

Е. Л. Жилич, Ю. Н. Рогальская, Д. В. Бернацкая, В. В. Никончук

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

**ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ,
АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ
МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ
И РАЗДАЧИ ПОЛНОРАЦИОННЫХ КОРМОСМЕСЕЙ**

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований макетного образца устройства для приготовления и раздачи полнорационных кормосмесей.

В ходе обработки данных определено влияние варьирования таких факторов, как частота вращения выгрузного шнека, количество форсунок, диаметр отверстия форсунки на параметр оптимизации. Получено уравнение регрессии, отражающее зависимость параметра оптимизации от варьируемых факторов.

Ключевые слова: макетный образец, опыт, кормосмесь, меласса, индикатор, эксперимент, проба, компонент, уравнение регрессии, матрица.

E. L. Zhilich, Yu. N. Rogalskaya, D. V. Bernatskay, V. V. Nikonchuk

*RUE "SPC NAS of Belarus for Agriculture Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: npc_mol@mail.ru*

**CONDUCTING EXPERIMENTAL STUDIES, ANALYSIS AND PROCESSING
OF EXPERIMENTAL DATA OF A PROTOTYPE OF A DEVICE FOR PREPARING
AND DISTRIBUTING COMPLETE FEED MIXTURES**

Abstract. The results of experimental studies of a prototype device for preparing and distributing complete feed mixtures are presented.

During data processing, the influence of variation of such factors as the rotation frequency of the unloading auger, the number of nozzles, and the diameter of the nozzle hole on the optimization parameter was determined. A regression equation was obtained that reflects the dependence of the optimization parameter on the variable factors.

Keywords: prototype, experiment, feed mixture, molasses, indicator, experiment, sample, component.

Введение

Макетный образец устройства для приготовления и раздачи полнорационных кормосмесей для разработки интеллектуальных систем дозированной их выдачи при кормлении животных различных половозрастных групп должен обеспечивать в автоматическом режиме следующие функции:

- определение половозрастной группы животного (снятие данных с приемо-передающего устройства);
- приготовление полнорационной кормосмеси по установленному рецепту для заданной половозрастной группы животного;
- четкое дозирование исходных компонентов кормосмеси;
- дозированный ввод жидких компонентов в кормосмесь при ее выгрузке.

Основная часть

Макетный образец устройства для приготовления и раздачи полнорационных кормосмесей представлен на рисунке 1.

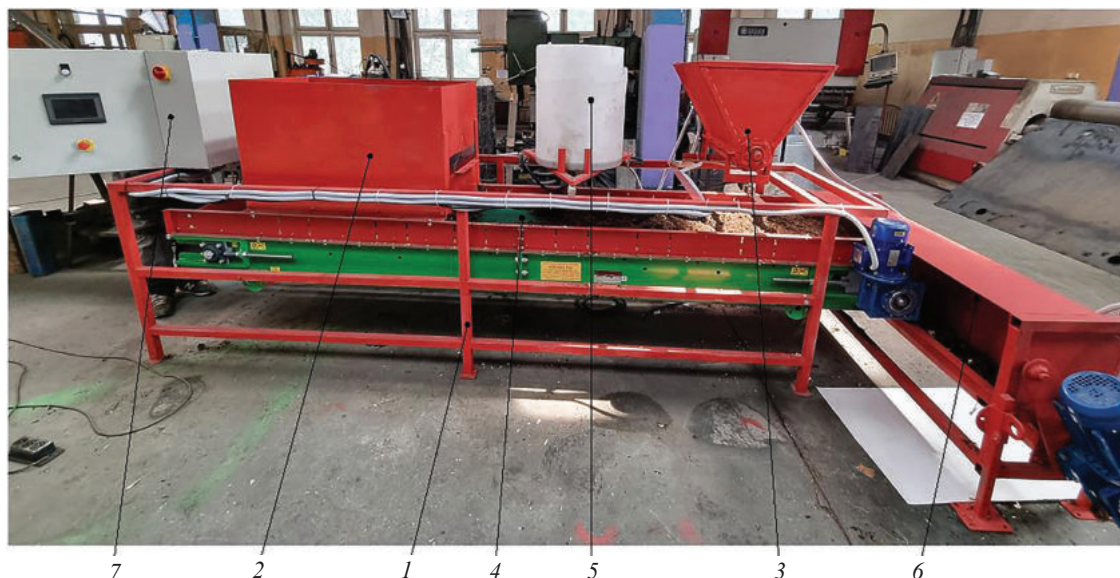


Рисунок 1 – Макетный образец устройства для приготовления и раздачи полнорационных кормосмесей:
 1 – рама подающего транспортера; 2 – бункер силоса; 3 – бункер комбикорма; 4 – подающий транспортер;
 5 – бункер для жидких компонентов; 6 – шнек выгрузной; 7 – шкаф управления

Экспериментальные исследования осуществлены в следующем порядке.

