

С целью исследования влияния оптимальных параметров смешивания, позволяющих получить зерновую смесь для производства спирта высокого качества, выполнено центральное композиционное ортогональное планирование эксперимента. По результатам экспериментов установлено, что наиболее значимыми факторами, которые влияют на качество смеси, являются частота вращения вала, угол установки лопастей и количество лопастей, а также получена математическая модель процесса смешивания. Анализ полученной модели и поверхности отклика позволяет рекомендовать следующие оптимальные параметры смешивания: угол наклона лопастей $\alpha = 30\text{--}35^\circ$, частота вращения вала $n = 150\text{--}160 \text{ мин}^{-1}$, количество лопастей $z = 3$.

МНОГОФАКТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ ЗЕРНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЖИДКОСТЬЮ

РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси
по продовольствию», г. Минск, Беларусь

*З. В. Ловкис, член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор,
генеральный директор;*

А. В. Садовская, аспирант дневной формы обучения

Процесс смешивания широко применяется в различных отраслях пищевой промышленности для равномерного распределения компонентов в рабочем объеме смесителя. Особым значением процесс смешивания обладает в спиртовой промышленности, где от качества полученной на данном этапе зерновой смеси зависит интенсивность растворения сухих веществ зернового сырья, полное выделение крахмала на следующих этапах производства спирта, сокращение потерь сырья, экономия электроэнергии, повышение качества выпускаемой продукции и снижение себестоимости спирта. Основная задача при смешивании зерновых материалов с жидкостью при производстве спирта — обеспечение полного взаимодействия зернового помола с водой и получение однородной смеси, в которой отсутствуют комки.

С целью повышения эффективности технологического процесса смешивания необходимо определить оптимальные параметры смешивания, позволяющие получить зерновую смесь для производства спирта высокого качества. Для исследования влияния параметров смешивания на качество смеси выполнено планирование эксперимента, в котором изучено влияние каждого из оцениваемых факторов и их взаимодействия.

Теоретические исследования процесса смешивания показали, что на процесс смешивания наибольшее влияние оказывают три фактора: угол наклона диска α ($X_1, ^\circ$), частота вращения вала смесителя n ($X_2, \text{мин}^{-1}$) и количество дисков z (X_3).

Диапазон варьирования значений фактора — угол наклона диска ($\alpha, ^\circ$) определен по результатам анализа литературных данных и значению коэффициента трения скольжения по поверхности диска.

Значение частоты вращения вала смесителя ($n, \text{мин}^{-1}$) определено исходя из технологического процесса смешивания.

Количество лопастей (дисков) смесителя ($z, \text{шт.}$) определено исходя из параметров камеры смесителя и допустимого расстояния между дисками.

В качестве критерия оптимизации процесса смешивания выбираем коэффициент качества смеси (K), выражаемый в баллах. Интервалы и уровни варьирования факторов представлены в табл. 1.

Значения нормируемых факторов обозначены -1 и 1 . Для описания процесса смешивания использовали полную квадратичную модель. В опытах реализован полный факторный эксперимент типа 2^3 , матрица планирования которого представлена в табл. 2.

1.

Обозначение фактора	X_1	X_2	X_3
Варьируемый фактор	α	n	z
Единица измерения	°	мин ⁻¹	шт.
Основной уровень ($x = 0$)	32,5	135	3
Интервал варьирования	5	10	1
Нижний уровень ($x = -1$)	20	50	1
Верхний уровень ($x = 1$)	45	220	5

2.

	№ опыта	Планирование			Расчет					
		x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_2x_3	x_1x_3	$x_1^2 \beta$	$x_2^2 \beta$	$x_3^2 \beta$
Точка плана ПФЭ 2^3	1	1	+1	+1	+1	+1	+1	$1-\beta$	$1-\beta$	$1-\beta$
	2	-1	+1	+1	-1	-1	+1	$1-\beta$	$1-\beta$	$1-\beta$
	3	+1	-1	+1	-1	+1	-1	$1-\beta$	$1-\beta$	$1-\beta$
	4	-1	-1	+1	+1	-1	-1	$1-\beta$	$1-\beta$	$1-\beta$
	5	+1	+1	-1	+1	-1	-1	$1-\beta$	$1-\beta$	$1-\beta$
	6	-1	+1	-1	-1	+1	-1	$1-\beta$	$1-\beta$	$1-\beta$
	7	+1	-1	-1	-1	-1	+1	$1-\beta$	$1-\beta$	$1-\beta$
	8	-1	-1	-1	+1	+1	+1	$1-\beta$	$1-\beta$	$1-\beta$
Опыты в звездных точках	9	-1,215	0	0	0	0	0	$1,476-\beta$	$-\beta$	$-\beta$
	10	1,215	0	0	0	0	0	$1,476-\beta$	$-\beta$	$-\beta$
	11	0	-1,215	0	0	0	0	$-\beta$	$1,476-\beta$	$-\beta$
	12	0	1,215	0	0	0	0	$-\beta$	$1,476-\beta$	$-\beta$
	13	0	0	-1,215	0	0	0	$-\beta$	$-\beta$	$1,476-\beta$
	14	0	0	1,215	0	0	0	$-\beta$	$-\beta$	$1,476-\beta$
Нулевая точка	15	0	0	0	0	0	0	$-\beta$	$-\beta$	$-\beta$

