графики зависимости наблюдаемых значений от прогнозных (модельных)

2. Регрессионное моделирование целевого показателя «Энергоемкость процесса Э, Вт» двух горизонтальных ножей

В данном разделе представлены результаты регрессионного моделирования целевого показателя «Энергоемкость процесса Э, Вт» двух горизонтальных ножей.

Для построения итоговой модели данного показателя использовался метод шагового регрессионного анализа, алгоритм включения. Входными факторами являлись «Диаметр корнеклубнеплода» (X4), «Угол наклона противореза» (X5).

В результате анализа были получены следующие результаты.

В табл. 3 представлены коэффициенты и бета-коэффициенты регрессионной модели для целевого показателя «Энергоемкость процесса Э, Вт» для следующих факторов: «Диаметр корнеклубнеплода», «X4·x5» и «X4·x4».

Факторы «Диаметр корнеклубнеплода» и «X4·x5» имеют положительное влияние

на целевой показатель «Энергоемкость процесса Э, Вт», а фактор «X4·x4» оказывает отрицательный вклад. Следует отметить, что все факторы являются статистически значимыми, что говорит о тесной интеграции их в единую регрессионную модель.

В табл. 4 представлены показатели качества и формула регрессионной модели для возможности подставлять текущие значения факторов и строить прогноз. Коэффициент детерминации со значением 98 % говорит о высоком прогнозном качестве модели (уровень $P < 0,0001$).

Рис. 7 наглядно демонстрирует возможности построенной модели делать прогнозы, а также насколько эти прогнозы соответствуют наблюдаемым значениям отклика. Облако точек хорошо выстраивается вдоль линии регрессии, что говорит о тесной связи между прогнозными и реальными значениями отклика.

Форма поверхности полученной модели представлена на рис. 8.

Таблица 3

Структура регрессионной модели для целевого показателя «Энергоемкость процесса Э, Вт»

Фактор	Бета-коэффициент	Коэффициент регрессии	Уровень P
Константа		-42,200	0,2592
Диаметр корнеклубнеплода	7,678	7,678	<0,0001
X4·x5	0,017	0,017	<0,0001
X4·x4	-0,043	-0,047	<0,0001

Таблица 4

Показатели качества и формула регрессионной модели показателя «Энергоемкость процесса Э, Вт»

Значимость регрессии	$R^2 = 98,3 \%$, уровень $P < 0,0001$
Формула регрессии	Энергоемкость процесса Э, Вт = $-42,2 + 7,68 \cdot \text{Диаметр корнеклубнеплода} + 0,02 \cdot X4 \cdot x5 - 0,05 \cdot X4 \cdot x4$

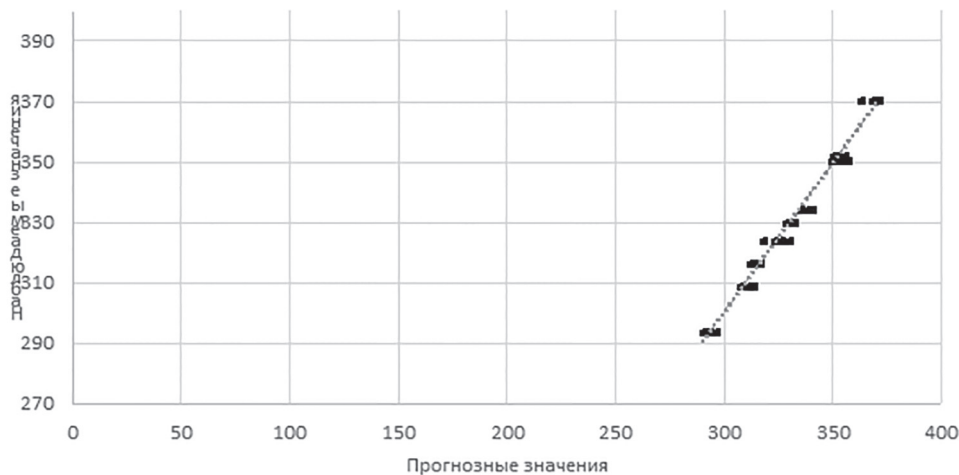


Рис. 7. Графики зависимости наблюдаемых значений от прогнозных (модельных)

