

А. Н. Юрин

*РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: anton-jurin@rambler.ru*

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЕЛИТЕЛЯ ПОТОКА ПЛОДОВ ПРИ СОРТИРОВКЕ

Аннотация. В данной работе проведено экспериментальное обоснование основных параметров работы устройства для механического разделения потока плодов при их оптической сортировке системой технического зрения. Для проведения экспериментальных исследований создана лабораторная установка системы технического зрения, состоящая из фотомодуля с видеокамерой с объективом и структурной подсветкой, а также электронного блока управления с промышленным компьютером. Для получения уравнения регрессии выбран симметричный некомпозиционный план Бокса – Бенкена. Основной задачей эксперимента является получение уравнения регрессии, которое позволит оценить влияние воздействующих факторов на точность отделения отсортированных яблок. В качестве факторов оптимизации выбраны скорость главного конвейера, угол наклона тарелки каретки и число шагов удерживания клапана соленоида.

В результате экспериментальных исследований получено уравнение регрессии зависимости для определения точности отделения отсортированных плодов. Анализ поверхностей отклика позволил установить оптимальные значения скорости главного конвейера $v = 0,41$ м/с, угла наклона тарелки каретки $\eta = 27$ град. и числа шагов удержания клапана соленоидом $\tau = 93$ шага, при которых точность сортирования составляет более 95 %.

Результаты экспериментальных исследований реализованы в технологической линии сортировки и фасовки яблок ЛСП-4, приемочные испытания которой показали правильность обоснованных параметров.

Ключевые слова: уравнение регрессии, скорость конвейера, угол наклона тарелки, соленоид, клапан, точность отделения.

Anton N. Yuryn

*RUE “SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization”
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: anton-jurin@rambler.ru*

JUSTIFICATION OF THE RATIONAL PARAMETERS OF THE FRUIT FLOW DIVIDER DURING SORTING

Abstract. In this work, an experimental substantiation of the main parameters of the device for mechanical separation of the flow of fruits during their optical sorting by a vision system was carried out. To conduct experimental studies, a laboratory installation of a technical vision system was created, consisting of a photomodule with a video camera with a lens and structural illumination, as well as an electronic control unit with an industrial computer. To obtain the regression equation, a symmetrical non-compositional Box-Behnken design was chosen. The main objective of the experiment is to obtain a regression equation that will allow us to evaluate the influence of influencing factors on the accuracy of separating sorted apples. As optimization factors, the speed of the main conveyor, the angle of inclination of the carriage plate and the number of steps of holding the solenoid valve were chosen. As a result of experimental studies, a regression equation of dependence was obtained to determine the accuracy of separating sorted fruits. The analysis of the response surfaces made it possible to establish the optimal values for the speed of the main conveyor = 0.41 m/s, the angle of inclination of the carriage plate = 27 degrees. and the number of steps of holding the valve by the solenoid = 93 steps., at which the sorting accuracy is more than 95 %. The results of experimental studies were implemented in the technological line for sorting and packing apples LSP-4 acceptance tests and which showed the correctness of the justified parameters. The work was carried out as part of task 5 “Develop and master the production of a technological line for sorting and packing apples” of

the subprogram “Belselkhozmeckhanizatsiya-2025” of the state scientific and technical program “Innovative agro-industrial and food technologies” 2021–2025.

Keywords: regression equation, conveyor speed, plate inclination angle, solenoid, valve, separation accuracy.

Введение

Обязательной операцией при товарной обработке плодов является сортирование, в процессе которого продукцию разделяют на сорта по качеству. Эта операция осуществляется, как правило, вручную при визуальном осмотре плодов рабочими, что требует большого количества ручного труда [1, 2, 3].

Использование автоматизированных сортировальных машин для оптической идентификации и разделения плодов на сорта позволяет значительно повысить качество сортирования и производительность [4–6].

Весь процесс оптической сортировки можно разделить на три основных этапа: подача плодов, состоящая из операций формирования потока и транспортирования, классификация (обнаружение признаков, распознавание структуры и принятие решений) и механическое разделение (взведение механизма, удар и движение объекта после разделения) [7–9] (рисунок 1).



Рисунок 1 – Функциональная схема системы сортировки плодов по качеству

При этом механическое разделение потока плодов является заключительной операцией, влияющей на качество выполнения всех процессов сортировки и определяющей эффективность сортировки в целом. В связи с чем определение оптимальных параметров и режимов работы устройства для разделения потока плодов, обеспечивающего качественное выполнение отделения отсортированных яблок, является важной задачей.

В то же время на процесс разделения потока оказывает влияние большое количество внешних факторов: скорость движения потока, время срабатывания механизма, размер и масса сортируемых плодов и др. В этой связи обоснование параметров и режимов работы механизма представляется возможным осуществить только экспериментальным способом.

Лабораторная установка системы технического зрения для сортировки плодов

Для проведения экспериментальных исследований создана лабораторная установка системы технического зрения, принципиальная схема которой представлена на рисунке 2, включающая в себя: фотомодуль, состоящий из механического защищенного корпуса 1 с видеокамерой 2 и структурированной подсветкой 3, защищенный электрический шкаф 4 с вычислительным модулем 5 и сенсорной панелью управления 6 [10].

Для получения изображения яблок в фотомодуле использована видеокамера VCXU-32C фирмы Baumer с оптическим сенсором Sony Pregius CMOS площадью ПЗС-матрицы в 1/1.8". Максимальное разрешение камеры составляет 2048x1536 пкс, скорость съемки до 55 кадров/с. Видеокамера 1 (рисунок 3, а) оснащена объективом 2 (AZURE-0818M3M) с фокусным расстоянием $f = 8$ мм и диафрагмой F1.8.