К полному факторному эксперименту добавляют опыты в звездных точках и в центре плана, а полученную при этом композицию используют для построения математического описания в виде многочлена второй степени [1, 2].

N — общее число опытов в эксперименте, с учетом звездных точек определяется по уравнению (1):

$$N = 2^n + 2n + n_0, \quad (1)$$

где 2^n — количество опытов, образующих полный факторный эксперимент ($N_0=2^n$); $2n$ — число «звездных» точек в факторном пространстве, имеющих координаты $(\pm\alpha, 0, 0, \dots, 0)$, $(0, \pm\alpha, 0, \dots, 0), \dots, (0, 0, \dots, \pm\alpha)$, где α — плечо звездных точек; n_0 — опыт в центре планирования, т. е. в точке факторного эксперимента с координатами $(0, 0, \dots, 0)$;

Для количества факторов $n=3$:

$$N = 2^3 + 2 \cdot 3 + 1 = 15.$$

Плечо звездных точек, вычисляемых по формуле (2):

$$\alpha = \sqrt{\frac{-N_0 + \sqrt{N_0 \cdot N}}{2}} = \sqrt{\frac{-8 + \sqrt{8 \cdot 15}}{2}} = 1,215. \quad (2)$$

Количество оцениваемых параметров L уравнения регрессии (3):

$$L = \frac{(n+1)(n+2)}{2} = \frac{(3+1)(3+2)}{2} = 10. \quad (3)$$

Уравнение регрессии примет вид (4):

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_1 x_2 + b_5 x_1 x_3 + b_6 x_2 x_3 + b_7 (x_1^2 - \beta) + b_8 (x_2^2 - \beta) + b_9 (x_3^2 - \beta), \quad (4)$$

где β — коэффициент, вводимый для ортогональности плана (5):

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N} = \frac{N_0 + 2 \cdot \alpha^2}{15} = \frac{8 + 2 \cdot 1,215^2}{15} = 0,73. \quad (5)$$

Эксперимент проводился с трехкратной повторностью ($m=3$).

В табл. 3 представлены экспериментальные данные по определению качества получаемой смеси. Исследования проводились в экспериментальном образце смесителя с рабочим органом, состоящим из вала с эллипсными дисками, соотношение дробленого зерна с водой — 1:2,5.

3.

Номер опыта	Планирование			Среднее значение
	$x_1^2 - \beta$	$x_2^2 - \beta$	$x_3^2 - \beta$	\bar{Y}
1	0,27	0,27	0,27	21
2	0,27	0,27	0,27	32
3	0,27	0,27	0,27	50
4	0,27	0,27	0,27	61
5	0,27	0,27	0,27	39
6	0,27	0,27	0,27	50
7	0,27	0,27	0,27	70
8	0,27	0,27	0,27	89
9	0,746	-0,73	-0,73	19
10	0,746	-0,73	-0,73	70
11	-0,73	0,746	-0,73	60
12	-0,73	0,746	-0,73	97
13	-0,73	-0,73	0,746	40
14	-0,73	-0,73	0,746	96
15	-0,73	-0,73	-0,73	95

Обработка экспериментальных данных проводилась с помощью специализированной программы статистического анализа Statgraphics Plus for Windows.

В результате обработки экспериментальных данных получено уравнение регрессии, описывающее зависимость исследуемого показателя качества смеси от выбранных факторов [3]. Влияние каждого фактора и их взаимодействий отражено в виде карты Парето (рис. 1) и графика главных эффектов отклика (рис. 2).

