



Экспериментальное определение оптимальных параметров оборудования для обработки зерна при подготовке к помолу

А. В. Анисимов*, Ф. Я. Рудик
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (г. Саратов, Россия)

*anisimovaleksan@mail.ru

Введение. Современная технология переработки зерна уделяет особое внимание качественной и эффективной подготовке зерна к помолу. На малых предприятиях с сокращенным технологическим процессом это практически единственный способ, позволяющий повысить выход и качество получаемой продукции. Без правильной и многоступенчатой подготовки зерна к помолу на малых предприятиях невозможно достичь качества и количества продукции, выпускаемой промышленными мельницами. Шелушение зерна является одним из самых эффективных способов очистки поверхности от загрязнений и удаления наружных оболочек. Удаление внешних оболочек позволяет на сокращенных схемах помола повысить выход муки высшего сорта. Ключевое влияние на эффективность процесса шелушения оказывают конструктивные и режимные параметры шелушительной машины. Цель данной работы – экспериментальное определение оптимальных условий протекания процесса обработки зерна в шелушительно-сушильной машине.

Материалы и методы. Для определения оптимальных условий протекания процесса обработки зерна в шелушительно-сушильной машине был применен метод экстремального планирования эксперимента. Отбор факторов, наиболее значимых и существенных по степени их влияния на параметр оптимизации, был осуществлен методом случайного баланса. При отыскании области оптимума использовался метод крутого восхождения по поверхности отклика (метод Бокса – Уилсона): реализованы матрица планирования, статистический анализ полученных результатов и крутое восхождение по поверхности отклика. Проверка результатов исследования осуществлялась с помощью программы Statistica 10.0.

Результаты исследования. На основании экспериментальных исследований была получена математическая модель технологического процесса обработки зерна пшеницы в шелушительно-сушильной машине, связывающая конструктивные и режимные параметры машины с влажностью обрабатываемого зерна. Полученные результаты подтвердили работоспособность разработанной машины при работе с зерном повышенной влажности и являются основополагающими для ее дальнейшей модернизации.

Обсуждение и заключение. Анализ диаграммы рассеивания управляемых факторов позволил отобрать наиболее значимые из них по степени влияния на выбранный параметр оптимизации – белизну муки, полученную из обработанного зерна. В результате оценки экспериментальных данных проведенных исследований определили конструктивные и режимные параметры разработанной машины, соответствующие области оптимума параметра оптимизации: частота вращения вала – 1400 об/мин; угол наклона выштамповки на ситовом барабане – 15 градусов; исходная влажность обрабатываемого зерна – 15,5 %; производительность машины – не выше 700 кг/ч.

© Анисимов А. В., Рудик Ф. Я., 2019



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: шелушение, белизна, влажность, сушка, гидротермическая обработка, планирование эксперимента, диаграмма рассеивания

Для цитирования: Анисимов А. В., Рудик Ф. Я. Экспериментальное определение оптимальных параметров оборудования для обработки зерна при подготовке к помолу // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 594–613. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.594-613>

The Experimental Determination of Optimum Parameters of the Equipment for Processing Grain in Preparation for Grinding

A. V. Anisimov*, F. Ya. Rudik
Saratov State Agrarian University
(Saratov, Russia)

*anisimovaleksan@mail.ru

Introduction. Modern technology of grain processing pays special attention to the qualitative and efficient preparation of grain for milling. At small enterprises with a reduced technological process, this is almost the only way to improve product yield and quality. Without proper multi-stage preparation of grain for milling at small enterprises, it is impossible to achieve the required quality and quantity of products produced by industrial mills. Grain peeling is one of the most effective ways to clean the surface from dirt and remove outer shells. The removal of outer shells allows increasing the yield of high-grade flour at reduced milling diagrams. The efficiency of the peeling process is significantly influenced by the design and operating parameters of the peeling machine. The purpose of this work is the experimental determination of optimal conditions for grain processing in the peeling and drying machine (the optimal combination of factors).

Materials and Methods. To determine optimal conditions for grain processing in the peeling and drying machine, the method of extreme planning of the experiment was applied. The method of random balance was used to select the most significant factors based on their influence on the optimization parameter. The method of steep ascent on the response surface (the Box – Wilson method) was used to find the optimum area (the planning matrix was realized and statistical analysis of results and steep ascent on the response surface was carried out). Verification of the results was carried out on the software Statistica 10.0.

Results. On the basis of experiments, a mathematical model of the technological process of wheat processing in the peeling and drying machine there were obtained, which linked the structural and mode parameters of the machine with the humidity of the treated grain. The results of the experiment confirmed the operability of the developed machine when working with high-humidity grain; they are fundamental for the machine's further modernization.

Discussion and Conclusion. The analysis of the controlled factor dispersion diagram allowed us to select the most significant of them based on influence on the selected optimization parameter, the white flour color obtained from the treated grain. As a result of the evaluation of experimental data of the conducted studies, the design and mode parameters of the developed machine were determined, corresponding to the areas of the optimal optimization parameter: shaft rotation speed is 1400 rpm, angle of inclination of stamping on the sieve drum is 15 degrees, the initial moisture content of the processed grain is 15.50%, and the machine productivity does not exceed 700 kg/h.

Keywords: peeling, whiteness, humidity, drying, hydrothermal treatment, experiment planning, dispersion diagram

For citation: Anisimov A.V., Rudik F.Ya. The Experimental Determination of Optimum Parameters of the Equipment for Processing Grain in Preparation for Grinding. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):594-613. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.594-613>

Введение

В условиях рыночной экономики главной задачей предприятий по переработке зерна является выпуск больших объемов высококачественной продукции. Большие объемы продукции обеспечивают экономическую эффективность производства, а высокое качество повышает конкурентоспособность продукции на рынке.

Получать большие объемы качественной продукции возможно только при использовании новых технологий и современного эффективного оборудования. Контроль качества переработки зерна (в муку, крупу, комбикорма) включает объективную оценку эффективности как всего технологического процесса, так и отдельных технологических операций.

Современная технология переработки зерна уделяет особое внимание качественной и эффективной подготовке зерна к помолу. На малых предприятиях с сокращенным технологическим процессом это практически единственный способ, позволяющий повысить выход и качество получаемой продукции. Без правильной и многоступенчатой подготовки зерна к помолу на малых предприятиях невозможно достичь качества и количества продукции, выпускаемой промышленными мельницами [1; 2].

Немногочисленные отечественные изготовители оборудования для мельниц малой производительности не придают существенного значения подготовке зерна к переработке, что сказывается на качественном составе оборудования. В составе таких поточно-технологических линий машины для очистки от

примесей, гидротермической обработки и очистки поверхности зерна присутствуют в минимальном количестве, а их уровень не дотягивает до современных промышленных образцов¹. Оборудование зарубежных производителей, за исключением стран бывшего СССР, недоступно по причине высокой стоимости.

Обзор литературы

На промышленных мукомольных заводах Российской Федерации очистка поверхности зерна от загрязнений осуществляется в основном в обочных и щеточных машинах (типа РЗ-БМО или А1-БЦМ). В результате такой обработки существенно увеличивается содержание битого зерна. Так ежегодно в России недоиспользуется потенциал огромного количества продовольственного зерна, что требует разработки новых технологий и технических средств по подготовке зерна к помолу.

Шелушение зерна является одним из самых эффективных способов очистки поверхности от загрязнений и удаления наружных оболочек² [3–6]. Удаление внешних оболочек позволяет на сокращенных схемах помола повысить выход муки высшего сорта. Также в процессе шелушения с поверхности зерна удаляются не только грязь, пыль и волоски, но и часть плодовых и семенных оболочек. Это, с одной стороны, снижает продолжительность процесса увлажнения зерна, но с другой, из-за травмирования и дробления зерна, может привести к снижению качества получаемой муки, чему не уделяется достаточно внимания. На целесообразность удаления анатомических частей зерновки перед помолом ука-

¹ Бузверов С. Ю., Тарасов С. А. К вопросу интенсификации подготовки зерна к помолу различными способами // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сборник статей: в 3 книгах. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2017. С. 24–27.

² Галимзянов Д. А. Интенсификация подготовки зерна для мельниц малой производительности: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 146 с.

звали К. А. Зворыкин, С. К. Нотович и П. А. Козьмин и другие ученые³ [7; 8].

Исследования по шелушению увлажненного и сухого зерна в обочной машине показали, что шелушение предварительно увлажненного зерна несколько эффективнее сухого: мука становится светлее.