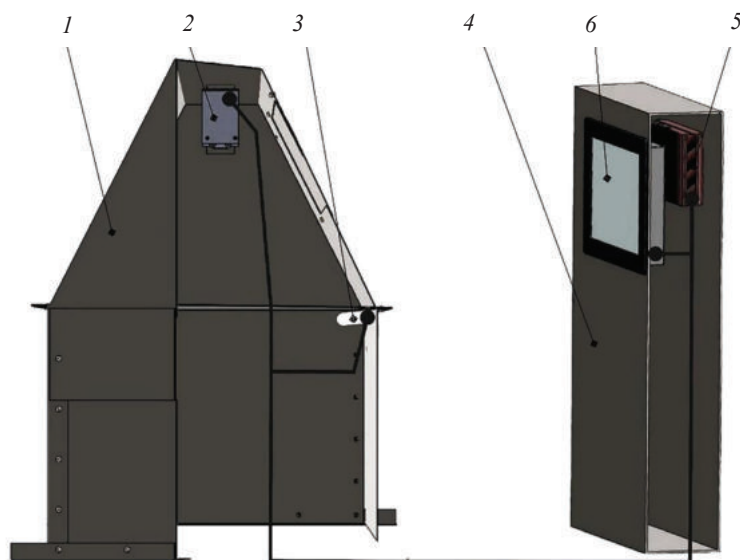


Рисунок 2 – Схема лабораторной установки системы технического зрения

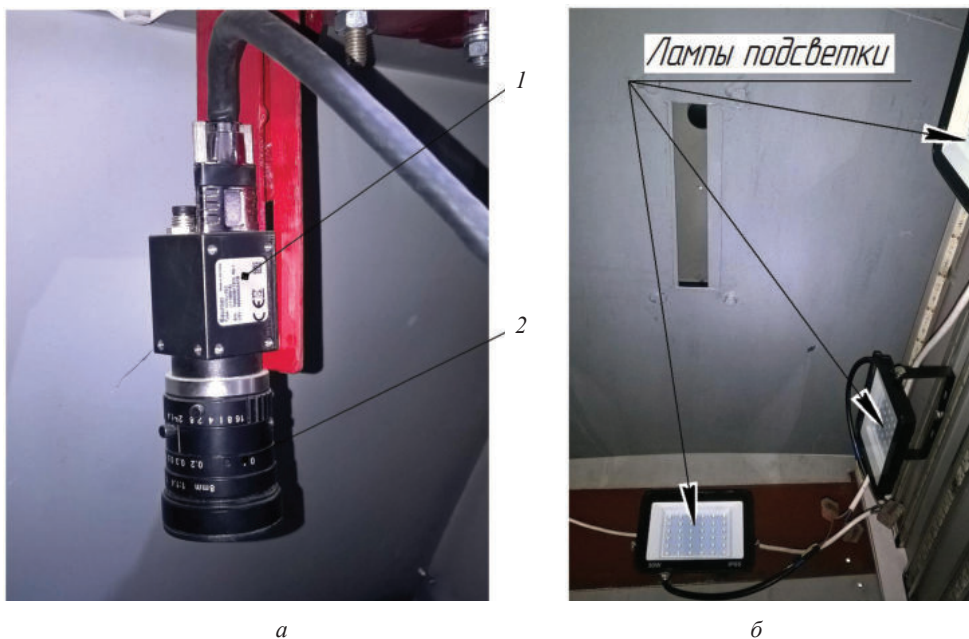


Рисунок 3 – Компоненты системы технического зрения сортировки яблок: а – видекамера VCXU-32C с объективом AZURE-0818M3M; б – лампы структурной подсветки, установленные в защищенном корпусе

В качестве вычислительного модуля использован промышленный компьютер фирмы CINCOSE серии DS-1200, оснащенный процессором Intel® Core™ i7-8700 Hexa-Core с тактовой частотой до 4 600 МГц, оперативной памятью DDR4 объемом 16 ГБ, жестким диском типа SSD объемом 256 ГБ под управлением операционной системы Ubuntu. Диалог с оператором осуществляется посредством сенсорного монитора CV-110H/M1001.

В качестве структурированной подсветки использованы светодиодные лампы с светодиодами типа Smd 5050 (тепло-белого свечения), суммарной мощностью 160 Вт (220 В) (рисунок 3, б). Для предотвращения мерцания подсветки блок питания электрических ламп дополнен диодным мостом с блоком конденсаторов емкостью 300 мкФ.

Фотомодуль лабораторной установки размещается на главном конвейере для транспортировки и вращения сортируемых яблок (рисунок 4).



