Г. Г. Русакова¹, Н. И. Лебедь^{1,2}, С. В. Тронеv³, Е. Д. Парахневич¹

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СУШИЛКИ С КИПАЩИМ СЛОЕМ**

¹ ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет

² ФНЦ агроэкологии РАН

³ ФГБОУ ВО Волгоградский государственный аграрный университет

E-mail: pebg@vstu.ru

В работе представлена конструктивная схема и принцип работы автоматизированной сушилки с кипящим слоем. Исследования предлагаемой сушилки проводились методом планирования эксперимента, позволяющим определить оптимальные значения параметров, влияющих на качество готового высушиваемого продукта (горчиный жмых) – остаточное содержание влаги, %. Для исследования области оптимума был реализован план Рехтшафнера для трехфакторного эксперимента. На основании уравнений регрессий и двумерных сечений поверхностей отклика определены оптимальные значения конструктивно-режимных параметров автоматизированной сушилки с кипящим слоем.

Ключевые слова: автоматизация, сушка, псевдоожижение, кипящий слой, горчиный жмых, оптимизация, уравнение регрессии.

G. G. Rusakova¹, N. I. Lebed^{1,2}, S. V. Tronev³, E. D. Parakhnevich¹

MATHEMATICAL MODELING OF AUTOMATED BOILER DRYERS

¹ Volgograd State Technical University

² Federal State Budget Scientific Institution «Federal Scientific Centre of Agroecology,
Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences»

³ Volgograd State Agricultural University

The work presents a structural scheme and the principle of operation of an automated fluidized bed dryer. Studies of the proposed dryer were carried out by the method of planning the experiment, which allows to determine the optimal values of the parameters that affect the quality of the finished dried product (mustard cake) - residual moisture content,%. To study the optimum region, the Rechtschafner plan was implemented for a 3-factor experiment. Based on the regression equations and two-dimensional cross-sections of the response surfaces, the optimal values of the structural-operational parameters of an automated fluidized-bed dryer are determined.

Keywords: automation, drying, fluidization, fluidized bed, mustard cake, optimization, regression equation.

С целью достижения безотходности при переработке семян горчицы необходимо стремиться к максимальному использованию отходов и побочной продукции [5]. Благодаря своему специфическому химическому составу семена горчицы более стойкие при хранении, а содержание эфирного масла делает горчицу хорошим консервантом. При производстве горчичного масла сопутствующей побочной продукцией является горчичный жмых [4].

Сельскохозяйственные животные хорошо поедают жмых в смеси с другими кормами (рекомендуется включать его в рацион до 15 % от общего количества концентратов). Но стельным животным, отъемышам и подсосному молодняку жмых давать не следует в силу его токсичности. Получаемые на маслобойных заводах жмыхи отличаются меньшей ядовитостью, а иногда полностью безвредны.

Процесс очистки горчичного жмыха от токсичных соединений предусматривает технологические стадии: гидролиз синигрина до эфирного горчичного масла; выделение эфирного горчичного масла отпаркой его из жмыха; сушку жмыха, очищенного от токсичных соединений с последующим использованием его в качестве кормового продукта [6].

Для экспериментов был взят горчичный жмых, полученный от производства горчичного масла путем прессования и далее обработанный с учетом рекомендаций авторов путем гидролиза с целью выделения синигрина из жмыха и последующего извлечения из него эфирного горчичного масла [6]. Горчичный жмых подвергался сушке в разработанной авторами сушилке с кипящим слоем (представлена на рисунке).

Сушилка с кипящим слоем содержит корпус 1 с сушильной камерой 2 в форме усеченного конуса, в нижней части которой установлена воздухораспределительная решетка 3, через которую подается нагретый паровым калорифером 4 воздух от вентилятора 5. Давление воздуха под распределительной решеткой контролируется посредством манометра. Конденсат, полученный при тепломассобмене, выводится через патрубок 6. Загрузка обрабатываемого сырья осуществляется от транспортера в верхнюю часть 7 сушильной камеры 2, удаление готового продукта производится из разгрузочного люка 8 посредством лотка 9 в емкость 10, а отработанных газов – от отводного патрубка 11.