Было отмечено, что чрезмерное переувлажнение зерна перед шелушением имеет отрицательные стороны: отходы шелушения получаются влажными, возникает необходимость в их просушивании, к тому же мука имеет высокую влажность, а рабочая поверхность обочной машины быстро зашлифовывается⁴ [9; 10].

Многочисленные исследования в области совершенствования машин для обработки поверхности зерна указывают на то, что в мукомольном производстве наиболее распространенными являются машины с абразивными рабочими органами, работающие по принципу «сжатия и трения» вертикальной или горизонтальной компоновки и имеющие резерв повышения эффективности обработки зерна [11–14].

Исследуя зарубежный мукомольный опыт, можно отметить, что ведущие европейские компании в данной отрасли: Bühler (Швейцария), Prokor (Чехия), Golfetto (Италия) и другие – при разработке современных технологий сортового помола пшеницы пред-

усматривают процесс предварительного шелушения зерна как наиболее эффективную операцию подготовки зерна к помолу, позволяющую удалить внешнюю оболочку зерна вместе с загрязнениями и повысить качество муки⁵ [14].

Материалы и методы

С учетом вышеизложенного в ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ» совместно с ООО МИП «Здоровое питание» (в рамках договора с ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» № 180ГС1/6784 от 25.12.2014, программа «СТАРТ») была разработана экспериментальная шелушильно-сушильная установка для обработки зерна пшеницы (рис. 1)⁶. Шелушение протекает по принципу трения зерна о неподвижный ситовый цилиндр и подвижные абразивные круги [15; 16]. Для машины была разработана автоматизированная система управления (АСУ) на основе приборов фирмы OWEN [17].

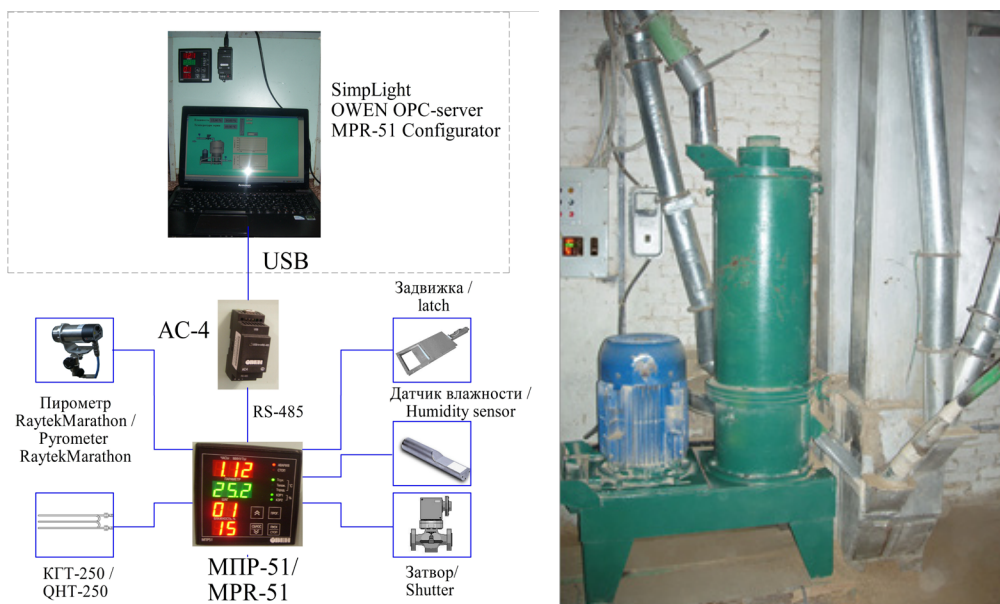
При оптимизации процесса обработки зерна в шелушильно-сушильной машине необходимым условием становится построение его математической модели [18]. Из-за сложности процесса обработки зерна и изменения свойств его составных частей решение задачи по оптимизации теоретическим путем не представляется возможным, так как на практике сложно учесть изменяю-

³ Анисимов А. В. Шелушение зерна пшеницы как метод подготовки к помолу // Наука вчера, сегодня, завтра: Сборник статей студентов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей. Уфа: ООО «ОМЕГА САЙНС», 2014. С. 41–42; Анисимова Л. В., Выборнов А. А. Влияние гидротермической обработки зерна ячменя на эффективность его шелушения и качество получаемой ячменной муки // Современные проблемы техники и технологии пищевых производств: Сборник статей и докладов пятой всероссийской научно-практической конференции «Исследования и достижения в области теоретической и прикладной химии. Экология. Продукты питания». Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, 2011. С. 15–21.

⁴ Хозяев И. А., Рудой Д. В., Бабаджания А. С., Семенченко А. В. Обзор и анализ способов шелушения овса // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: Сборник статей 9-й международной научно-практической конференции в рамках 19-й международной агропромышленной выставки «Интерагромаш-2016». Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2016. С. 137–140.

⁵ Разработка и создание экспериментального образца энергосберегающего оборудования для подготовки зерна к помолу: / А. В. Анисимов [и др.]. Отчет о НИОКР, рег. № НИОКР 115082610022, 14.12.2015. 65 с; Каталог продуктов фирмы BÜHLER [Электронный ресурс]. URL: https://former.buhlergroup.com/europe/ru/10.htm#_WnA2bdSWSM8 (дата обращения: 01.10.2019).

⁶ Там же.



Р и с. 1. Шелушильно-сушильная машина с автоматизированной системой управления
F i g. 1. Peeling-drying machine with automatic control system

щиеся во времени аэродинамические и физико-механические свойства материала (зерна и продуктов шелушения), а теоретические зависимости не учитывают избирательный характер протекания процесса обработки зерна и качество получаемого продукта, что является главенствующим фактором при переработке зерна в муку. Поэтому определение оптимальных условий протекания процесса обработки зерна в шелушильно-сушильной машине, то есть оптимального сочетания факторов, возможно только экспериментальным методом. Одним из эффективных методов является экстремальное планирование эксперимента⁷.

Отбор факторов, наиболее значимых и существенных по степени их влияния на параметр оптимизации, осуществлялся методом случайно-

го баланса, который включает в себя построение матрицы планирования, проведение опытов, обработку полученных результатов и принятие решения относительно отбрасывания мало-значимых факторов, а также перехода к следующему этапу исследования⁸.

Согласно построенной матрице проводятся опыты и по их результатам строятся диаграммы рассеяния – графики, по оси X которых отмечаются все факторы с их уровнями (+ и –), а по оси Y – значения параметра оптимизации, полученные в результате опыта. Эффект факторов оценивается на графике методом выделяющихся точек либо по разности медиан⁹.

Эффекты факторов x_{ip} , отобранных по вышеописанной методике, оцениваются при помощи таблиц с несколькими входами (количество входов со-

⁷ Радченко Г. Е. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий протекания процесса. Горки: Белорусская СХА, 1978. 69 с.

⁸ Анисимов А. В. Повышение эффективности процесса загрузки транспортных средств комбинированными кормами путем обоснования конструктивно-режимных параметров загрузочного распределяющего устройства: дис. ... канд. тех. наук. Саратов, 2006. 165 с.

⁹ Там же.

ответствует количеству оцениваемых факторов) и определяются по формуле:

$$x_i = \frac{Y_1 + Y_3 + \dots + Y_n}{k_i} - \frac{Y_2 + Y_4 + \dots + Y_{n+1}}{k_i}, \quad (1)$$

где Y_1, Y_3, \dots, Y_n – вычисленные средние значения параметра оптимизации (верхний уровень фактора); Y_2, Y_4, \dots, Y_{n+1} – вычисленные средние значения параметра оптимизации (нижний уровень фактора); k_i – количество средних значений параметра оптимизации Y_n .

Эффекты факторов значимы, если расчетный критерий Стьюдента (t -критерий) (2) больше табличного значения:

$$t_{x_i} = \frac{(Y_1 + Y_3 + \dots + Y_n) - (Y_2 + Y_4 + \dots + Y_{n+1})}{\sqrt{\sum \frac{S_R^2}{n_i}}}, \quad (2)$$

где S_R – среднеквадратическая ошибка, описывающая рассеяние полученных экспериментальных значений относительно средних в строках таблицы с несколькими входами¹⁰:

$$S_R = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n_i - 1} - \frac{(\sum y_i)^2}{n_i(n_i - 1)}}, \quad (3)$$

где n_i – количество опытов (значений y_i) в i -ой клетке таблицы с несколькими входами.