Рисунок 4 – Фотомодуль системы технического зрения, установленный на главном конвейере:
1 – фотомодуль СТЗ; 2 – главный конвейер

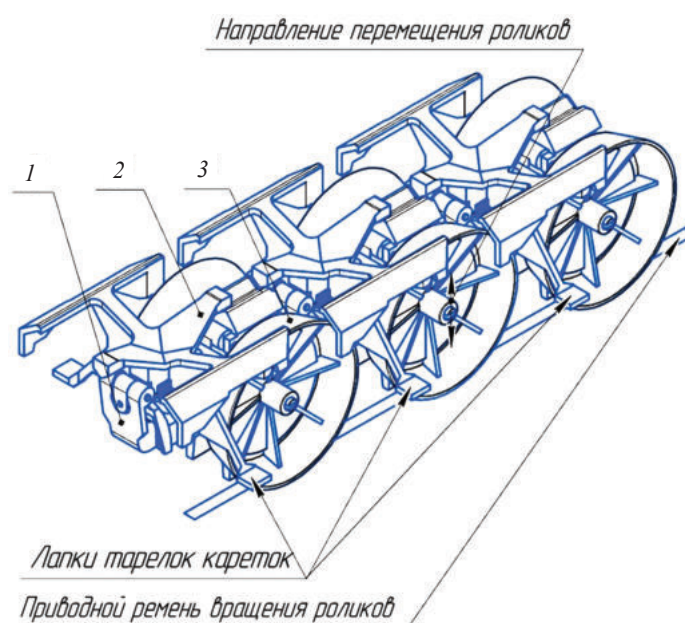


Рисунок 5 – Индивидуальные каретки для яблок главного конвейера:
1 – корпус; 2 – тарелка; 3 – ролик

Главный конвейер представляет собой транспортер, состоящий из приводной и ведомой звездочек и втулочно-роликовой цепи, на которой закреплены 250 индивидуальных кареток для яблок (рисунки 5, 6), установленных друг за другом с шагом 100 мм.

Для фотографирования яблок со всех сторон движущимся по главному конвейеру плодам придавалось вращение посредством парных роликов 3 индивидуальных кареток (рисунок 5), установленных на одной оси, которые при прохождении под фотомодулем набегают на приводной ремень, придающий им вращение в направлении противоположном движению конвейера. Ролики, перемещаясь по вертикали в пазах корпуса 1, поднимают яблоки с тарелок 2, заставляя их вращаться.

Отделение отсортированных яблок осуществляется посредством механизма разделения потока, состоящего из быстродействующего соленоида 1, клапана 2 и пирамиды 3 (рисунок 6).

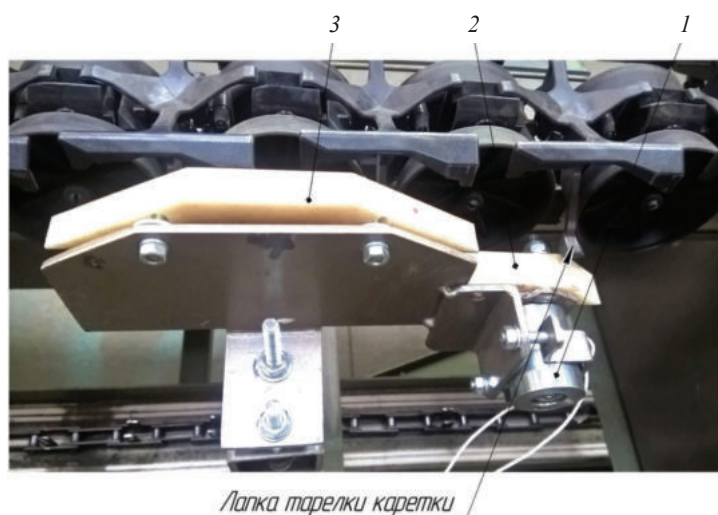


Рисунок 6 – Механизм разделения потока плодов: 1– соленоид делителя потока яблок; 2 – клапан; 3 – пирамида

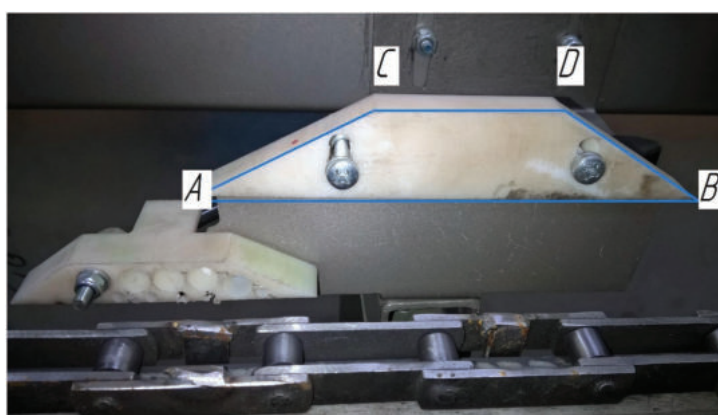


Рисунок 7 – Траектории движения лапки тарелки каретки СТЗ: *AB* – без опрокидывания тарелок и экстракции яблока; *ACDB* – с наклоном тарелки каретки и удалением яблока

Во время работы цепь главного конвейера с индивидуальными каретками перемещает яблоки под фотомодулем, где видеокамера фотографирует плоды и передает изображение в электронный блок управления, который определяет качество яблок и присваивает им соответствующий сорт. После прохождения фотомодуля электронный блок управления посредством энкодера начинает отсчет расстояния, пройденного каждой кареткой с яблоком.

Далее, если яблоку присвоен сорт, соответствующий запрограммированному, то при подходе каретки к механизму разделения потока блок управления подает напряжение на соленоид, который поворачивает клапан, заставляя лапки тарелки каретки двигаться по траектории *ACDB* между клапаном и нижней частью пирамиды (рисунки 6, 7).

При этом тарелки, закрепленные шарнирно, наклоняются, поворачиваясь на оси относительно корпуса каретки и направления движения цепи главного конвейера. В результате чего яблоко скатывается с конвейера. Угол наклона тарелки регулируется высотой установки пирамиды, перемещаемой в пазах крепежных винтов.