1. Произведена проверка физико-механических свойств используемых компонентов кормосмеси на соответствие зоотехническим требованиям (гранулометрический состав, отсутствие посторонних примесей).

2. Осуществлено использование пищевого красителя для выкраски индикаторов, с целью дальнейшей проверки качества процесса смешивания.

В качестве индикаторов использовалась зерновая группа и горох (рисунок 2).

Индикаторы использовались для каждого рецепта по отдельности в зависимости от половозрастной группы животного:

- зеленый – для молодняка старше года;
- синий – для коров;
- красный – для скота на откорме.

Индикаторы добавлялись непосредственно в комбикорм и равномерно перемешивались (рисунок 3).



а



б

Рисунок 2 – Индикаторы определения качества процесса смешивания: *а* – зерновая группа; *б* – горох



Рисунок 3 – Загрузка индикаторов в комбикорм



Рисунок 4 – Предварительная отработка технологического режима (силос-комбикорм)



Рисунок 5 – Предварительная отработка технологического режима (меласса)

3. Осуществлена загрузка исходных компонентов в бункер силоса, комбикорма и жидких компонентов совместно с соответствующим индикатором.

4. Произведена регулировка нормы дозирования исходных компонентов в зависимости от рецепта с учетом половозрастной группы животного (рисунки 4, 5).

5. Осуществлена регулировка варьируемых параметров технологических факторов макетной установки в соответствии с матрицей плана эксперимента (таблица 1).

Таблица 1 – Матрица плана эксперимента в натуральных показателях

Номер опыта	ω , частота вращения выгрузного шнека, об/мин	n , количество форсунок, шт.	d , диаметр отверстия форсунки, м
1	20	4	3
2	60	4	3
3	20	8	3
4	60	8	3
5	20	6	2
6	60	6	2
7	20	6	4
8	60	6	4
9	40	4	2
10	40	8	2
11	40	4	4
12	40	8	4
13	40	6	3
14	40	6	3
15	40	6	3

6. Проведены серии опытов. Опыт проводился однократно для каждого рецепта в зависимости от параметров макетной установки, всего 15 опытов на рецепт.

7. Пробы полученной кормосмеси для каждого опыта брали в количестве трех. Пробы брались вдоль линии раздачи (рисунок 6).



a



б



в

Рисунок 6 – Пробы полученной кормосмеси: *a* – рецепт № 1; *б* – рецепт № 2; *в* – рецепт № 3

8. Определяли физико-механические свойства полученной кормосмеси.

8.1. Степень однородности определяли расчетным путем по формуле (сравнивали для трех навесок):

$$K_{o1} = \left(1 - \frac{\frac{\sum (x_u - x_{cp})^2}{n-1}}{x_{cp}} \right) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где x_u – содержание индикаторного компонента в каждой пробе, %; x_{cp} – среднее количество индикаторного компонента в каждой пробе (для всех опытов по заданному рецепту), %; n – количество проб, шт.

8.2. Определяли структуру кормов, а именно комковатость, путем нахождения соотношения его фракций по формуле:

$$K_{o2} = \left(1 - \frac{m_k}{m_n} \right) \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где m_k – масса комков в каждой пробе, кг; m_n – масса пробы, кг [1].

8.3. Определяли суммарный коэффициент.

Отмечено, что при большой доле использования мелассы наблюдалось значительное комкование.

9. По завершении процесса смешивания производили контроль влажности полученной кормосмеси на соответствие зоотехническим требованиям. Влажность полученной кормосмеси не должна превышать 50 %.

10. На основе полученных результатов произвели обработку полученных данных.

Далее представлена обработка данных для рецепта № 3, поскольку в данной рецептуре предусмотрен ввод наибольшего количества мелассы, ввиду чего наиболее часто возникает ряд негативных факторов, таких как комкование и неоднородность смешивания компонентов кормосмеси.