Автоматизированная сушилка с кипящим слоем

Устройство работает следующим образом. С целью осуществления технологического процесса запускали вентилятор 5 и паровой калорифер 4 для подачи нагретого воздуха через газораспределительную решетку 3. Далее производили загрузку влажного обрабатываемого материала в сушильную камеру 2 и пропускали через него нагретый до определенной температуры воздух. В процессе контроля технологического процесса корректировали температуру, а также скорость подачи воздуха для обеспечения постоянного эффекта псевдооживления. Удаление готового высушенного продукта производилось через разгрузочный люк 8 непрерывно – с верхнего уровня кипящего слоя и периодически – с воздухораспределительной решетки 3 для удаления комков. При недостаточном извлечении влаги из сырья технологический процесс повторяли до достижения требуемой влажности продукта.

Благодаря тому, что верхняя часть сушильной камеры шире, чем нижняя, снижается расход сырья и повышается выход готового продукта, так как мелкие частицы высушенного сырья потоком отходящего газа не выносятся за пределы устройства.

Анализ литературных данных, а также результаты поисковых экспериментов позволили выделить три основных управляемых фактора, влияющих на качество выполнения операции –

остаточное содержание влаги Y , выраженное в процентах (%). Факторы, их уровни и интервалы варьирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Факторы, их уровни и интервалы варьирования

Факторы	Уровни фактора			Интервал варьирования, %
	0	–1	+1	
x_1 – температура воздуха в калорифере, °C	140	135	145	5
x_2 – расход воздуха, кг на кг влаги	20	18,8	21,2	1,2
x_3 – время сушки, мин	10	5	15	5

В качестве выходного показателя был принят выходной фактор, учитывающий качество выполнения операции – остаточное содержание влаги Y , выраженное в процентах.

В соответствии с принятой методикой, для исследования области оптимума был реализован план Рехтшафнера для 3-х факторного эксперимента [2].

На основании экспериментальных данных по предложенной программе [3] рассчитаны коэффициенты B_0 , B_i , B_{ij} и B_{ii} уравнения регрессии:

$$y = B_0 + \sum B_i x_i + \sum B_{ij} x_i x_j + \sum B_{ii} x_i^2. \quad (1)$$

Значимость коэффициентов уравнения (1) оценивалась по критерию Стьюдента. Незначимые коэффициенты удалялись и выполнялся повторный расчет коэффициентов регрессионной модели [1, 2, 3]. В результате расчетов получено уравнение регрессии в кодированном виде:

$$Y = 11,3 + 0,4x_1 - 0,2x_2 + 9,8x_3 - 2,1x_1x_2 + 1,2x_1x_3 + 0,9x_2x_3 + 7,5x_1^2 + 9,1x_2^2 + 10,2x_3^2, \quad (2)$$

Адекватность полученных математических

моделей проверялась по критерию Фишера [2],

$$F = \frac{S_{ao}^2}{S^2(y)}, \quad (3)$$

где $S^2(y) = \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n [y_{ij} - y_i]^2 \right) / N(n+1)$ – дис-

персия ошибки опыта; $S_{ao}^2 = n \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - y_i)^2 /$

$(N - [k + 1])$ – дисперсия неадекватности модели, здесь: y_i – случайная величина, рассчитанная по математической зависимости; y_i – среднеарифметическое значение случайной величины; y_{iq} – значение i -ой величины в q -ом опыте; n – число повторностей опыта; N – число строк матрицы плана; k – число факторов.

Получено, что при исследовании остаточного содержания влаги $F = 1,1831$. При этом $F_{0,05} > F$ (здесь $F_{0,05} = 2,599$ – табличное значение критерия Фишера при уровне значимости 5 % [2]. Таким образом, математические модели адекватны результатам эксперимента.

С помощью предложенной программы [3] были определены оптимальные значения факторов (табл. 2).

Таблица 2

Оптимальные значения факторов

Фактор	Оптимальное значение фактора
x_1 – температура воздуха в калорифере, °C	0,02 / 140,1
x_2 – расход воздуха, кг на кг влаги	0,04 / 20,0
x_3 – время сушки, мин	– 0,48 / 7,6

Примечание: в числителе – в кодированном виде, в знаменателе – в раскодированном виде.