Если же яблоку присвоен сорт, не относящийся к выбранному сорту, то электронный блок управления не дает управляющего сигнала на соленоид, и лапка тарелки каретки движется по траектории *AB*, между клапаном и нижней частью пирамиды. В таком случае каретка с блоком следует далее по главному конвейеру.

Очевидно, что наибольшее влияние на работу данного механизма оказывают такие факторы как: скорость главного конвейера, угол наклона тарелки каретки при экстракции отсортирован-

ных яблок и период времени, в течение которого клапан механизма разделения потока плодов будет поднят в верхнее положение для перенаправления движения лапки тарелки по траектории $ACDB$.

В то же время момент срабатывания клапана соленоида определяется количеством шагов ротора энкодера, установленного соосно с ведомой звездочкой и измеряющего путь цепи главного конвейера от фотомодуля до механизма разделения потока яблок.

Основные технические характеристики лабораторной установки системы технического зрения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные технические характеристики лабораторной установки системы технического зрения

Наименование показателя	Значение показателя
Тип машины	стационарная
Количество анализируемых рабочих потоков, шт.	1
Скорость движения главного конвейера, м/с	0,2...0,8
Рабочая длина зоны распознавания, м	0,62
Частота вращения яблок в зоне оптического модуля, Гц	1...3

Методика планирования эксперимента

В целях сокращения затрат труда, времени и средств на выявление оптимальных режимов работы системы технического зрения применены методы физического моделирования и математической теории планирования эксперимента.

Основной задачей планирования эксперимента является получение уравнения регрессии, которое позволит оценить влияние воздействующих факторов x_i на точность отделения отсортированных яблок [11–14]:

$$y = b_0 + \sum_i^k b_i x_i + \sum_{i>j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=j}^k b_{ij} x_i^2,$$

где b_0 – свободный член, равный выходу при $x_i = 0$; b_i – коэффициенты регрессии соответствующих факторов, указывающие влияние того или иного фактора на изучаемый объект; b_{ij} – коэффициент регрессии факторов двойного взаимодействия; x_i, x_j – кодовое обозначение факторов.

Полнота отделения яблок (y_1) на выходе в нашем случае является параметром оптимизации: $y_{1\max} = 1$ – при 100-процентном отделении яблок соответствующего сорта.

Точность отделения яблок будет наилучшей в том случае, когда все яблоки соответствующего сорта будут отделены от общего потока плодов и сброшены на выходной конвейер, т. е. $y_1 = 1$.

Для устранения корреляции между коэффициентами регрессии в оценке расчетных значений функции отклика используем кодированные значения факторов:

$$x_i = \frac{\overline{x_i} - \overline{x_{i0}}}{\varepsilon_i}, \quad (1)$$

где $\overline{x_i}$ – натуральное значение i -го фактора; $\overline{x_{i0}}$ – натуральное значение фактора на нулевом уровне; ε_i – значение интервала варьирования фактора:

$$\varepsilon_i = \frac{\overline{x_i^B} - \overline{x_i^H}}{2}, \quad (2)$$

где $\overline{x_i^B}, \overline{x_i^H}$ – соответственно, верхняя и нижняя границы изменения величины $\overline{x_i}$.

Точность отделения яблок определяли по следующей зависимости:

$$T = 100 \% - \left(\sum_1^n \frac{m_i}{m_0} \cdot 100 \% \right),$$

где n – число фракций; m_i – количество яблок, выделенных в соответствующий сорт; m_0 – общее количество яблок всех фракций.

Для получения уравнения регрессии выбран симметричный некомпозиционный план Бокса – Бенкена [15] как способ построения планов второго порядка при условии, что каждая переменная может изменяться не более чем на трех уровнях ($-1, 0, +1$) (таблица 2).

Большое количество нулей в матрице планирования упрощает вычисление коэффициентов уравнения регрессии при ручной обработке результатов. Перед проведением эксперимента выбираем базовые уровни и интервалы варьирования факторов, количество параллельных опытов в каждой точке плана и порядок его реализации. В качестве факторов оптимизации выбираем: скорость главного конвейера x_1 , угол наклона тарелки каретки x_2 , число шагов удерживания клапана соленоида x_3 (таблица 3).

Таблица 2 – Симметричный не композиционный план Бокса – Бенкена

Число факторов, k	Матрица планирования			План для факторов, имеющих уровни ± 1	Число опытов		
	x_1	x_2	x_3		В выборке из плана 3^k	На нулевом уровне N_0	Всего N
3	± 1	± 1	0	2^2	24	3	15
	0	0	± 1				
	± 1	0	0				
	0	± 1	± 1				
	± 1	0	± 1				
	0	± 1	0				
	0	0	0				

Уровни варьирования факторов были определены из следующих соображений. Нижняя граница скорости главного конвейера выбрана, исходя из необходимой производительности машины для сортировки, для достижения которой необходима скорость не менее 0,4 м/с. Верхняя граница определялась экспериментально, в результате чего была принята скорость 0,8 м/с, так как при увеличении скорости происходит механическое повреждение яблок при сходе их с конвейера.

Таблица 3 – Уровни варьирования факторов

Факторы	Скорость главного конвейера, м/с, x_1	Угол наклона тарелки каретки, град., x_2	Число шагов удерживания клапана соленоида, шаг, x_3
Основной уровень x_{i0}	0,6	30	95
Интервалы варьирования Δx_i	0,2	5	10
Верхний уровень $x_i = +1$	0,8	35	105
Нижний уровень $x_i = -1$	0,4	25	85

Нижняя и верхняя границы варьирования угла наклона тарелки определены экспериментально в ходе проведения лабораторных исследований, шаг изменения факторов принят равным 5 град. Верхний уровень – 35 град., нижний – 25 град.