Кодирование факторов проводим по формуле:

$$x_i = \frac{\bar{x}_i - \bar{x}_{i0}}{\varepsilon_i}, \quad (3)$$

где $\bar{x}_i$ – натуральное значение i -го фактора; $\bar{x}_{i0}$ – натуральное значение фактора на нулевом уровне; ε_i – значение интервала варьирования фактора.

$$\varepsilon_i = \frac{\bar{x}_i^B - \bar{x}_i^H}{2}, \quad (4)$$

где $\bar{x}_i^B$, $\bar{x}_i^H$ – соответственно верхняя и нижняя граница изменения величины $\bar{x}_i$.

Кодирование факторов представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Кодирование факторов

Кодовое обозначение фактора	$\bar{x}_{i0}$	ε_i
X_1	40	20
X_2	6	2
X_3	3	1

За параметр оптимизации выбран суммарный коэффициент качества кормов с учетом однородности смешивания и комковатости K_o , являющийся основным показателем качества работы устройства.

Основной задачей данного эксперимента является получение статистической модели объекта в виде уравнения регрессии [2]. Многофакторное ортогонализированное уравнение регрессии второго порядка, отражающее зависимость параметра Y от k факторов X_i , имеет вид:

$$y = b_0 + \sum_i^k b_i x_i + \sum_{i>j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=j}^k b_{ij} x_i^2, \quad (5)$$

где y – параметр оптимизации; 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; x_i, x_j – кодовое обозначение факторов; b_{ij} – коэффициент регрессии соответствующих факторов двойного взаимодействия.

В нашем случае факторное пространство описывается уравнением регрессии в виде полинома второй степени, который имеет следующий вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3. \quad (6)$$

В данном плане выбранные переменные варьируются на трех уровнях: +1, 0, –1 (таблица 4), что упрощает и удешевляет эксперимент по сравнению с центральными композиционными ротатабельными планами второго порядка, где предусматривается использование каждого фактора на пяти уровнях. Матрица плана Бокса – Бенкена представлена в таблице 5.

Обработка результатов экспериментальных данных многофакторного эксперимента позволяет получить точную математическую формулу зависимости результирующей функции от трех выбранных наиболее значимых факторов [3]. Построение поверхностей отклика 3D и их сечений позволит сделать подробный анализ результатов эксперимента и подготовить научные выводы по результатам экспериментальных исследований.

Данные, полученные в ходе экспериментальных исследований устройства в зависимости от варьируемых факторов, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Данные качества полученной кормосмеси в трех повторениях

Номер опыта	Критерий оптимизации				Дисперсия S_j^2
	y_1	y_2	y_3	$\bar{y}_1$	
1	79,8	80,2	79,9	80,0	0,04333
2	80,7	81,3	80,9	81,0	0,09333
3	83,9	84,2	84,0	84,0	0,02333
4	88,2	87,9	88,3	88,1	0,04333
5	77,9	77,8	78,3	78,0	0,07000
6	80,0	80,1	79,9	80,0	0,01000
7	85,8	86,2	86,1	86,0	0,04333
8	81,0	80,9	81,0	81,0	0,00333
9	84,2	83,9	84,0	84,0	0,02333
10	87,1	87,2	86,7	87,0	0,07000
11	88,1	88,0	87,9	88,0	0,01000
12	90,0	90,0	90,0	90,0	0,00000
13	93,9	93,9	94,1	94,0	0,01333
14	94,0	94,1	94,0	94,0	0,00333
15	93,1	93,0	93,0	93,0	0,00333
Σ					0,45333

Однородность дисперсий определяли с помощью G -критерия Кохрена [4]:

$$G_s = \frac{\max S_j^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2}, j = 1 \dots N, \quad (7)$$

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 [4]:

$$S_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{ji} - \bar{y}_j)^2}{n-1}, \quad (8)$$

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

Среднее арифметическое значение параметра оптимизации для каждой строки определяем по формуле:

$$\bar{y}_j = \frac{\sum_i^n y_{ji}}{n}, j=1...N. \quad (9)$$

Например, для первой строки:

$$\bar{y}_j = \frac{80,7 + 81,3 + 80,9}{3} = 81,0.$$

$$S_1^2 = \frac{(80,7 - 81,0)^2 + (81,3 - 81,0)^2 + (80,9 - 81,0)^2}{3 - 1} = 0,04333.$$

