

А.В. Шилов, Д.В. Сухоруков, И.А. Бакин

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ МУЧНЫХ КОМПОЗИТНЫХ СМЕСЕЙ

Исследовано влияние технологических параметров на процесс смешивания мучных композитных смесей на примере полуфабриката для выработки сахарного печенья. Методами регрессионного анализа получена зависимость коэффициента неоднородности смеси от параметров процесса. Выявлены рациональные значения технологических параметров работы центробежного смесителя.

Сыпучие материалы, смешивание, центробежный смеситель.

В настоящее время возрастает потребительский спрос на изделия с определенным содержанием различных компонентов, поэтому большое внимание уделяется технологии комбинированных продуктов с заданными характеристиками (обогащенных витаминами, биологически активными добавками и т.д.). В технологии многих кондитерских изделий имеется стадия получения многокомпонентного состава из дисперсных материалов. Для производства мучных кондитерских изделий перспективным направлением является использование готовых концентратов и продуктов многокомпонентного состава – мучных композитных смесей. Их использование позволяет сократить технологический процесс производства, существенно повысить качество, пищевую и биологическую ценность продукции, уменьшить энерго- и трудозатраты, улучшить санитарно-гигиеническое состояние цехов, организовать производство в условиях предприятий различной мощности [1]. Основными рецептурными компонентами мучных кондитерских изделий являются сыпучие ингредиенты. Так, в рецептуру сахарного печенья входит мука, сахарная пудра или сахар-песок, крахмал, сухое молоко, какао-порошок, соль, кофе, ванильная пудра, химические разрыхлители и другие компоненты. Производители, наряду с основными рецептурными компонентами, вводят в мучные композитные смеси минеральные вещества, витамины, пищевые волокна, а также продукты вторичной переработки. С целью разработки и проектирования аппаратно-процессовой схемы производства мучных композитных смесей для сахарного печенья в работе опытным путем исследованы и определены рациональные значения параметров процесса смешивания.

В качестве объекта исследований использовались компоненты, входящие в рецептуру мучных смесей для печенья сахарного «Земляничное». Экспериментальные исследования проводились на центробежном смесителе периодического действия с рабочим объемом $0,003 \text{ м}^3$. Аппарат состоит из цилиндрического корпуса с эллиптической крышкой и днищем. На приводном валу расположен конусный ротор и разгрузочная лопасть, с помощью которой после завершения процесса смесь удаляется из аппарата. Компоненты смешивались в соотношении 200:1 в соответствии с рецептурой [2]. Для интенсификации исследовательского процесса в качестве ключевого компонента использовался ферромагнитный индикатор.

В данной работе основной задачей являлось нахождение зависимости качества смешивания от параметров процесса, оказывающих наибольшее влияние: частоты вращения вала ротора $n, \text{ с}^{-1}$, коэффициента загрузки аппарата k_z и времени смешивания $t, \text{ с}$. Наилучшая смесь соответствует минимальному значению коэффициента неоднородности (вариации). Предварительно в ходе экспериментальных исследований выделены следующие диапазоны изменения рабочих параметров:

- $n_{\min} = 19,05 \text{ с}^{-1}; n_{\max} = 27,63 \text{ с}^{-1} (z_1)$;
- $k_{z \min} = 0,3; k_{z \max} = 0,67 (z_2)$;
- $t_{\min} = 60 \text{ с}; t_{\max} = 180 \text{ с} (z_3)$.

Поскольку регрессионные модели обладают высокой прогнозирующей способностью только на заранее заданных интервалах варьирования факторов, выбраны диапазоны, максимально учитывающие возможные их изменения. Экспериментальные исследования проводились в соответствии с матрицей планирования полнофакторного эксперимента 2^3 , которая содержит факторы в натуральном (z_1, z_2, z_3) масштабе (табл. 1) и безразмерном (x_1, x_2, x_3) масштабе.