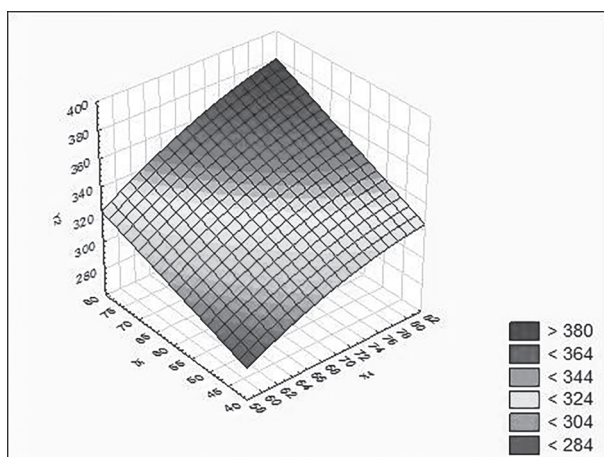


Рис. 8. График прогнозных значений показателя «Энергоемкость процесса Э, Вт» для двух горизонтальных ножей в зависимости от X4, X5

Вывод

По результатам регрессионного моделирования отклика «Энергоемкость процесса Э, Вт» можно заключить, что наиболее важным сочетанием факторов является набор: «Диаметр корнеклубнеплода», «X4:x5» и «X4:x4». Модель имеет высокий уровень качества прогноза ($R^2 = 98\%$).

Литература

1. Карпов В.В., Гулевский В.А. Анализ взаимодействия рабочих органов гофрощеточных барабанов очистителя кормовых корнеплодов с объектами очистки // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2017. № 2. С. 121–128.
2. Карпов В.В., Гулевский В.А. Влияние загрязненности и влажности почвенных примесей на эффективность очистки кормовых корнеплодов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2017. № 3. С. 87–92.
3. Шуханов С.Н., Доржиев А.С. Режущий аппарат измельчителя корнеклубнеплодов: патент на полезную модель № 186473 Российская Федерация; опубл. 22.01.2019, Бюл. № 3.

4. Боровиков В. STATISTICA: Искусство анализа данных на компьютере (с CD-ROM). 2 изд. СПб.: Питер. 2003.
5. Вуколов Э.А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов «Statistica» и «Excel». М.: Форум, 2004. 464 с.
6. Халафян А.А. STATISTICA 6. Статический анализ данных. 3-е изд. М.: ООО «Бином-Пресс». 2007. 512 с.

Reference

1. Karpov V.V. Gulevsky V.A. The analysis of interaction of working bodies of the corrugated brush drums of the feed root crop cleaner with cleaning objects. The Messenger of Voronezh State Agricultural University. 2017. No. 2, pp. 121–128 (in Russ.).
2. Karpov V.V. Gulevsky V.A. The effect of soil contamination and moisture on the efficiency of cleaning of fodder root crops. Messenger of Voronezh State Agricultural University. 2017. No. 3, pp. 87–92 (in Russ.).
3. Shukhanov S.N., Dorzhiev A.S. Rezhushchij apparat izmel'chitelya korneklubneplodov [Root crop chopper cutting apparatus]: utility model patent No. 186473 Russian Federation; publ. 01/22/2019, Bull. Number 3.
4. Boletuses V. STATISTICA: Iskusstvo analiza dannyh na komp'yutere (s CD-ROM) [STATISTICA: Art of the analysis of data on the computer (with CD-ROM)]. The 2nd edition. St. Petersburg. 2003.
5. Vukolov E.A. Osnovy statisticheskogo analiza. Praktikum po statisticheskim metodam i issledovaniyu operacij s ispol'zovaniem paketov «Statistica» i «Excel» [Principles of the statistical analysis. Workshop on statistical methods and research of operations using Statistica and Excel packages]. Moscow: Forum Publ., 2004. 464 p.
6. Halafyan A.A. STATISTICA 6. Statcheskij analiz dannyh [STATISTICA 6. Static analysis of data]. the 3rd prod. Moscow: LLC Binom-Press Publ. 2007. 512 p.