Таким образом, по результатам обработки всех экспериментальных данных выяснили, что максимальная выборочная дисперсия получилась при обработке 2-го опыта (таблица 7) и составляет $\max S_6^2 = 0,09333$. Тогда, просуммировав дисперсии в каждом опыте, получим:

$$G_9 = \frac{0,09333}{0,45333} = 0,206.$$

Таким образом, проверка всех опытов на однородность по критерию Кохрена показала, что дисперсии всех опытов однородны, так как экспериментальное значение меньше табличного [5], [6]:

$$G_9 < G_{n-1, N, p} = G_{2, 15, 0, 95} = 0,206.$$

Значения коэффициентов уравнения второго порядка рассчитывали по формулам (10–13):

$$a_0 = \frac{1}{N_0} \sum_{n=1}^{n_0} y_{0n}, \quad (10)$$

$$b_i = A \sum_{n=1}^N X_{in} y_n, \quad (11)$$

$$b_{ij} = D \sum_{n=1}^{n_0} X_{in} x_{jn} y_n, \quad (12)$$

$$b_{ii} = B \sum X_{in}^2 y_n - C \sum_{i=1}^k \sum_{n=1}^N X_{in}^2 y_n - \frac{\sum_{n=1}^{n_0} y_{0n}}{N_0 p}, \quad (13)$$

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 (опыт 13, 14, 15); y_n – значение параметра оптимизации в n -й строке матрицы; X_i – кодированные уровни факторов; A, B, C, D, p – константы, зависящие от числа факторов ($A = 1/8, B = 1/4, C = 1/16, D = 1/4, p = 2$).

Значимость коэффициентов уравнения регрессии определяли по следующей формуле:

$$\Delta b_i = \pm t S_{bi}, \quad (14)$$

где t – табличные значения критерия Стьюдента при заданном уровне доверия α и степени свободы $f = N(n - 1)$. При $\alpha = 0,05, t = 2,042$.

S_{bi} – ошибка определения коэффициентов b_i , определяемая по формуле:

$$S_{bi} = \sqrt{S_{bi}^2}, \quad (15)$$

где S_{bi}^2 – дисперсия при определении коэффициентов (23–26).

$$S_{b0}^2 = \frac{1}{N_0} S_{y0}^2, \quad (16)$$

$$S_{bi}^2 = A S_{y0}^2, \quad (17)$$

$$S_{bij}^2 = DS_{y0}^2, \quad (18)$$

$$S_{bii}^2 = \left(B_1 + \frac{1}{p^2 N_0} \right) S_{y0}^2, \quad (19)$$

где S_{y0}^2 – среднеквадратическая дисперсия трех опытов на нулевом уровне (дисперсия воспроизводимости эксперимента); B_1 – константа, зависящая от числа факторов ($B_1 = 13/48$).

$$S_{y0}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{n0} - \bar{y}_0)^2}{N_0 - 1}, \quad (20)$$

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

Исходя из данных можно сделать вывод что коэффициенты b_1 и b_{23} незначимы, поскольку доверительный интервал данных коэффициентов уравнения регрессии превышают их значения.

Таким образом, по результатам расчета было получено уравнение регрессии второго порядка:

$$y_{K_0} = 93,678 + 2,025x_2 + 1,996x_3 + 0,775x_1x_2 - 1,767x_1x_3 - 8,206x_1^2 - 2,197x_2^2 - 4,222x_3^2. \quad (21)$$

Следующим этапом работы является проверка математической модели на адекватность. Адекватность уравнения регрессии по плану Бокса – Бенкена проводили путем проверки дисперсий $S_{\text{воспр}}^2$ и $S_{\text{ад}}^2$ на однородность по критерию Фишера.

Экспериментальное значение критерия Фишера рассчитаем по формуле [6]:

$$F_3 = \frac{\max(S_{\text{воспр}}^2; S_{\text{ад}}^2)}{\min(S_{\text{воспр}}^2; S_{\text{ад}}^2)}, \quad (22)$$

где $S_{\text{воспр}}^2$ – дисперсия воспроизводимости; $S_{\text{ад}}^2$ – дисперсия адекватности.