Интервал варьирования числа шагов удерживания клапана соленоида выбран в результате поисковых экспериментальных исследований. Нижняя граница 85 шагов, верхняя – 105 шагов.

Проведение эксперимента и обработка результатов

Факторное пространство описывается уравнением регрессии в виде полинома второй степени, который имеет следующий вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3.$$

Выбранный план Бокса – Бенкена имеет тип 3^k . В данном плане выбранные переменные варьируются на трех уровнях: $+1, 0, -1$ (таблица 4).

Таблица 4 – Матрица плана Бокса – Бенкена

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2
1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
2	1	1	-1	0	-1	0	0	1	1	0
3	1	-1	1	0	-1	0	0	1	1	0
4	1	-1	-1	0	1	0	0	1	1	0
5	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
6	1	1	0	-1	0	-1	0	1	0	1
7	1	-1	0	1	0	-1	0	1	0	1
8	1	-1	0	-1	0	1	0	1	0	1
9	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1
10	1	0	1	-1	0	0	-1	0	1	1
11	1	0	-1	1	0	0	-1	0	1	1
12	1	0	-1	-1	0	0	1	0	1	1
13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Однородность дисперсий определяли с помощью G-критерия Кохрена:

$$G_3 = \frac{\max(S_j^2)}{\sum_{j=1}^N S_j^2}, \quad j = 1, \dots, N,$$

где $\max S_j^2$ – максимальная выборочная дисперсия в N выборках; S_j^2 – выборочная дисперсия в j -м опыте; N – число опытов (число выборок); j – текущий номер опыта.

Выборочную дисперсию в каждой выборке определяли по формуле:

$$S_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{ji} - \bar{y}_j)^2}{n-1},$$

где y_{ji} – значение параметра оптимизации в j -м опыте и i -м дубле; i – текущий номер дубля, $1, \dots, n$; n – число дублей каждого из N опытов; $\bar{y}_j$ – выборочное среднее в j -м опыте.

Среднее арифметическое значение параметра оптимизации для каждой строки:

$$\bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^n y_{ji}}{n}, \quad j = 1, \dots, N.$$

Значения коэффициентов уравнения второго порядка рассчитывали по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{n=1}^{n_0} y_{0n},$$

$$b_i = A \sum_{n=1}^N X_{in} y_n,$$

$$b_{ij} = D \sum_{n=1}^{n_0} X_{in} X_{jn} y_n,$$

$$b_{ii} = B \sum X_{in}^2 y_n + C \sum_{i=1}^k \sum_{n=1}^N X_{in}^2 y_n - \frac{\sum_{n=1}^{n_0} y_{0n}}{N_0 p},$$

где N_0 – число опытов на нулевом уровне (в данном случае $N_0 = 3$); y_{0n} – значение параметра оптимизации трех опытов на нулевом уровне факторов; y_n – значение параметра оптимизации в n -й строке матрицы; X_i – кодированные уровни факторов.

Значимость коэффициентов регрессии определяли по следующей формуле:

$$\Delta b_i = \pm t \cdot S_{bi},$$

где t – табличные значения критерия Стьюдента при заданном уровне доверия α и степени свободы $f = N(n - 1)$; S_{bi} – ошибка определения коэффициентов b_i , определяемая по формуле:

$$S_{bi} = \sqrt{S_{bi}^2},$$

где S_{bi}^2 – дисперсия при определении коэффициентов.

$$S_{b0}^2 = \frac{1}{N_0} S_{y0}^2,$$

$$S_{bi}^2 = A S_{y0}^2,$$

$$S_{bij}^2 = D S_{y0}^2,$$

$$S_{bii}^2 = \left(B_1 + \frac{1}{p^2 N_0} \right) S_{y0}^2,$$

где S_{y0}^2 – среднее квадратическая дисперсия трех опытов на нулевом уровне (дисперсия воспроизводимости эксперимента); B_1 – константа, зависящая от числа факторов.

$$S_{y0}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{n0} - \bar{y}_0)^2}{N_0 - 1},$$

где $\bar{y}_0$ – среднее значение параметра оптимизации трех опытов на нулевом уровне факторов.

В результате получено уравнение регрессии второго порядка, в котором все коэффициенты регрессии значимы:

$$y = 96,47 - 4,36x_1 + 1,77x_2 + 2,43x_3 - 1,87x_1^2 - 1,16x_2^2 - 2,01x_3^2 + 2,69x_1x_2 + 2,23x_1x_3 - 1,03x_2x_3. \quad (3)$$

Анализ полученного уравнения показывает, что точность отделения яблок зависит от скорости движения главного конвейера, угла наклона тарелки каретки и числа шагов энкодера удерживания клапана соленоида.

Адекватность уравнения регрессии по плану Бокса – Бенкена проводили путем анализа расчетной среднее квадратической дисперсии без проверки математической модели на адекватность [16].

Расчетное среднее квадратическое отклонение определяется по формуле:

$$S_{\Delta U} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^k (\bar{y}_j - y_j^p)^2}{k - 1}},$$

где $(\bar{y}_j - y_j^k)$ – разность между средним опытным и расчетным значениями параметра оптимизации; k – число опытов ($k = N - N_0 - 1$).