Карта Парето позволила установить значимые факторы и упростить вид уравнения регрессии. Влияние на качество смеси оказывают следующие факторы: частота вращения вала (n), количество дисков (z) и угол наклона диска (α). С ростом значения n , α , z сила влияния на параметр оптимизации возрастает. С увеличением α^2 качество смеси будет уменьшаться. Графически влияние рассматриваемых факторов на качество получаемой зерновой смеси представлено в виде поверхности отклика (рис. 3).

Работоспособность модели подтверждается коэффициентом детерминации $R\text{-squared}=92,49\%$.

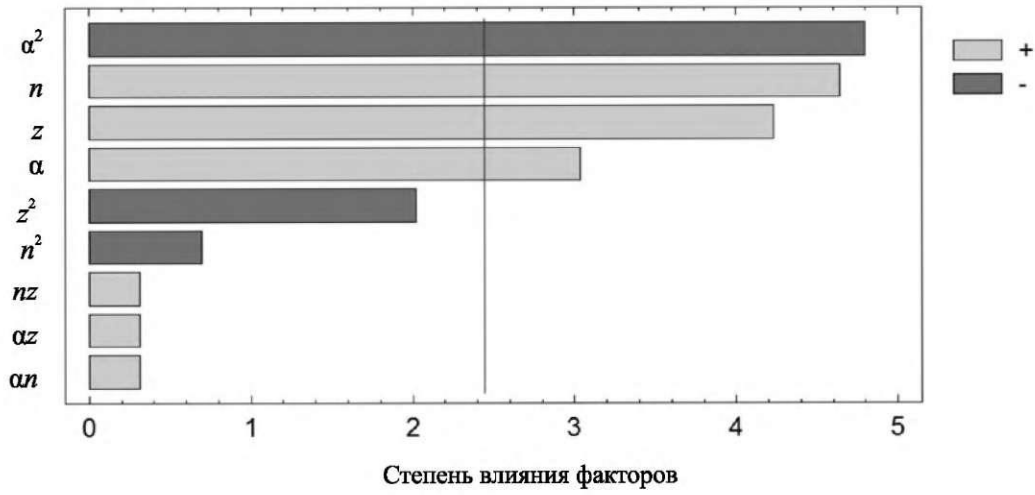


Рис. 1. Карта Парето для функции качества зерновой смеси

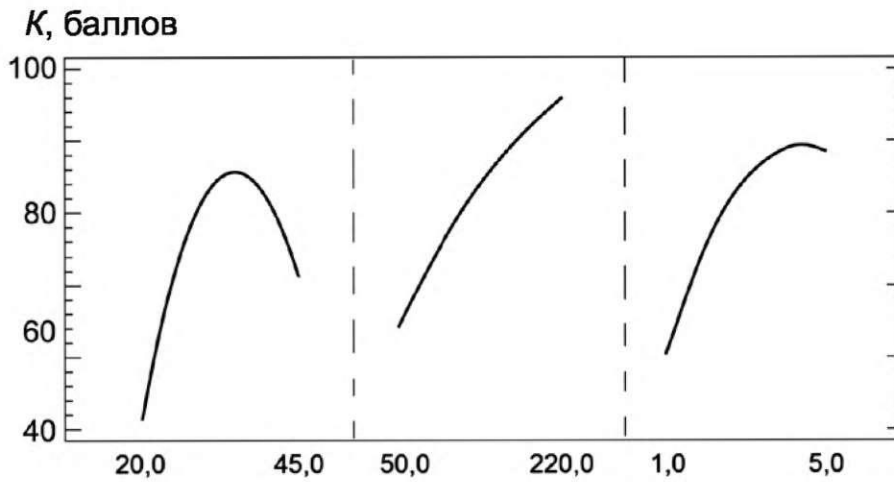


Рис. 2. Главные эффекты отклика для показателя качества смешивания

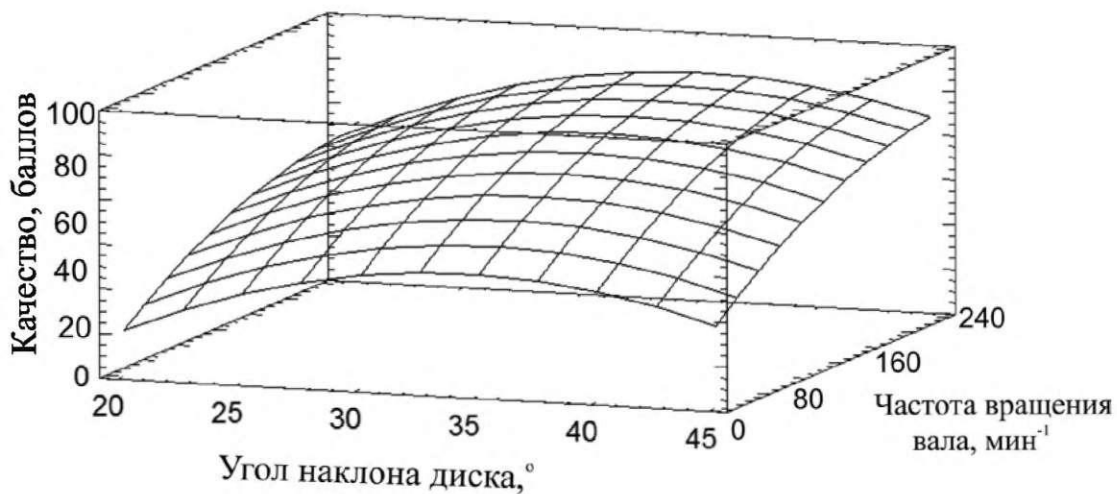


Рис. 3. График поверхности отклика при фиксированном значении $z=3$

Анализ зависимостей, представленных на рис. 2–3, показывает, что зерновая смесь достигает наилучшего качества при угле установки лопасти в интервале от 30° до 35°, при возрастании частоты вращения вала качество смеси улучшается, однако энергетические затраты также возрастают, поэтому оптимальная частота вращения вала — 150–160 мин⁻¹, с увеличением числа дисков смесителя улучшается качество смеси, однако увеличивается и материалоемкость смесителя, следовательно, наиболее рациональное количество дисков $z=3$.

Получена математическая модель, отражающая зависимость качества смеси (K) от параметров технологического режима:

$$K = 158,429 + 10,052 \cdot \alpha + 0,247 \cdot n + 18,958 \cdot z - 0,147 \cdot \alpha^2 + 0,001 \cdot \alpha \cdot n + 0,05 \cdot \alpha \cdot z - 0,0005 \cdot n^2 + 0,007 \cdot n \cdot z - 2,421 \cdot z^2.$$

В табл. 4 представлены пределы изменения факторов функции оптимизации и их оптимальные значения.

4.

Фактор	Наименьшее значение	Наибольшее значение	Оптимальное значение
Угол наклона лопасти, °	16,410	48,589	32,5
Частота вращения, мин ⁻¹	25,589	244,411	154,909
Количество дисков, шт.	0,425	5,574	3,46157