Таблица 1

Матрица планирования ПФЭ 2^3 в натуральном масштабе

№	z_1	z_2	z_3	y_1	y_2	$y_{\text{ср}}$
1	19,05	0,33	60	15,17	16,99	16,08
2	27,63	0,33	60	29,26	30,96	30,11
3	19,05	0,67	60	9,57	11,45	10,51
4	27,63	0,67	60	19,04	20,72	19,88
5	19,05	0,33	180	11,67	13,21	12,44
6	27,63	0,33	180	20,28	22,06	21,17
7	19,05	0,67	180	7,86	8,98	8,42
8	27,63	0,67	180	16,13	17,97	17,05

В результате обработки экспериментальных данных, а также после проверки значимости коэффициентов и адекватности уравнения регрессии [3] зависимость коэффициента неоднородности от технологических параметров в безразмерном масштабе приняла вид:

$$y = 1696 + 5,095 x_1 - 2,99 x_2 - 2,19 x_3 + 0,96 x_2 \cdot x_3 \quad (1)$$

Из уравнения следует, что фактор x_1 влияет на выходной параметр y сильнее, чем остальные. Минимальное воздействие на параметр y оказывает

фактор x_3 . Уравнение регрессии содержит парный эффект взаимодействия x_2x_3 , следовательно, фактор x_2 при изменении значения фактора x_3 изменяет силу своего влияния на y , и наоборот. Анализ влияния эффекта взаимодействия x_2x_3 проведен графическим способом. Для этого в координатной плоскости с осями (x_3 ; y) построены графики уравнения регрессии (рис. 1) при следующих уровнях фактора x_2 : -1; 0; 1. Для упрощения расчета из уравнения регрессии исключены b_0 и b_{1x_1} , поскольку они не входят в анализируемый эффект взаимодействия x_2x_3 . Тогда уравнение (1) примет вид:

$$y = -2,99 \cdot x_2 - 2,19 \cdot x_3 + 0,96 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (2)$$

Аналогичным образом получено:

- при $x_2 = -1$: $y = 2,99 - 3,15 \cdot x_3$;
- при $x_2 = 0$: $y = -2,19 \cdot x_3$;
- при $x_2 = 1$: $y = -2,99 - 1,23 \cdot x_3$.

Приведенные уравнения показывают, что при переходе фактора x_2 с нижнего уровня (-1) на верхний (1) сила влияния фактора x_3 на выходной параметр y уменьшается, как это следует из уменьшения значений коэффициентов при x_3 и, соответственно, угла наклона между графиком и осью x_3 .

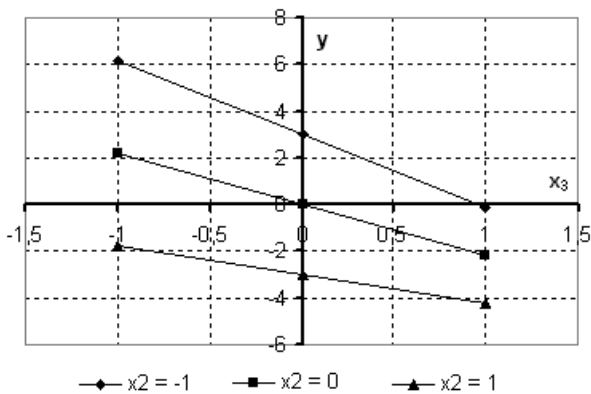


Рис. 1. Анализ эффекта взаимодействия x_2x_3

Построим в координатной плоскости с осями (x_2 ; y) графики уравнения регрессии (рис. 2) при следующих уровнях фактора x_3 : -1; 0; 1. Из уравнения регрессии также исключены коэффициенты b_0 и b_{1x_1} , поскольку они не входят в анализируемый эффект взаимодействия x_2x_3 .

- Аналогичным образом получено:
- при $x_3 = -1$: $y = 2,19 - 3,95 \cdot x_2$;
 - при $x_3 = 0$: $y = -2,99 \cdot x_2$;
 - при $x_3 = 1$: $y = -2,19 - 2,03 \cdot x_2$.