Расчетное значение параметра y в j -м опыте рассчитывается по формуле:

$$y_j^p = b_0 + b_1 X_{1n} + b_2 X_{2n} + b_3 X_{3n} + b_{11} X_{1n}^2 + b_{22} X_{2n}^2 + b_{33} X_{3n}^2 + b_{12} X_{1n} X_{2n} + b_{13} X_{1n} X_{3n} + b_{23} X_{2n} X_{3n}.$$

Результаты расчетов приведены в таблице 5. Согласно полученным результатам очевидно, что уравнение регрессии второго порядка адекватно, так как среднеквадратичное отклонение на нулевом уровне больше расчетного:

$$|S_{y0}| > |S_{\Delta U}|, \quad 0,980 > 0,881.$$

Для получения функции отклика в зависимости от натуральных значений факторов декодируем уравнение регрессии (3). Для этого найдем натуральные значения факторов, используя формулы (1) и (2).

Фактор скорости главного конвейера:

$$x_1 = \frac{v - 0,60}{0,20}.$$

Фактор угла наклона тарелки каретки:

$$x_2 = \frac{\eta - 30}{5}.$$

Фактор числа шагов энкодера удерживания клапана соленоида:

$$x_3 = \frac{\tau - 5}{1}.$$

Подставив в уравнение (3) натуральные значения факторов x_1 , x_2 , x_3 , получим функцию отклика в натуральных показателях:

$$\begin{aligned} T = & 16,56 - 181,4v - 0,432\eta + 2,764\tau - 46,75v^2 - \\ & - 0,04641\eta^2 - 0,02\tau^2 + 2,69v\eta + 1,1v\tau + 0,02\eta\tau. \end{aligned} \quad (4)$$

При анализе уравнения регрессии второго порядка 4 установлено, что все выбранные факторы влияют на точность отделения яблок. Адекватность уравнения в кодированном виде при уровне значимости 0,05 % говорит о том, что погрешность вычисления при реализации полученной модели на практике в установленном диапазоне варьирования факторов не превысит 5 %.

Анализ математической модели

На рисунке 8, *а, б, в* представлены поверхности отклика, характеризующие зависимость точности отделения отсортированных яблок от значимых факторов.

Анализ двумерных сечений показывает, что центры эксперимента находятся в исследуемой зоне и расчетные данные согласуются с экспериментальными, что позволяет установить оптимальные параметры для различных сочетаний факторов.

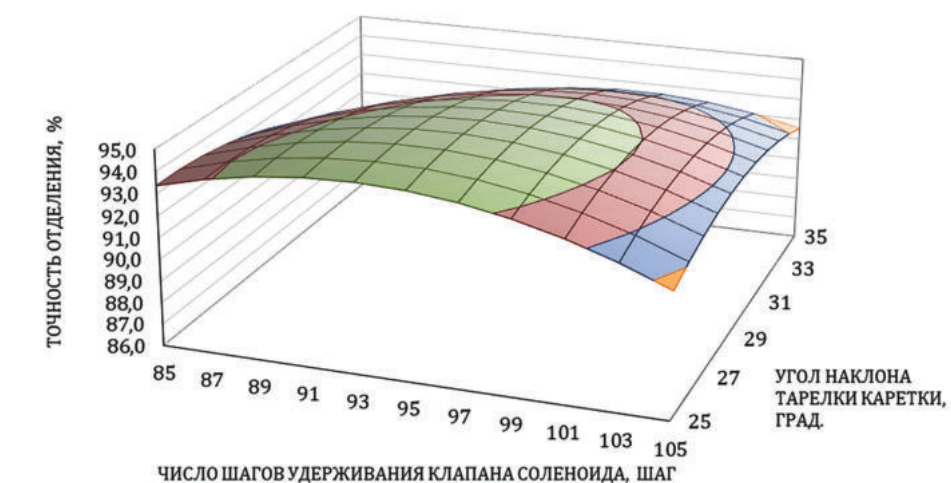
Согласно проведенному анализу рациональными параметрами качества сортировки в заданном интервале точности сортирования яблок являются следующие значения: $v = 0,41$ м/с, $\eta = 27$ град., $\tau = 93$ шаг. При этом точность сортирования составляет 95,1 %.

Реализация результатов исследований

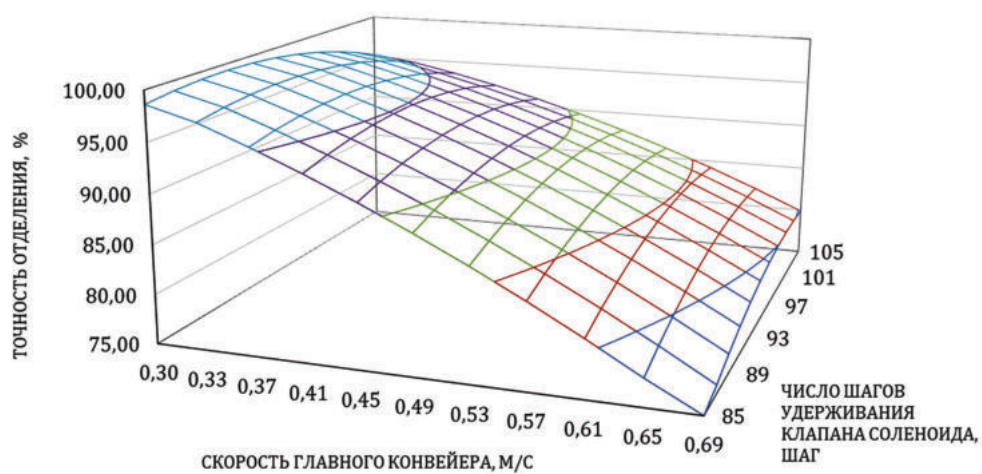
Результаты исследований использованы при создании системы технического зрения технологической линии сортировки и фасовки яблок ЛСП-4, разработанной РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» [6–9].