Дисперсия воспроизводимости определяется по формуле:

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum S_j^2}{n}, \quad (23)$$

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{0,45333}{3} = 0,1511.$$

Число степеней свободы дисперсии воспроизводимости определяется по формуле [5], [6]:

$$\begin{aligned} f_{\text{воспр}} &= N(n - 1), \\ f_{\text{воспр}} &= 15(3 - 1) = 30. \end{aligned} \quad (24)$$

Дисперсию адекватности определяют по формуле:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{n\phi}{N - B}, \quad (25)$$

где ϕ – сумма квадратов разности между средним опытным и расчетным значениями параметра оптимизации; B – число значимых коэффициентов уравнения регрессии.

Суммы квадратов разности между средним опытным и расчетным значениями параметра оптимизации определяем для каждого опыта по формуле:

$$\phi = \sum_{n=1}^k (\bar{y}_j - y_j^p)^2. \quad (26)$$

Расчетное значение параметра y_j^p в каждом опыте рассчитывается, с учетом значимости коэффициентов регрессии, по формуле:

$$y_j^p = b_0 + b_1X_{1n} + b_2X_{2n} + b_3X_{3n} + b_{12}X_{1n}X_{3n} + b_{23}X_{1n}X_{3n} + b_{11}X_{1n}^2 + b_{22}X_{2n}^2 + b_{33}X_{3n}^2. \quad (27)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Расчет выхода системы по уравнению регрессии для $\bar{y}$

Номер опыта	$\bar{y}$	y_j^p	$(\bar{y}_j - y_j^p)^2$
1	81,0	79,92	0,002
2	84,0	81,37	0,163
3	88,1	84,28	0,061
4	78,0	88,27	0,019
5	80,0	77,86	0,020
6	86,0	80,15	0,023
7	81,0	86,12	0,008
8	84,0	81,28	0,098
9	87,0	84,22	0,035
10	88,0	87,09	0,008
11	90,0	88,11	0,012
12	94,0	90,28	0,078
13	94,0	93,69	0,077
14	93,0	93,69	0,118
15	92,1	93,69	0,131
$\Sigma(\bar{y}_{j0} - y_{j0}^p)^2$			0,852

Выбираем табличное значение критерия Фишера $F_{f_{\text{числ}}; f_{\text{знач}}; p}$, в котором на первом месте стоит число степеней свободы большей дисперсии, а на втором – число степеней свободы меньшей дисперсии, при доверительной вероятности $p = 0,95$.

$$F_{2;30;0,95} = 3,316.$$

Поскольку $F_{2;30;0,95} = 3,316 > 2,818 = F_{\alpha}$, то полученное уравнение регрессии адекватно.

Для получения функции отклика в зависимости от натуральных значений факторов декодируем уравнение регрессии.

Подставив в уравнение (27) натуральные значения факторов x_1, x_2, x_3 , получим функцию отклика в натуральных показателях:

$$K_0 = -13,132 + 6,841n + 30,262d + 0,019375wn + 1,745w - 0,07335wd - 0,020515w^2 - 0,54925n^2 - 4,222d^2. \quad (28)$$

Адекватность уравнения в кодированном виде при уровне значимости 0,05 % говорит о том, что погрешность вычислений при реализации полученной модели на практике в установленном диапазоне варьирования факторов не превысит 5 %.

На рисунках 7, 8 представлены поверхности отклика, характеризующие зависимость параметра оптимизации от значимых факторов. Двумерные сечения позволяют получить представление о влиянии каждой пары факторов на параметр оптимизации. Исходное уравнение регрессии в этом случае сводят к уравнению с двумя факторами, стабилизируя другие на соответствующих уровнях.

Вытянутость эллипса (рисунок 8) показывает преобладание одного фактора над другим, а также степень влияния его на показатель неравномерности параметра оптимизации.

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 устройства, при которых обеспечивается оптимальная работа в заданном интервале величин, являются следующие значения:

- частота вращения выгрузного шнека ω – 40,3 об/мин – принимаем 40,0 об/мин;
- количество форсунок n – 6,9 шт. – принимаем 7 шт.;
- диаметр отверстия форсунки d – 3,2 мм – принимаем 3 мм.

Основная цель научного исследования такого рода состоит в том, чтобы выявить эффекты воздействия определенного фактора на изучаемую зависимую переменную. Профили желательности являются эффективным средством оптимизации технологических процессов. Профили прогнозируемых значений и желательности в оптимальном режиме работы представлены на рисунке 9.