Теоретическое (табличное) значение критерия Стьюдента (t -критерия) выбирается из таблицы Z ¹¹ (согласно выбранному уровню значимости) в зависимости от числа степеней свободы f , вычисленного по формуле:

$$f = \sum n_i - k, \quad (4)$$

где k – число строчек вспомогательной таблицы.

Если вычисленное значение t -критерия больше табличного, то влияние фактора считается значимым с заданным уровнем достоверности. После определения факторов с наибольшими эффектами необходимо откорректировать результаты отсеивающих экспериментов (прибавляя к ним эффекты отобранных сильных факторов с обратным знаком), а затем вновь составляют график рассеивания. Данная операция позволяет выделить эффекты других факторов, а также их взаимодействий. В числе значимых факторов следует оставить и те из них, значимость которых достоверна не менее чем с 90-процентной вероятностью. Завершением служит принятие решений относительно перехода к следующему этапу исследования¹².

В соответствии с общей постановкой задачи и цели исследования после отсеивания факторов необходимо определить оптимальные условия протекания процесса обработки зерна. Определение оптимальных параметров осуществляется следующим образом: построение и реализация матрицы планирования, проведение анализа полученных данных; выполнение шагов по поверхности отклика, причем повторяются они до тех пор, пока не удастся достичь оптимального значения параметра оптимизации. Метод Бокса – Уилсона, предусматривающий описание поверхности отклика уравнением первой степени, является одним из распространенных при определении оптимальных условий какого-либо процесса:

¹⁰ Там же.

¹¹ Радченко Г. Е. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий протекания процесса.

¹² Там же.

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots, \quad (5)$$

где b_0 – коэффициент при нулевом члене; x_0 – фиктивная переменная; b_1 – коэффициенты факторов.

После построения матрицы и проведения экспериментов рассчитываются коэффициенты регрессии уравнения (5), моделирующего исследуемый процесс¹³:

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{\sum_1^N y_u}{N}, \\ b_1 &= \frac{\sum_1^N x_{iu} \cdot y_u}{N}, \\ b_{ij} &= \frac{\sum_1^N x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y_u}{N}, \end{aligned} \quad (6)$$

где \bar{y}_u – среднее значение параметра оптимизации в u -ом опыте; N – количество опытов в матрице эксперимента; x_{iu}, x_{ju} – кодированное значение отобранных управляемых факторов в u -ом опыте.

Адекватность полученного уравнения регрессии (математической модели) линейной, оценивается критерием Фишера (F -критерий)¹⁴:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}, \quad (7)$$

где S_{ad}^2 – дисперсия адекватности (8); S_y^2 – дисперсия ошибки эксперимента (9).

$$\begin{aligned} S_{ad}^2 &= \frac{\sum_1^N (\bar{y}_u - y_u)^2}{N - n - 1}, \\ S_{ad}^2 &= \frac{\sum_1^N y_u^2 - N \sum_0^n b_i^2}{N - n - 1}, \end{aligned} \quad (8)$$

где \bar{y}_u – значение параметра оптимизации, вычисленное по полученному уравнению регрессии; n – число выбранных управляемых факторов, $n = 0, 1, 2, \dots$

$$S_y^2 = \frac{\sum_1^N \sum_1^k (y_{iu} - \bar{y}_u)^2}{N(k-1)}, \quad (9)$$

где y_{iu} – значение параметра оптимизации в повторностях (параллельных экспериментах); k – число параллельных экспериментов.

Полученная математическая модель (описываемая уравнением регрессии) признается адекватной линейной в случае, когда расчетный F -критерий меньше табличного ($F_p \leq F_{табл}$), с учетом числа степеней свободы (числитель и знаменатель):

$$\begin{aligned} f_1 &= N - n - 1, \\ f_2 &= N \cdot (k - 1). \end{aligned} \quad (10)$$

Гипотеза адекватности проверяется по другому критерию. В линейной модели свободный член b_0 окazyвается смешанным с суммой коэффициентов при квадратичных членах β_{ii} , то есть $b_0 \rightarrow \beta_0 + \sum \beta_{ii}$, в силу того, что знаки при x_0 в матрице планирования совпадают со знаками при квадратичных членах x_i^2 . Поэтому если модель линейная, то $\sum \beta_{ii} = 0$.

Для этого составляется (а затем реализуется) план экспериментов в центре и по среднему значению параметра оптимизации определяется разность $b_0 - y_0$, которая является характеристикой кривизны поверхности отклика, то есть оценкой $\sum \beta_{ii}$.

Если определенная ошибка эксперимента больше значения $b_0 - \bar{y}_0$ (прове-

¹³ Там же.

¹⁴ Радченко Г. Е. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий протекания процесса.

ряется по критерию Стьюдента), то гипотеза адекватности принимается¹⁵:

$$t_p = \frac{(b_0 - y_0) \cdot \sqrt{N}}{\sqrt{S_y^2}}. \quad (11)$$

Если табличное значение t -критерия с числом степеней свободы $f = N \cdot (k - 1)$ больше расчетного ($t_{\text{табл.}} > t_p$), то разность $b_0 - y_0$ недостоверна и нуль-гипотезу можно принять (полученная модель адекватна линейной).

Критерием проверки адекватности полученной модели линейной является также проверка значимости коэффициентов регрессии b_i и b_j .

Определенные коэффициенты регрессии уравнения (5) считаются значимыми, если их значения (по модулю) больше величины доверительных интервалов Δb_p , вычисленных по формуле¹⁶:

$$\pm \Delta = b_i - \beta_i = \pm t \cdot S_{b_i}, \quad (12)$$

где t – табличное значение t -критерия со степенью свободы:

$$f = N \cdot (n_0 - 1), \quad (13)$$

где n_0 – число опытов в центре эксперимента; S_{b_i} – квадратичная ошибка коэффициента, определяемая по формуле:

$$S_{b_i} = \frac{S_y}{\sqrt{N}}. \quad (14)$$

Если модель неадекватна линейной, то область оптимума необходимо описывать уравнением второго порядка:

$$y = b_0 + \sum_1^n b_i \cdot x_i + \sum_{i \leq j}^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_1^n b_{ii} \cdot x_i^2, \quad (15)$$

где b_{ij} – коэффициенты при парных взаимодействиях факторов.

С учетом коэффициента регрессии выбирается фактор с самым большим влиянием на параметр оптимизации, для которого вычисляется, так называемый, «единичный шаг», в соответствии с которым вычисляются значения шагов остальных факторов:

$$V_i = V_m \cdot \frac{b_i \cdot \varepsilon_i}{b_m \cdot \varepsilon_m}, \quad (16)$$

где V_i – значение шага i -го фактора; V_m – единичный шаг наиболее сильнодействующего фактора; b_i , b_m – соответственно коэффициенты регрессии i -го и наиболее сильнодействующего факторов; ε_i , ε_m – соответственно интервалы варьирования i -го и наиболее сильнодействующего факторов.

Серии экспериментов проводят, прибавляя определенные шаги факторов к их основному уровню, до того момента, когда значение параметра оптимизации перестанет увеличиваться или уменьшаться (при определении максимального или минимального значения, причем при поиске последнего знаки перед значением шагов меняются на обратные). По результатам серии экспериментов строят поверхности отклика, по которым определяют зону оптимума. Правильность статистического анализа проверялась с помощью программы Statistica 10.1.

Белизна муки определялась по ГОСТу 26361-2013 «Мука. Метод определения белизны»¹⁷ с помощью фотоэлектрического прибора СКИБ-Л [19]. Влажность зерна в потоке определялась с помощью разработанной для машины АСУ. Контроль влажности проводился по ГОСТу 13586.5-2015¹⁸ с использованием сушильного шкафа СЭШ-3М. Количес-

¹⁵ Анисимов А. В. Повышение эффективности процесса загрузки транспортных средств.

¹⁶ Там же.

¹⁷ ГОСТ 26361-2013. Мука. Метод определения белизны.

¹⁸ ГОСТ 13586.5-2015. Зерно. Метод определения влажности.

во битых зерен – по ГОСТу 30483-97¹⁹, натура зерна – по ГОСТу 10840-2017²⁰.

Производительность машины изменялась шиберной заслонкой на выходе из машины. Частота вращения вала задавалась сменой шкивов ременной передачи. Изготовлено 3 ситовых барабана с высштамповками под 15, 20 и 25 градусов.