Приемочные испытания показали, что технологическая линия соответствует требованиям технического задания и обеспечивает качественное выполнение технологического процесса сортировки яблок по размеру и наличию дефектов от механических повреждений, болезней и вредителей [17].

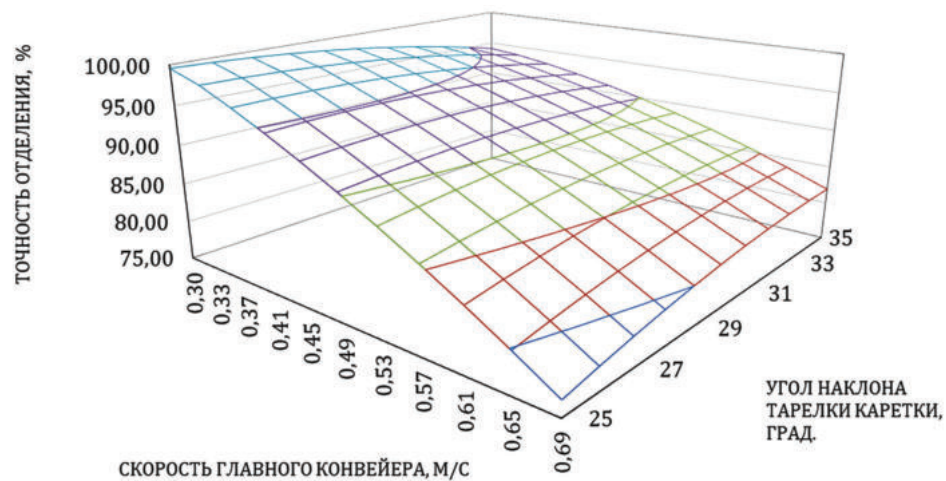
При этом точность отделения отсортированных плодов составляет 95,4 %, что подтверждает правильность экспериментальных исследований.



а



б



в

Рисунок 8 – Поверхности отклика: а – $T = f(\eta; \tau)$; б – $T = f(v; \eta)$; в – $T = f(v; \tau)$

Таблица 5 – Результаты факторного эксперимента

Номер точки плана	Матрица плана Бокса – Бенкена ($k = 3$)											Результаты экспериментальных исследований					Результаты расчета для проверки адекватности модели		
	x_0	x_1 (v)	x_2 (n)	x_3 (r)	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	y_1	y_2	y_3	y_{cp}	S_f^2	$\hat{y}_{cp}$	$(y_{cp} - \hat{y}_{cp})^2$		
1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	93,6	96,5	92,6	94,3	4,11	93,5	0,512		
2	1	1	-1	0	1	1	0	-1	0	0	85,8	84,7	83,0	84,5	2,01	84,6	0,015		
3	1	-1	1	0	1	1	0	-1	0	0	96,0	98,5	96,5	97,0	1,71	96,9	0,015		
4	1	-1	-1	0	1	1	0	1	0	0	97,5	98,5	98,0	98,0	0,25	98,7	0,512		
5	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	91,7	92,6	90,7	91,7	0,88	92,9	1,550		
6	1	1	0	-1	1	0	1	0	-1	0	84,5	87,1	81,1	84,2	9,23	83,6	0,425		
7	1	-1	0	1	1	0	1	0	-1	0	96,0	98,5	95,0	96,5	3,25	97,2	0,425		
8	1	-1	0	-1	1	0	1	0	1	0	97,5	98,5	98,0	98,0	0,25	96,8	1,550		
9	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	98,0	96,5	96,5	97,0	0,74	96,5	0,280		
10	1	0	1	-1	0	1	1	0	0	-1	91,7	94,6	90,7	92,3	4,03	93,7	1,870		
11	1	0	-1	1	0	1	1	0	0	-1	97,5	97,0	94,6	96,4	2,46	95,0	1,870		
12	1	0	-1	-1	0	1	1	0	0	1	87,8	86,7	88,2	87,5	0,61	88,1	0,280		
13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95,6	96,5	94,6	95,6	0,96	96,5	0,846		
14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	94,1	98,5	96,5	96,4	4,90	96,5	0,012		
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	97,5	98,5	96,5	97,5	1,00	96,5	1,061		
b_j	96,47	-4,36	1,77	2,43	-1,87	-1,16	-2,01	2,69	2,23	-1,03	Проверка однородности дисперсий			Проверка адекватности модели					
Проверка значимости коэффициентов																			
S_{y0}^2	1,037	$S^2\{b_i\}$	0,3199	0,1200	0,2599	0,2599	0,2599	0,2399	0,2399	0,2399	ΣS_j^2			36,379	$\Sigma(y_{cp} - \hat{y}_{cp})^2$			9,304	
p	0,95	$S\{b_i\}$	0,566	0,346	0,346	0,510	0,510	0,490	0,490	0,490	S_{jmax}^2			9,232	$k = N - N_0 - 1$			13	
f	30	t_i	170,56	12,59	5,12	3,67	2,27	3,94	4,56	2,10	G			0,254	$k - 1$			12	
$t_{кр}$	2,042	$t_i - t_{кр}$	168,52	10,55	3,08	1,63	0,23	1,90	3,44	0,06	$n - 1$			2	S_{AU}			0,881	
Δb_j			1,155	0,707	0,707	1,041	1,041	1,000	1,000	1,000	N			15	S_{y0}^2			0,960	
Вывод:			зн	зн	зн	зн	зн	зн	зн	зн	$G_{кр}$			0,335	S_{y0}			0,980	
			зн	зн	зн	зн	зн	зн	зн	зн	$G - G_{кр}$			-0,081	$S_{y0} - S_{AU}$			0,099	
Уравнение регрессии	$y = 96,47 - 4,36x_1 + 1,77x_2 + 2,43x_3 - 1,87x_1^2 - 1,16x_2^2 - 2,01x_3^2 + 2,69x_1x_2 + 2,23x_1x_3 - 1,03x_2x_3.$										Вывод:			Дисп. однор			Вывод:		Ур. адекв.