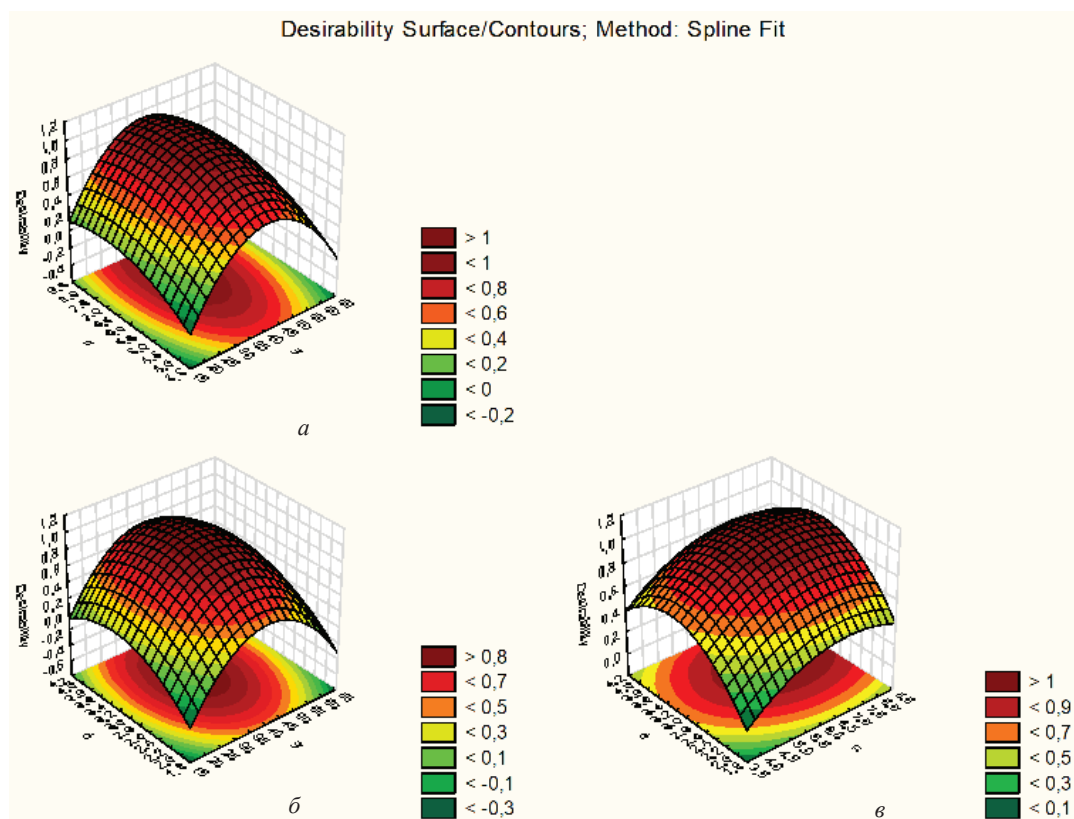


Рисунок 7 – Поверхности отклика: *a* – поверхность отклика $K_o = f(n; w)$; *б* – поверхность отклика $K_o = f(d; w)$; *в* – поверхность отклика $K_o = f(d; n)$