Максимально возможное качество смешивания 95 % достигается при оптимальных параметрах: $\alpha=32,5^\circ$, частота вращения вала $n=155$ мин⁻¹, количество дисков $z=3$.

Таким образом, по результатам экспериментов установлено, что наиболее значимыми факторами, влияющими на качество смеси, являются частота вращения вала смесителя, угол установки лопасти и количество дисков.

Анализ полученной модели и поверхности отклика позволяет рекомендовать следующие оптимальные параметры смешивания: угол наклона лопастей $\alpha = 30-35^\circ$, частота вращения вала $n = 150-160$ мин⁻¹, количество дисков $z = 3$. Полученная регрессионная модель позволяет определить направленность влияния факторов и их взаимодействий, а также определить оптимальный режим проведения процесса смешивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романюк, Ф. А. Теория и практика инженерного эксперимента: монография / Ф. А. Романюк, Б. А. Каледин. — Минск: БНТУ, 2007. — 352 с.
2. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. — М.: Наука, 1976. — 278 с.
3. Бань, М. Ф. Планирование параметров экструзии нового продукта на основе отечественного растительного сырья / М. Ф. Бань, А. М. Мазур // Хлебопек. — 2007. — № 5. — С. 16–19.

Рукопись статьи поступила в редакцию 16.05.2012

Z. V. Lovkis, A. V. Sadovskaya

MULTIFACTORIAL EXPERIMENT OF MIXING PROCESS OPTIMISATION OF GRAIN MATERIALS WITH A LIQUID

In order to investigate the influence of optimal mixing parameters, that allow to receive a grain mix for production of high quality alcohol, the central composite orthogonal planning of experiment is carried out. According to the results of experiments established that the most significant factors, that affect on the quality of the mixture are shaft rotating frequency, the angle of the blades slope and the number of blades, as well as the mathematical model of the mixing process is received. The analysis of the received model and response surface allows to recommend the following optimal parameters of mixing such as an angle of blades slope $\alpha = 30-35^\circ$, rotating frequency of a shaft $n=150-160$ мин⁻¹, quantity of blades $z=3$.