Выводы

В результате экспериментальных исследований получено уравнение регрессии зависимости для определения точности отделения отсортированных плодов.

Анализ поверхностей отклика позволил установить оптимальные значения скорости главного конвейера $v = 0,41 \text{ м/с}$, угла наклона тарелки каретки $\eta = 27$ град. и числа шагов удержания клапана соленоидом $\tau = 93$ шага, при которых точность сортирования составляет более 95 %.

Результаты экспериментальных исследований реализованы в технологической линии сортировки и фасовки яблок ЛСП-4, приемочные испытания которой показали правильность обоснованных параметров.

Работа выполнялась в рамках задания 5 «Разработать и освоить производство технологической линии сортировки и фасовки яблок» подпрограммы «Белсельхозмеханизация – 2025» государственной научно-технической программы «Инновационные агропромышленные и продовольственные технологии» 2021–2025 гг.

Список использованных источников

1. Смирнов, И. Г. Интеллектуальные технологии и роботизированные машины для возделывания садовых культур / И. Г. Смирнов, Д. О. Хорт, А. И. Кутырев // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2021. – Т. 15, № 4. – С. 35–41.
2. Роботизированный комплекс для сортировки яблок / П. В. Балабанов [и др.] // Цифровизация агропромышленного комплекса : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 21–23 окт. 2020 г. / Тамбов. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2020. – Т. 1. – С. 44–47.
3. Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision / C. Szegedy [et al.] // Cornell University Library. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1512.00567.pdf> (date of access: 15.05.2018).
4. ImageNet // Stanford Vision Lab, Stanford University, Princeton University. – URL: <http://www.image-net.org> (date of access: 05.04.2018).
5. Yuzhen, Lu. Development of a multispectral Structured Illumination Reflectance Imaging (SIRI) system and its application to bruise detection of apples [Разработка мультиспектральной системы визуализации отраженного изображения (SIRI) и ее применение для обнаружения повреждений яблок. (США)] / Lu Yuzhen, Lu Renfu // Transactions of the ASABE / Amer. soc. of agriculture and biol. engineering. -St. Joseph (Mich.), 2017. – Vol. 60, № 4. – P. 1379–1389.
6. Казакевич, П. П. Система технического зрения распознавания дефектов яблок: обоснование, разработка, испытание / П. П. Казакевич, А. Н. Юрин, Г. А. Прокопович // Весці НАН Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2021. – Т. 59, № 4. – С. 488–500. – DOI: 10.29235/1817-7204-2021-59-4-488-500.
7. Юрин, А. Н. Инновационные технологические процессы и технические комплексы для интенсивного садоводства Беларуси / А. Н. Юрин. – Минск : Беларус. навука, 2022. – 208 с.
8. Казакевич, П. П. Обоснование алгоритма сортирования плодов системой технического зрения / П. П. Казакевич, Д. И. Комлач, А. Н. Юрин // Наука в центральной России. – 2023. – № 2 (62) – С. 27–37. – DOI: 10.35887/2305-2538-2023-2-27-37.
9. К разработке машин на основе искусственного интеллекта и систем технического зрения / П. П. Казакевич, Д. И. Комлач, А. Н. Юрин, А. С. Воробей // Агроэкоинженерия / ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. – 2023. – № 1 (114). – С. 14–31. – DOI: 10.24412/2713-2641-2023-1114-14-31.
10. Применение искусственной нейронной сети для идентификации качества яблок при сортировке / П. П. Казакевич, А. Н. Юрин, В. В. Микульский, Л. А. Ходасевич // Агропанорама: науч.-техн. журнал. – Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. ; редкол.: Н. Н. Романюк [и др.]. – Минск, 2023. – № 3 (157). – С. 31–38.
11. Кондрашев, А. П. Основы физического эксперимента и математическая обработка результатов измерений / А. П. Кондрашев, Е. В. Шестопапов. – М. : Агропромиздат, 1977. – 195 с.
12. Вентциль, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентциль. – М. : Наука, 1969. – 567 с.
13. Коваленко, И. Н. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие для вузов / И. Н. Коваленко, А. А. Филиппова. – М. : Высш. шк., 1973. – 368 с.
14. Мельников, В. С. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / В. С. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рошин. – Ленинград : Колос, 1972. – 199 с.
15. Касандрова, О. Н. Обработка результатов наблюдений / О. Н. Касандрова, В. В. Лебедев. – М. : Наука, 1970. – 103 с.
16. Ашмарин, И. П. Быстрые методы статистической обработки и планирования экспериментов / И. П. Ашмарин, Н. Н. Васильев, В. А. Амбросов. – Ленинград : Университет, 1971. – 75 с.
17. Протокол приемочных испытаний технологической линии сортировки и фасовки яблок ЛСП-4: № 004 1/3-2022 ; введ. 25.02.2022. – п. Привольный : ГУ «Белорусская МИС», 2022. – 99 с.