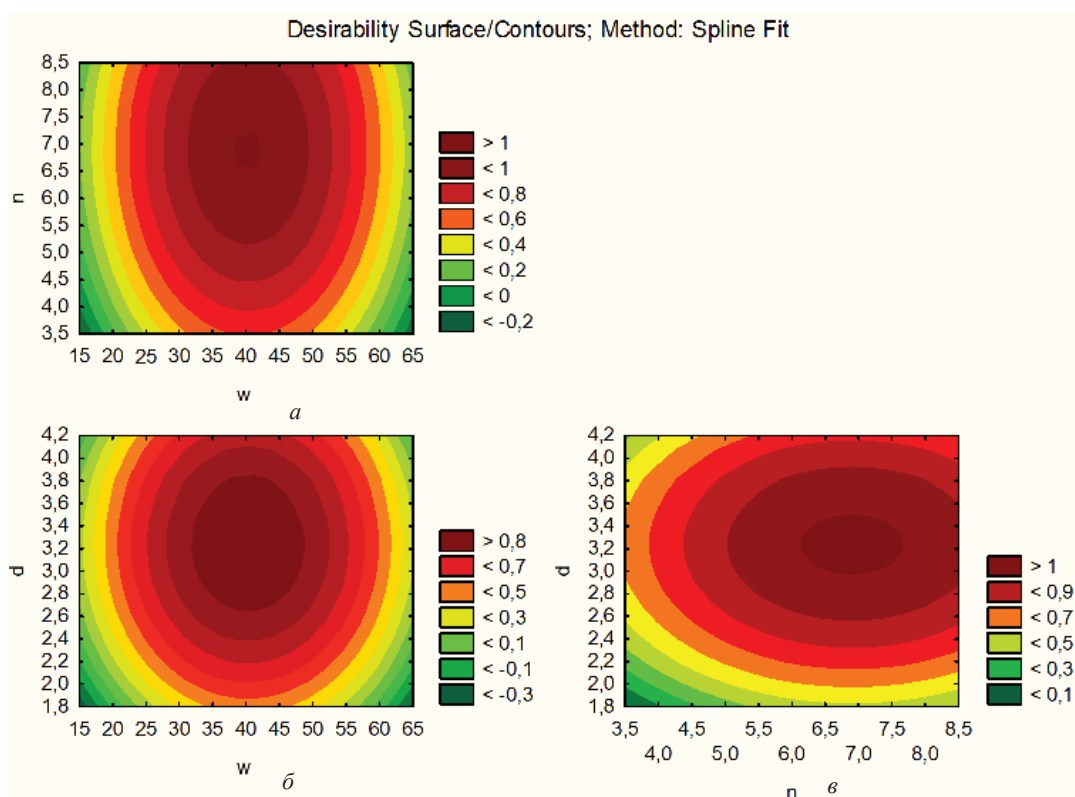


Рисунок 8 – Двумерные сечения: *a* – двумерное сечение $K_o = f(n; w)$; *б* – двумерное сечение $K_o = f(d; w)$; *в* – двумерное сечение $K_o = f(d; n)$