Результаты исследования

Предварительное изучение процесса обработки зерна в шелушильной машине²¹ позволило выделить десять факторов, влияющих на эффективность процесса шелушения. В качестве параметра оптимизации выбрано значение белизны муки, получаемой из обрабатываемого зерна (табл. 1).

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Факторы, влияющие на эффективность шелушения зерна (белизну получаемой из него муки), их условные обозначения и намеченные уровни варьирования
The factors influencing effectiveness of grain peeling (the whiteness of the flour), their legends and the planned variation levels

| Обозначение фактора / Factor designation | Наименование фактора / Factor name | Размерность / Dimension | Уровни варьирования / Variation levels | |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------|-------------------------|
| | | | Нижний (-) / Lower(-) | Верхний (+) / Top (+) |
| x_1 | Частота вращения вала / Shaft speed | об/мин / rpm | 1100 | 1600 |
| x_2 | Равномерность подачи материала / Uniformity of material supply | % | неравномерная / irregular | равномерная / regular |
| x_3 | Исходная влажность материала / Initial grain moisture | % | 12,5 | 17,5 |
| x_4 | Равномерность материала по влажности / Uniform of material on humidity | – | неравномерная / irregular | равномерная / regular |
| x_5 | Подсушивание («–» при «выключено»; «+» при «включено») / Dehumidification (“–” at it is switched off; “+” at it is included) | – | – | + |
| x_6 | Угол наклона высштамповки на ситовом барабане / Slope angle of a circular helix on a screen drum | градусы / degrees | 15 | 25 |
| x_7 | Зернистость абразивных кругов / Graininess of abrasive disks | мкм / mkm | 500 | 1250 |
| x_8 | Производительность машины / Efficiency of an inventory | кг/ч / kg/h | 500 | 1000 |
| x_9 | Коэффициент трения материала по поверхности ситового барабана / Friction coefficient on the surface of the screen reel | – | уменьшенный / reduced | увеличенный / increased |
| x_{10} | Размер зерновок (натура) / Size of grain (nature) | г/л / g/l | 730 | 780 |

¹⁹ ГОСТ 30483-97. Зерно. Методы определения общего и фракционного содержания сорной и зерновой примесей; содержания мелких зерен и крупности; содержания зерен пшеницы, поврежденных клопом-черепашкой; содержания металломагнитной примеси.

²⁰ ГОСТ 10840-2017. Зерно. Метод определения натуре.

²¹ Разработка и создание экспериментального образца энергосберегающего оборудования...

Отбор факторов, наиболее значимых и существенных по степени их влияния на параметр оптимизации, осуществлялся методом случайного баланса, который включает в себя: составление матрицы планирования, проведение экспериментов (согласно матрице), выделение наиболее значимых факторов (статистическая обработка результатов экспериментов), принятие решения о переходе на следующий этап экстремального планирования.

Согласно выбранному методу «случайного баланса» при составлении матрицы отсеивающих экспериментов факторы, влияющие на процесс обработки зерна в шелушильно-сушильной машине (выделенные в результате проведенных предварительных исследований²²), разделили на 2 полуреплики. Первую из них

объединили со случайным расположением значений второй полуреплики и добавили еще 4 строчки (опыты 17–20) с целью определения влияния отобранных факторов на выбранных уровнях.

Опыты проводились на поточно-технологической линии по производству муки ООО «Старый мельник» г. Энгельс на опытной установке. Значения параметра оптимизации, белизну муки, определяли в лаборатории ООО «Старый мельник». В качестве материала использовалось зерно мягкой пшеницы.

Результаты реализации матрицы экспериментов представлены в таблице 2. Столбец \bar{y} – среднее значение (из 4-х опытов) выбранного параметра оптимизации, белизна получаемой из обработанного зерна муки, а столбцы $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3$ – скорректированные значения параметра оптимизации с учетом эф-

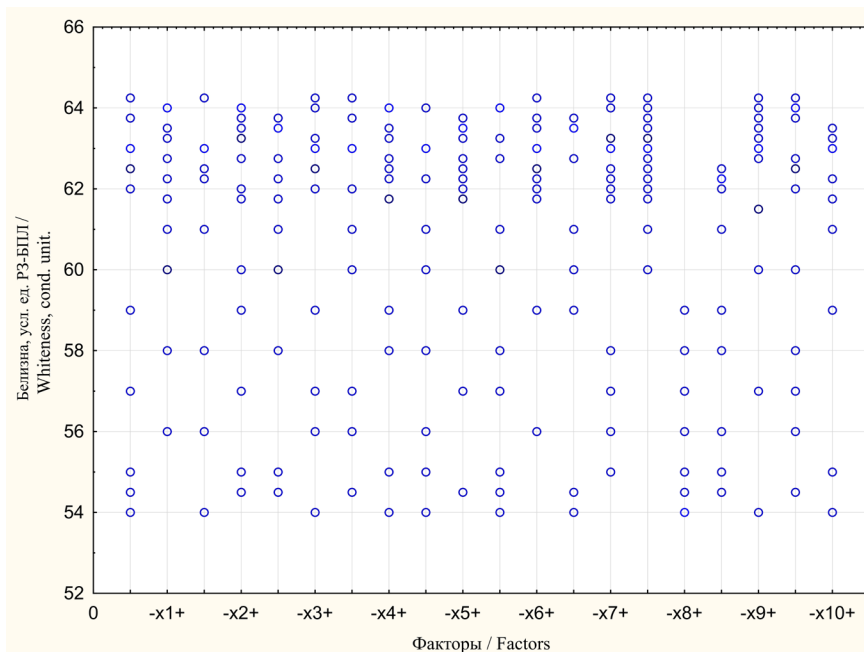
Т а б л и ц а 2

Table 2

Матрица отсеивающих экспериментов**Matrix of the eliminating experiments**

| Номер опыта/ Number experience | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 | x_9 | x_{10} | \bar{y} | \bar{y}_1 | \bar{y}_2 | \bar{y}_3 |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | - | - | + | - | - | + | + | - | + | + | 63,00 | 63,00 | 60,81 | 60,81 |
| 2 | + | + | + | + | - | - | + | - | + | - | 64,00 | 64,00 | 62,06 | 62,49 |
| 3 | + | + | - | + | + | + | - | - | + | + | 63,50 | 63,50 | 59,45 | 58,87 |
| 4 | - | - | + | + | - | - | - | + | + | + | 54,00 | 57,22 | 57,22 | 57,22 |
| 5 | + | - | - | + | - | + | + | - | - | + | 62,25 | 62,25 | 58,16 | 58,16 |
| 6 | - | + | - | + | - | - | + | + | - | + | 55,00 | 58,22 | 58,18 | 58,61 |
| 7 | - | + | + | + | + | + | - | + | - | + | 59,00 | 62,22 | 60,07 | 59,49 |
| 8 | + | - | - | - | - | - | - | - | - | + | 61,00 | 61,00 | 59,10 | 59,10 |
| 9 | + | - | + | - | - | + | + | + | - | - | 56,00 | 59,22 | 55,13 | 55,13 |
| 10 | - | + | + | - | + | - | + | + | + | - | 57,00 | 60,22 | 60,18 | 59,60 |
| 11 | - | + | - | - | + | + | - | - | + | - | 63,75 | 63,75 | 61,60 | 61,02 |
| 12 | + | + | - | + | + | - | - | - | + | - | 62,75 | 62,75 | 60,85 | 60,27 |
| 13 | - | + | + | - | + | + | + | - | - | - | 62,00 | 62,00 | 59,81 | 59,23 |
| 14 | + | - | - | + | - | - | + | + | - | - | 58,00 | 61,22 | 59,28 | 59,28 |
| 15 | - | - | + | - | + | + | + | - | + | - | 64,25 | 64,25 | 62,06 | 61,05 |
| 16 | - | + | - | - | + | - | - | + | - | - | 54,50 | 57,72 | 57,72 | 57,14 |
| 17 | + | + | + | + | + | - | + | - | + | + | 63,25 | 63,25 | 61,31 | 60,73 |
| 18 | + | + | - | + | + | + | + | - | + | + | 61,75 | 61,75 | 57,66 | 57,08 |
| 19 | - | - | + | + | + | + | + | - | - | - | 62,50 | 62,50 | 60,31 | 59,30 |
| 20 | + | + | - | - | - | - | - | - | + | - | 60,00 | 60,00 | 58,10 | 58,53 |

²² Там же.