Для анализа и систематизации полученную математическую модель второго порядка привели к типовой канонической форме вида:

$$Y - Y_s = B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + \dots + B_{kk}X_k^2, \quad (4)$$

где Y – значение критерия оптимизации; Y_s – значение критерия оптимизации в оптимальной

точке; $X_1, X_2, \dots, X_k$ – новые оси координат, повернутые относительно старых $x_1, x_2, \dots, x_k$; $B_{11}, B_{22}, \dots, B_{kk}$ – коэффициенты регрессии в канонической форме. В результате расчетов, проведенных на ЭВМ, получены коэффициенты регрессии в канонической форме $B_{11}, B_{22}, B_{33}, B_{44}$ и значение критерия оптимизации в оптимальной точке Y_s .

Уравнение регрессии (2), представленное в канонической форме, имеют вид:

$$Y_s - 8,9 = 6,8X_1^2 + 9,6X_2^2 + 10,4X_3^2, \quad (5)$$

Поскольку все коэффициенты при квадратных членах имеют положительные знаки, то поверхности откликов, описанное уравнением (2), представляют не что иное, как трехмерные параболоиды с координатами центров поверхностей в оптимальных значениях факторов.

В результате обработки экспериментальных данных получено, что для обеспечения минимального остаточного содержания влаги ($Y = 9,2\%$), необходимо принять следующие оптимальные значения факторов: $x_1 = -0,1 \dots +0,1$ ($139,5 \dots 140,5^\circ\text{C}$), $x_2 = -0,1 \dots +0,1$ ($19,9 \dots 20,1$ кг на кг влаги) и $x_3 = -0,6 \dots -0,4$ ($7 \dots 8$ мин).

Получены оптимальные значения режимно-конструктивных параметров автоматизированной сушилки с кипящим слоем, оказывающих влияние на качественные характеристики сушки – остаточное содержание влаги в готовой продукции (горчичном жмыхе).

Для того, чтобы обеспечить минимальное значение остаточного содержания влаги ($<9,2\%$), необходимо принять следующие оптимальные значения факторов: температура воздуха в калорифере – $139,5 \dots 140,5^\circ\text{C}$, расход воздуха –

$19,9 \dots 20,1$ кг на кг влаги, время сушки – $7 \dots 8$ мин.

Таким образом, с помощью двумерных сечений были определены оптимальные интервалы значения режимно-конструктивных параметров автоматизированной сушилки с кипящим слоем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Алешкин, А. В.* Методы математического моделирования процессов разделения и измельчения растительных материалов для повышения эффективности функционирования технических средств послеуборочной обработки зерна и кормоприготовления : дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Алешкин Алексей Владимирович. – Киров, 2001. – 492 с.
2. *Виневский, Е. И.* Оптимизация параметров средств механизации методом планирования многофакторного эксперимента / Е. И. Виневский, Г. В. Попов, С. К. Папуша, Е. В. Шидловский, А. В. Огняник, Н. Н. Виневская, Р. Н. Букаткин / Сб. науч. тр. всероссийского научно-исследовательского института табака, махорки и табачных изделий. – 2010. – № 179. – С. 300–312.
3. *Дегтярев, Ю. П.* Регрессионный анализ на ПЭВМ / Ю. П. Дегтярев, А. И. Филатов // Труды Волгоградского СХИ, 1992. – С. 128–131.
4. *Русакова, Г. Г.* Горчица : монография / Г. Г. Русакова. – Волгоград : ФГУ ВПО ВГСХА. ИПК «Нива», 2012. – 600 с.
5. *Русакова, М. М.* Аппарат для очистки от токсичных соединений отходов переработки семян горчицы / М. М. Русакова [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – Волгоград : ИПК «Нива» ФГОУ «Волгоградская ГСХА». – 2012. – № 3. – С. 165–170.
6. *Русакова, Г. Г.* Оптимизация режимно-конструктивных параметров автоматизированной барабанной сушилки / Г. Г. Русакова, Н. И. Лебедь, С. В. Тронева, А. Ф. Цыбенко. – Волгоград : Известия ВолгГТУ : научный журнал № 1 / ВолгГТУ. – 2020. – С. 73–76.