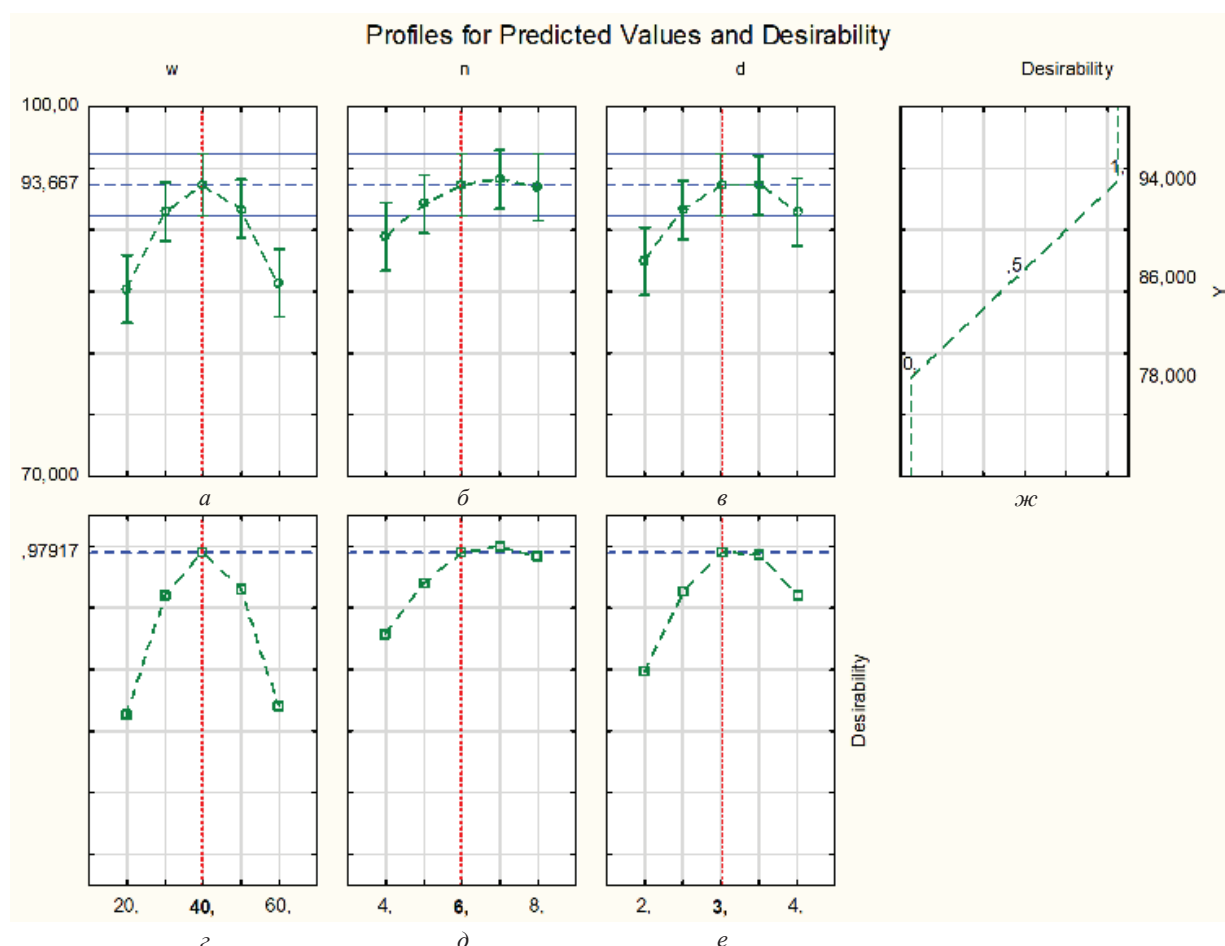


Рисунок 9 – Профили прогнозируемых значений и желательности в оптимальном режиме работы:
а – срез подогнанной функции зависимости K_0 от w ; *б* – срез подогнанной функции зависимости K_0 от n ; *в* – срез подогнанной функции зависимости K_0 от d ; *г* – оптимальный уровень K_0 ;
д – оптимальный уровень d ; *е* – оптимальный уровень b ; *жс* – функция желательности

Рисунок состоит из двух линий графиков. График в правом верхнем углу отображает функцию желательности (рисунок 9, *жс*). Графики в верхней линии (рисунки 9, *а*; 9, *б*; 9, *в*) кроме функции желательности отображают срезы подогнанной функции зависимости K_0 от соответствующей зависимой переменной при фиксации остальных переменных на их оптимальных уровнях.

Оптимальные уровни независимых переменных отображены на графиках в нижней части рисунка красными линиями (рисунки 9, *г*; 9, *д*; 9, *е*). В нижней серии графиков изображены изменения функции желательности при вариации соответствующих независимых переменных.

В результате анализа рисунка оптимального профиля, мы получаем значение $K_0 = 94,97917$, значение желательности = 1,0. На практике для удобства показатели компонента округляют до целых значений.

Заключение

На основе полученных результатов будет произведена обработка данных для рецепта № 3, поскольку в данной рецептуре предусмотрен ввод наибольшего количества мелассы, ввиду чего наиболее часто возникает ряд негативных факторов, таких как комкование и неоднородность смешивания компонентов кормосмеси.

Согласно проведенному анализу рациональными параметрами разработанного устройства, при которых обеспечивается оптимальная работа в заданном интервале величин, являются следующие значения:

- частота вращения выгрузного шнека ω – 40,3 об/мин – принимаем 40,0 об/мин;
- количество форсунок n – 6,9 шт. – принимаем 7 шт.;
- диаметр отверстия форсунки d – 3,2 мм – принимаем 3 мм.

Адекватность уравнения в кодированном виде при уровне значимости 0,05 % говорит о том, что погрешность вычислений при реализации полученной модели на практике в установленном диапазоне варьирования факторов не превысит 5 %.

Список использованных источников

1. Алферов, А. С. Экспериментальные исследования процесса смешивания сухих и жидких компонентов комбикормов / Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2012. – № 10 (96). – С. 115–118.
2. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М. : Наука, 1965. – 338 с.
3. Хайлис, Г. А. Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных / Г. А. Хайлис, М. М. Ковалев. – М. : Колос, 1994. – 169 с.
4. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.
5. Жарский, И. М. Планирование и организация эксперимента : учеб. пособие / И. М. Жарский, Б. А. Каледин, И. Ф. Кузьмицкий. – Минск : БГТУ, 2003. – 184 с.
6. Леонов, А. Н. Основы моделирования : учеб.-метод. пособие / А. Н. Леонов, М. М. Дечко, В. Б. Ловкис. – Минск : БГАТУ, 2020. – 160 с.