Р и с. 2. Диаграмма рассеивания управляемых факторов
 F i g. 2. Dispersion diagram of controlled factors

Т а б л и ц а 3
 T a b l e 3

Вспомогательная таблица с двумя входами для определения эффектов факторов x_8 и x_9
 Auxiliary table with two inputs for effect detection factors x_8 and x_9

| Оцениваемые факторы / Estimated factors | $+x_9$ | $-x_9$ |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| $+x_8$ | 54 57 $\sum y_1 = 111$ $y_1 = 55,5$ | 55 59 56 58 54,5 $\sum y_2 = 282,5$ $y_2 = 56,5$ |
| $-x_8$ | 63 64 63,5 63,75 62,75 64,25 63,25 61,75 60 $\sum y_3 = 566,25$ $y_3 = 62,92$ | 62,25 61 62 62,5 $\sum y_4 = 247,75$ $y_4 = 61,94$ |
| Эффекты факторов, формула (1) / Effects of factors, formula (1): | | |
| $x_9 = \frac{55,5 + 62,92}{2} - \frac{56,5 + 61,94}{2} = -0,01$ $x_8 = \frac{55,5 + 56,5}{2} - \frac{62,92 + 61,94}{2} = -3,22$ | | |

фактов сильных факторов, в соответствии с которыми (столбец \bar{y}) построили диаграмму рассеивания (рис. 2), анализ которой методом выделяющихся точек позволил выделить два самых сильных фактора: x_8 (производительность машины) и x_9 (коэффициент трения материала по поверхности ситового барабана). Результаты количественной оценки выделенных факторов представлены в таблице 3.

Результаты определения значимости эффектов выбранных управляемых факторов x_8 и x_9 представлены в таблице 4.

Анализ значений t -критериев показывает, что фактор x_8 , производительность машины, значим с 95-процентной вероятностью, в то же время фактор x_9 , коэффициент трения материала по поверхности ситового барабана, незначим даже с вероятностью 90 %.

Откорректированные значения результатов опытов с учетом эффекта значимого фактора x_8 представлены в таблице 2 (столбец \bar{y}_1). График рассеивания, построенный по этим данным (не приводится), позволил выделить три фактора: x_1 , x_6 , x_7 (частота вращения вала, угол наклона выштамповки на ситовом барабане, зернистость абразивных кругов).

Результаты количественной оценки выделенных управляемых факторов представлены в таблице 5.

Результаты расчетов значимости эффектов выбранных управляемых факторов x_8 и x_9 представлены в таблице 6.

Анализ значений t -критериев показывает, что выбранные факторы x_1 , x_6 значимы с 95-процентной вероятностью, а фактор x_7 незначим (значимость ниже 90 %).

Откорректированные значения результатов опытов с учетом эффектов выделенных факторов представлены в таблице 2 (столбец \bar{y}_2).

Эффекты остальных факторов, определили аналогично:

$$x_2 = -0,43; x_3 = 1,11; x_4 = 0,3; x_5 = 1,01; x_{10} = -0,46.$$

Значения t -критерия для этих факторов равны соответственно:

$$t_{x_2} = -0,49; t_{x_3} = 1,94; t_{x_4} = 0,54; t_{x_5} = 1,31; t_{x_{10}} = 0,82.$$

И все они, кроме фактора x_3 (90-процентная вероятность значимости), незначимы.

Степень влияния рассчитанных эффектов управляемых факторов отображена на диаграмме эффектов (рис. 3).

Согласно диаграмме эффектов факторов (рис. 3) самыми «сильными» по степени влияния на параметр оптими-

Таблица 4

Table 4

Вспомогательная таблица для оценки значимости эффектов выбранных управляемых факторов x_8 и x_9

Auxiliary table to assess the significance of the effects of the selected controlled factors x_8 and x_9

| № клетки / No. of cage | $\sum y_i$ | $(\sum y_i)^2$ | $\sum y_i^2$ | n_i | S_R^2 | S_R^2 / n_i |
|---------------------------|------------|----------------|--------------|-------|---------|---------------|
| 1 | 111,00 | 12321,00 | 6165,00 | 2 | 4,50 | 2,250 |
| 2 | 282,50 | 79806,25 | 15976,25 | 5 | 3,75 | 0,750 |
| 3 | 566,25 | 320639,06 | 35640,31 | 9 | 1,72 | 0,190 |
| 4 | 247,75 | 61380,06 | 15346,56 | 4 | 0,50 | 0,125 |

Значения t -критерия по формуле (2) / Values of t -criterion on a formula (2): $t_{x_8} = -7,1$, $t_{x_9} = 0,15$.
 Табличные значения t -критерия ($f = 16$) / Table values of t -criterion ($f = 16$)²³:
 уровень значимости 5 % / significance value 5%: $t_{0,05} = 2,120$
 уровень значимости 10 % / significance value 10%: $t_{0,10} = 1,746$

²³ Радченко Г. Е. Планирование эксперимента...

Т а б л и ц а 5
T a b l e 5

Вспомогательная таблица с тремя входами для определения эффектов факторов x_1, x_6, x_7
Auxiliary table with three inputs for effect detection factors x_1, x_6, x_7

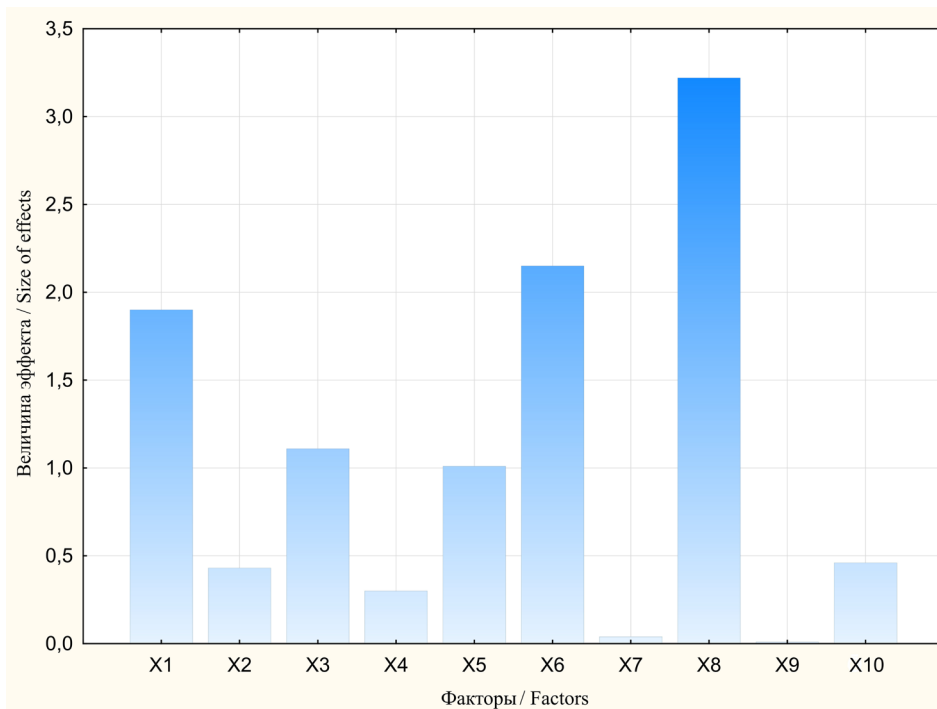
| Оцениваемые факторы/ Estimated factors | + x_1 | | - x_1 | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | + x_6 | - x_6 | + x_6 | - x_6 |
| + x_7 | 62,25 | 64,00 | 63,00 | |
| | 59,22 | 61,22 | 62,00 | 58,22 |
| | 61,75 | 63,25 | 64,25 | 60,22 |
| | $\sum y_1=183,22$ $y_1=61,07$ | $\sum y_2=188,47$ $y_2=62,82$ | $\sum y_3=251,75$ $y_3=62,94$ | $\sum y_4=118,44$ $y_4=59,22$ |
| - x_7 | 63,5 | 61,00 | 62,22 | 57,22 |
| | $\sum y_5=63,5$ | 62,75 | 63,75 | 57,72 |
| | $y_5=63,5$ | 62,00 | $\sum y_7=125,97$ | $\sum y_8=114,94$ |
| | | $\sum y_6=185,75$ $y_6=61,92$ | $y_7=62,99$ | $y_8=57,47$ |
| Эффекты факторов, формула (1) / Effects of factors, formula (1): | | | | |
| $x_1 = \frac{61,07 + 62,82 + 63,5 + 61,92}{4} - \frac{62,94 + 59,22 + 62,99 + 57,47}{4} = 1,9$ | | | | |
| $x_6 = \frac{61,07 + 63,5 + 62,94 + 62,99}{4} - \frac{62,82 + 61,92 + 59,22 + 57,47}{4} = 2,15$ | | | | |
| $x_7 = \frac{61,07 + 62,82 + 62,94 + 59,22}{4} - \frac{63,5 + 61,92 + 62,99 + 57,47}{4} = 0,04$ | | | | |

Т а б л и ц а 6
T a b l e 6

Вспомогательная таблица для оценки значимости эффектов выбранных управляемых факторов x_1, x_6, x_7
Auxiliary table to assess the significance of the effects of the selected controlled factors x_1, x_6, x_7

| № | $\sum y_i$ | $(\sum y_i)^2$ | $\sum y_i^2$ | n_i | S_R^2 | S_R^2 / n_i |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------|--------------|-------|---------|---------------|
| 1 | 183,22 | 33569,57 | 11195,12 | 3 | 2,63 | 0,88 |
| 2 | 188,47 | 35520,94 | 11844,45 | 3 | 2,07 | 0,69 |
| 3 | 251,75 | 63378,06 | 15847,31 | 4 | 0,93 | 0,23 |
| 4 | 118,44 | 14028,03 | 7016,02 | 2 | 2,00 | 1,00 |
| 5 | 63,50 | 4032,25 | 4032,25 | 1 | 0 | 0 |
| 6 | 185,75 | 34503,06 | 11502,56 | 3 | 0,77 | 0,26 |
| 7 | 125,97 | 15868,44 | 7935,39 | 2 | 1,17 | 0,59 |
| 8 | 114,94 | 13211,20 | 6605,73 | 2 | 0,13 | 0,07 |
| Значения t -критерия по формуле (2) / Values of t -criterion on a formula (2): $t_{x_1} = 4,0$; $t_{x_6} = 4,47$; $t_{x_7} = 0,09$ | | | | | | |
| Табличные значения t -критерия ($f = 12$) / Table values of t -criterion ($f = 16$) ²⁴ : уровень значимости 5 % / significance value 5%: $t_{0,05} = 2,179$ уровень значимости 10 % / significance value 10%: $t_{0,10} = 1,782$ | | | | | | |

²⁴ Там же.



Р и с. 3. Диаграмма эффектов факторов

F i g. 3. Factor effects diagram

зации являются факторы: x_1 – частота вращения вала, x_3 – исходная влажность материала, x_6 – угол наклона высшtamповки на ситовом барабане, x_8 – производительность машины.

Была составлена матрица планирования опытов (полуреплика полного факторного эксперимента 2^4) (табл. 7). После проведения опытов (согласно матрице), определили коэффициенты регрессии. Результаты представлены в таблице 7.

По методу Бокса – Уилсона составлено уравнение регрессии (5), являющееся математической моделью технологического процесса обработки зерна пшеницы в шелушильно-сушильной машине, описывающее зависимость белизны муки (В) (среднее значение из пяти повторностей) y_1 от частоты вращения вала $n(x_1)$, исходной влажности материала $W(x_3)$, угла наклона выс-

штамповки на ситовом барабане $\alpha(x_6)$, и производительности машины $Q(x_8)$:

$$y_1 = 58,45 + 1,2 \cdot x_1 + 0,1 \cdot x_3 - 0,6 \cdot x_6 - 3,5 \cdot x_8. \quad (17)$$

Критерий Фишера для y_1 , вычисленный по формуле (7) (вспомогательные данные представлены в таблице 8), составил $F_{p,y1} = 3,49$. Теоретическое (табличное) значения F -критерия для 1-процентного уровня значимости 0,01, $F_{т,y1} = 4,5^{25}$. Так как $F_{p,y1} < F_{т,y1}$, можно сделать вывод, что гипотеза об адекватности полученной модели принимается, то есть полученная модель адекватна линейному приближению. Данное утверждение достоверно с 99-процентной доверительной вероятностью.

²⁵ Там же.

Матрица экстремального планирования эксперимента (параметр оптимизации – белизна муки из обработанного зерна)

Matrix of extreme scheduling of an experiment (optimization parameter – a whiteness of flour from the processed grain)

| Обозначения / Designations | Частота вращения вала, об/мин / Shaft speed, rpm | Исходная влажность материала, % / Initial grain moisture, % | Угол наклона выштамповки на ситовом барабане, градусы / Slope angle of a circular helix on a screen drum, degrees | Производительность машины, кг/ч, / Machine productivity, kg/h | Белизна, усл. ед. РЗ-БПД / Whiteness, cond. unit |
|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| | x_1 | x_3 | x_6 | x_8 | y_1 |
| Верхний уровень (+) / Top level (+) | 1600,00 | 17,500 | 25,00 | 1000,00 | |
| Основной уровень (0) / Ground level (0) | 1350,00 | 15,000 | 20,00 | 750,00 | |
| Нижний уровень (-) / Lower layer (-) | 1100,00 | 12,500 | 15,00 | 500,00 | |
| Опыты / Experiences | | | | | |
| 1 | – | + | + | + | 54,0 |
| 2 | + | – | + | + | 55,2 |
| 3 | + | + | – | + | 56,4 |
| 4 | – | – | – | + | 54,2 |
| 5 | + | + | + | – | 62,6 |
| 6 | – | – | + | – | 59,6 |
| 7 | – | + | – | – | 61,2 |
| 8 | + | – | – | – | 64,4 |
| Коэффициент регрессии, b_i / Regression coefficient, b_i | 1,20 | 0,100 | –0,60 | –3,50 | |
| Интервал варьирования факторов / Interval of variation of factors | 250,00 | 2,500 | 5,00 | 250,00 | |
| Шаг, соответствующий изменению x_8 на 50 / Step corresponding to change x_8 on 50 | 17,14 | 0,015 | –0,17 | –50,00 | |
| Округленный шаг / Rounded step | 50,00 | 0,500 | –5,00 | –50,00 | |
| Опыты по программе крутого восхождения / Experiments on the program of steep ascension | | | | | |
| 9 | 1350,00 | 15,000 | 20,00 | 750,00 | 62,4 |
| 10 | 1400,00 | 15,500 | 15,00 | 700,00 | 64,2 |
| 11 | 1450,00 | 16,000 | 15,00 | 650,00 | 64,3 |
| 12 | 1450,00 | 16,500 | 15,00 | 600,00 | 64,6 |

Вспомогательная таблица для определения F -критерия
Auxiliary table for determination of F -criterion

| Номер опыта / Number of experience | y_1' | y_1'' | y_1''' | y_1'''' | y_1''''' | y_1 | $\sum_1^k (y_i - y_1)^2$ | y_1 | $(y_1 - \bar{y}_1)^2$ |
|------------------------------------------|--------|---------|----------|-----------|------------|-------|--------------------------|-------|-----------------------|
| 1 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54,0 | 0 | 53,25 | 0,56 |
| 2 | 55 | 56 | 55 | 55 | 55 | 55,2 | 0,8 | 55,45 | 0,06 |
| 3 | 56 | 57 | 56 | 56 | 57 | 56,4 | 1,2 | 56,85 | 0,20 |
| 4 | 55 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54,2 | 0,8 | 54,25 | 0,01 |
| 5 | 62 | 63 | 63 | 62 | 62 | 62,6 | 1,6 | 62,65 | 0,01 |
| 6 | 60 | 59 | 59 | 60 | 60 | 59,6 | 1,2 | 60,05 | 0,20 |
| 7 | 62 | 61 | 61 | 61 | 61 | 61,2 | 0,8 | 61,45 | 0,06 |
| 8 | 64 | 65 | 64 | 64 | 65 | 64,4 | 1,2 | 63,65 | 0,56 |

Гипотезу адекватности (характеристику кривизны поверхности отклика) проверяем по равенству 0 коэффициентов при свободных членах $\sum \beta_{ii} = 0$. По формуле (11):

$$t_p = 0,31 < t_T = 2,042. \quad (18)$$

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что разность $b_0 - \bar{y}_0$ недостоверна для полученного уравнения регрессии, следовательно, полученная модель адекватна линейной.

Доверительный интервал для коэффициентов регрессии b_i определили по формуле 12:

$$\pm \Delta = 0,35. \quad (19)$$

С 95-процентной доверительной вероятностью можно утверждать, что все линейные коэффициенты регрессии значимы, что так же подтверждают и данные отсеивающих экспериментов в отношении существенного влияния факторов x_1 , x_3 , x_6 и x_8 на параметр оптимизации.

Результаты статистической оценки проверки адекватности полученной модели линейной позволяют утверждать, что для описания процесса обработки зерна в шелушильно-сушильной машине по параметру оптимизации, белизна

получаемой муки, линейная модель может быть принята.

Результаты крутого восхождения по поверхности отклика

Согласно диаграмме эффектов факторов (рис. 2) самым сильнодействующим фактором является производительность машины – x_8 . Единичные шаги для факторов x_1 , x_3 , x_6 рассчитали в соответствии с выбранным шагом фактора x_8 , $V_m = 100$ по формуле (16).

Для $Y_1 - V_1 = 17,14$; $V_3 = 0,015$; $V_6 = -0,17$.

Полученные расчетные шаги округлили до значений, которые на практике реально задавать и фиксировать (представлены в таблице 7).

После реализации опыта 11 уровни факторов x_1 и x_6 при последующем шаговом движении были зафиксированы, так как их изменение оказалось нецелесообразным, исходя из нормальной работы машины, то при одновременном увеличении числа оборотов вала выше 1450 об/мин и уменьшении угла наклона выштамовки ситового барабана наблюдается резкое повышение потребляемой мощности и растет выход битого зерна.

После реализации 12-го опыта было решено прекратить крутое восхождение по поверхности отклика, так как параметр оптимизации увеличивался незначительно, то есть разность значе-

ний параметра оптимизации в опытах 11 и 12 затемнена ошибкой опыта.

Анализируя таблицу 7 (строки 9–12), можно утверждать, что опыт 10 дал лучшие результаты. Восхождение по поверхности отклика показало, что белизна муки из обрабатываемого зерна может быть повышена до 64,2 усл. ед. РЗ-БПЛ. Это достигается при следующем сочетании факторов: частота вращения вала составляет 1400 об/мин, угол наклона высштаповки на ситовом барабане – 15 градусов, влажность зерна – 15,5%, производительность машины – 700 кг/ч.

В результате шагового движения по поверхности отклика: 1) достигнута область оптимума (почти стационарная область); 2) определено оптимальное сочетание факторов, соответствующих максимальной белизне муки, полученной из обработанного зерна.

По данным, полученным в результате реализации матрицы эксперимента, построены трехмерные поверхности отклика (рис. 4).

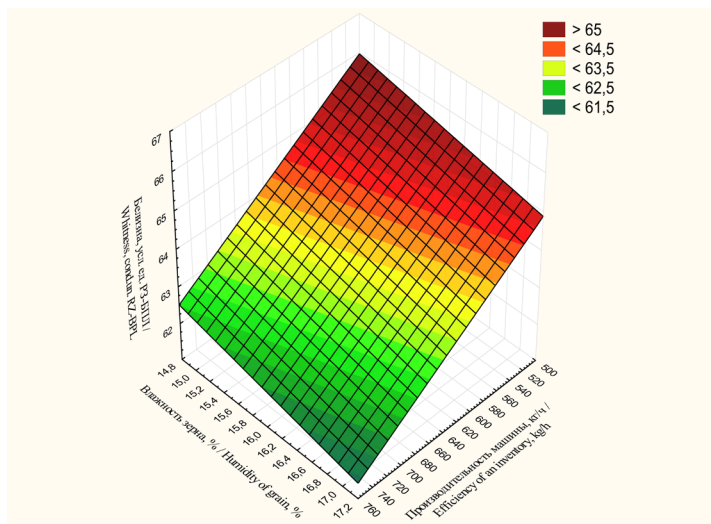
Обсуждение и заключение

В процессе экспериментальных исследований условий протекания процес-

са обработки зерна в шелушильно-сушильной машине, то есть оптимального сочетания факторов, было осуществлено экстремальное планирование эксперимента.

Методом случайного баланса был проведен отбор факторов, наиболее значимых и существенных по степени их влияния на параметр оптимизации (белизна муки из обработанного зерна): x_1 – частота вращения вала, x_3 – исходная влажность материала, x_6 – угол наклона высштаповки на ситовом барабане, x_8 – производительность машины.

Для отыскания области оптимума реализованы: матрица экстремального планирования, статистический анализ полученных результатов и крутое восхождение по поверхности отклика. Полученные данные позволили определить оптимальные конструктивные и режимные параметры разработанной шелушильно-сушильной машины: частота вращения вала – 1400 об/мин, угол наклона высштаповки на ситовом барабане – 15 градусов, производительность машины не выше 700 кг/ч при исходной влажности обрабатываемого зерна – 15,5%.



Р и с. 4. Трехмерное сечение поверхности отклика, характеризующей величину белизны муки из обработанного зерна

Fig. 4. Three-dimensional section of the response surface characterizing the whiteness of processed grain flour

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Анисимов А. В.** Моделирование основных конструктивно-технологических параметров шелушильно-сушильной машины // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. 2014. № 4. С. 40–43. URL: http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/23/2014_4 (дата обращения: 01.10.2019).
2. **Гафин М. М.** Подготовка зерна к помолу с использованием традиционного оборудования // Научный вестник технологического института – филиала ФГБОУ ВПО Ульяновская ГСХА им. П. А. Столыпина. 2014. № 13. С. 51–55.
3. **Кондрокров Р. Х., Панкратов Г. Н.** Роль шелушения зерна в технологии переработки твердой пшеницы // Хлебопродукты. 2013. № 3. С. 44–45. URL: <https://khlebprod.ru/74-texts/%D0%B6%D1%83%D1%80%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%8B-13-%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0/03-13/657-2013-04-01-08-45-51> (дата обращения: 01.10.2019).
4. **Журба О. С., Карамзин А. В., Крикунова Л. Н., Рябова С. М.** Влияние шелушения зерна на параметры процесса его измельчения // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 8. С. 18–23. URL: <http://www.foodprom.ru/journals/khranenie-i-pererabotka-selkhozsyrya/131-khranenie-i-pererabotka-selkhozsyrya-8-2012> (дата обращения: 01.10.2019).
5. Adherence within Biological Multilayered Systems: Development and Application of a Peel Test on Wheat Grain Peripheral Tissues / M. R. Martelli [et al.] // Journal of Cereal Science. 2010. Vol. 52, Issue 1. Pp. 83–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.03.007>
6. Electrostatic Separation of Peeling and Gluten from Finely Ground Wheat Grains / M. Remadnia [et al.] // Particulate Science and Technology. 2014. Vol. 32, Issue 6. Pp. 608–615. DOI: <https://doi.org/10.1080/02726351.2014.943379>
7. **Алимкулов Ж. С., Егоров Г. А., Максимчук Б. М., Щербакова Г. С.** Опыт подготовки зерна пшеницы к помолу с предварительным отделением оболочек // Экспресс-информация. 1979. Т. 1, Вып. 7. С. 22.
8. **Верещинский А.** Подготовка зерна шелушением на мельницах сортовых помолов пшеницы большой производительности // Хлебопродукты. 2010. № 1. С. 32–33.
9. **Анисимов А. В.** Пути повышения эффективности процесса переработки зерна на малых предприятиях // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. 2012. № 8. С. 38–42. URL: http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/146/2012_8 (дата обращения: 01.10.2019).
10. **Беляев В. В., Овчаров Д. Е., Анисимова Л. В., Солтан О. И. А.** Влияние способов увлажнения зерна овса при гидротермической обработке на эффективность его шелушения // Горизонты образования. 2017. № 19. С. 1–4.
11. **Перов А. А.** Способы шелушения зерна // Комбикорма. 2010. № 3. С. 45–46.
12. **Верещинский А. П.** Эффективность шелушильно-шлифовальных машин «Каскад» при подготовке зерна пшеницы в сортовых помоллах // Хлебопродукты. 2012. № 11. С. 40–41.
13. Шелушильно-шлифовальная машина: пат. 2159679 Рос. Федерация. МПК В02В3/02; заявл. 11.06.1999; опубл. 27.11.2000. Бюл. № 33. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2159679> (дата обращения: 01.10.2019).
14. **Анисимов А. В., Рудик Ф. Я., Загородских Б. П.** Совершенствование технологии подготовки зерна к помолу на малых предприятиях // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 4. С. 603–623. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.603-623>
15. Шелушильно-сушильная машина: пат. 2491124 Рос. Федерация. № 2012104970/13; заявл. 13.02.2012; опубл. 27.08.2013. Бюл. № 24. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2491124C1_20130827.pdf (дата обращения: 01.10.2019).
16. **Анисимов А. В.** Экспериментальное моделирование процессов подсушивания зерна в СВЧ-поле при подготовке к помолу // Молочнохозяйственный вестник. 2017. № 2 (26). С. 80–91. DOI: <https://doi.org/10.24411/2225-4269-2017-00009>

17. Анисимов А. В. Усовершенствованная система для автоматического управления температурой и влажностью зерна при подготовке к помолу // Аграрный научный журнал. 2015. № 6. С. 53–56. URL: http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/37/2015_6 (дата обращения: 01.10.2019).
18. Овчинников В. А., Чаткин М. Н., Овчинникова А. В. Оптимизация параметров и режимов работы дискового высевающего аппарата по критерию равномерности высева // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 379–388. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.379-388>
19. Штейнберг Т. С., Леонова Т. А., Шведова О. Г. Определение белизны муки. Новый стандарт // Контроль качества продукции. 2016. № 11. С. 22–25. URL: <http://vniiz.org/science/publication/article-208> (дата обращения: 01.10.2019).

Поступила 06.11.2018; принята к публикации 18.09.2019; опубликована онлайн 31.12.2019

Об авторах:

Анисимов Александр Владимирович, доцент кафедры технологий производства и переработки продукции животноводства ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (410012, Россия, г. Саратов, Театральная пл., д. 1), кандидат технических наук, ResearcherID: E-7817-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5313-6329>, anisimovaleksan@mail.ru

Рудик Феликс Яковлевич, профессор кафедры технологий продуктов питания ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (410012, Россия, г. Саратов, Театральная пл., д. 1), доктор технических наук, ResearcherID: E-8546-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115>, k-pappsgau@rambler.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. В. Анисимов – подготовка начального текста с последующей доработкой, проведение исследований, анализ исследований, визуализация, верстка; Ф. Я. Рудик – научное руководство, анализ и доработка текста.

REFERENCES

1. Anisimov A.V. Modeling of the Main Constructive and Technological Parameters for Peeling and Drying Machine. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova* = The Bulletin of Saratov State Agrarian University in honor of N.I. Vavilov. 2014; (4):40-43. Available at: http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/23/2014_4 (accessed 01.10.2019). (In Russ.)
2. Gafin M.M. Preparation of Grain for Grinding Using Traditional Equipment. *Nauchnyy vestnik tekhnologicheskogo instituta – filiala FGBOU VPO Ulyanovskaya GSHA im. P.A. Stolyipina* = Scientific Bulletin of Technological Institute – Branch of Stolypin Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2014; 13:51-55. (In Russ.)
3. Kondrokov R.Kh., Pankratov G.N. The Role of Grain Peeling in Durum Wheat Processing. *Khleboprodukty* = Bakery Products. 2013; (3):44-45. Available at: <https://khlebprod.ru/74-texts/%D0%B6%D1%83%D1%80%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%8B-13-%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0/03-13/657-2013-04-01-08-45-51> (accessed 01.10.2019). (In Russ.)
4. Zhurba O.S., Karamzin A.V., Krikunova L.N., Ryabova S.M. Influence of a Peeling of Grain on Parameters of Process of Its Crushing. *Khranenie i pererabotka selkhozsyrya* = Storage and Processing of Farm Products. 2012; (8):18-23. Available at: <http://www.foodprom.ru/journals/khranenie-i-pererabotka-selkhozsyrya/131-khranenie-i-pererabotka-selkhozsyrya-8-2012> (accessed 01.10.2019). (In Russ.)
5. Martelli M.R., Barron C., Mabilie F., et al. Adherence within Biological Multilayered Systems: Development and Application of a Peel Test on Wheat Grain Peripheral Tissues. *Journal of Cereal Science*. 2010; 52(1):83-89. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.03.007>
6. Remadnia M., Kachi M., Messal S., et al. Electrostatic Separation of Peeling and Gluten from Finely Ground Wheat Grains. *Particulate Science and Technology*. 2014; 32(6):608-615. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/02726351.2014.943379>

7. Alimkulov Zh.S., Egorov G.A., Maksimchuk B.M., Shcherbakova G.S. Experience of Preparation of Seed of Wheat for a Grinding with Preliminary Office of Envelopes. *Ekspress-informatsiya* = Express Information. 1979; 1(7):22. (In Russ.)
8. Vereshchinsky A. Grain Preparation by Peeling on Mills High-Quality Grindings of Wheat of Big Efficiency. *Khleboprodukty* = Bakery Products. 2010; (1):32-33. (In Russ.)
9. Anisimov A.V. Ways of Improving the Efficiency of Grain Processing at Small-Scale Enterprises. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova* = The Bulletin of Saratov State Agrarian University in honor of N.I. Vavilov. 2012; (8):38-42. Available at: http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/146/2012_8 (accessed 01.10.2019). (In Russ.)
10. Belyaev V.V., Ovcharov D.E., Anisimova L.V., Soltan O.I.A. Influence of Methods of Oat Grain Moistening at Hydrothermal Treatment on Its Peeling Efficiency. *Gorizonty obrazovaniya* = Horizons of Education. 2017; 19:1-4. (In Russ.)
11. Perov A.A. Ways of Peeling Grain. *Kombikorma* = Compound Feeds. 2010; (3):45-46. (In Russ.)
12. Vereshchinsky A.P. Effectiveness Peeling-Rubbing Machines "Cascade" by Wheat Seed Preparation in High-Quality Grindings. *Khleboprodukty* = Bakery Products. 2012; (11):40-41. (In Russ.)
13. Peeling-Rubbing Machine: Patent 2159679 of Russian Federation. No. IPC B02B3/02; appl. 11.06.1999; publ. 27.11.2000. Bulletin No. 33. Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2159679> (accessed 01.10.2019). (In Russ.)
14. Anisimov A.V., Rudik F.Ya., Zagorodskih B.P. Technological Improvements of Grain Preparation for Milling in Small Enterprises. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):603-623. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.603-623>
15. Peeling-Drying Machine: Patent 2491124 of Russian Federation. No. 2012104970/13; appl. 13.02.2012; publ. 27.08.2013. Bulletin No. 24. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2491124C1_20130827.pdf (accessed 01.10.2019). (In Russ.)
16. Anisimov A.V. Experimental Modeling of Grain Drying Processes in the Microwave Field in Preparation for Grinding. *Molochnokhozyaystvennyy vestnik* = Dairy Farming Journal. 2017; (2):80-91. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24411/2225-4269-2017-00009>
17. Anisimov A.V. An Improved System for Automatic Control of Grain Temperature and Moisture Content in Preparation for Grinding. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = Agrarian Scientific Journal. 2015; (6):53-56. Available at: http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/37/2015_6 (accessed 01.10.2019). (In Russ.)
18. Ovchinnikov V.A., Chatkin M.N., Ovchinnikova A.V. Optimization of Parameters and Operating Modes of Disc Sowing Device According to Seeding Uniformity Criterion. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):379-388. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.379-388>
19. Steinberg T.S., Leonova T.A., Shvedova O.G. Determination of Whiteness of Flour. New Standard. *Kontrol kachestva produktsii* = Quality Control of Production. 2016; (11):22-25. Available at: <http://vniiz.org/science/publication/article-208> (accessed 01.10.2019). (In Russ.)

Received 06.11.2018; revised 18.09.2019; published online 31.12.2019

About the authors:

Alexander V. Anisimov, Associate Professor of Chair of Technology of Production and Processing of Livestock Products, Saratov State Agrarian University (1 Theatre Sq., Saratov 410012, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: E-7817-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5313-6329>, anisimova-leksan@mail.ru

Felix Ya. Rudik, Professor of Chair of Technologies of Food Products, Saratov State Agrarian University (1 Theatre Sq., Saratov 410012, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: E-8546-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115>, k-pappsgau@rambler.ru

Contribution of the authors:

A.V. Anisimov – writing the draft, reviewing, carried out the research, analyzed the research results, editing, visualizing the results; F. Ya. Rudik – scientific supervision, analysis, revision of the draft.

All authors have read and approved the final manuscript.