Из полученных уравнений следует, что при переходе фактора x_3 с нижнего уровня (-1) на верхний (1) сила влияния фактора x_2 на выходной параметр y также уменьшается.

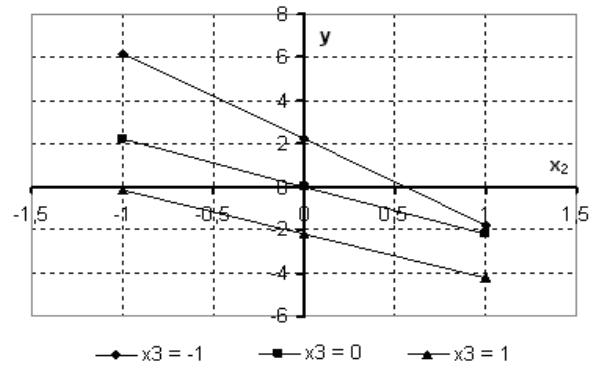


Рис. 2. Анализ эффекта взаимодействия x_2x_3

Увеличение времени смешивания более 120 с в меньшей степени влияет на выход эксперимента y , а интервал от 60 до 120 с имеет максимальное влияние на коэффициент неоднородности.

Уравнение регрессии (1) при переводе в натуральный масштаб приняло вид:

$$y = 8,054 + 1,1876z_1 - 0,2888z_2 - 0,0835z_3 + 0,00094z_2z_3, \quad (3)$$

где $z_1 = n$, $z_2 = k$, $z_3 = t$, c ; $y = V_c$, %.

По уравнению регрессии получены графические зависимости (рис. 3, 4 и 5).

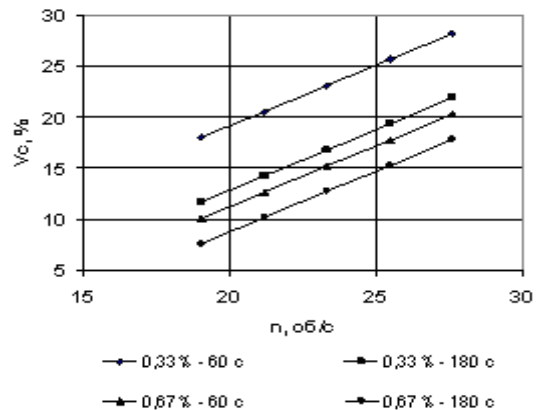


Рис. 3. Зависимость качества смешивания от частоты вращения ротора смесителя

В соответствии с прямыми на рис. 3 наибольшее значение коэффициента неоднородности (31,16 %) достигается при наименьшем времени перемешивания (60 с) и при наибольшей частоте вращения вала аппарата (27,63 c^{-1}). Наименьшее значение коэффициента неоднородности (14,69 %) достигается при наибольшем времени перемешивания (180 с) и при наименьшей частоте вращения (19,05 c^{-1}).

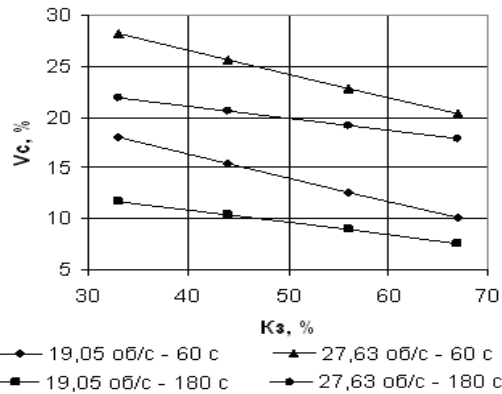


Рис. 4. Зависимость качества смешивания от коэффициента загрузки аппарата

Из рис. 4 видно, что наибольшее значение коэффициента неоднородности (31,16 %) достигается при наибольшей частоте вращения (27,63 с⁻¹) и при наименьшем коэффициенте загрузки (0,33). Минимальное значение V_c , %, при наименьшей частоте вращения (19,05 с⁻¹) и при наибольшем коэффициенте загрузки.

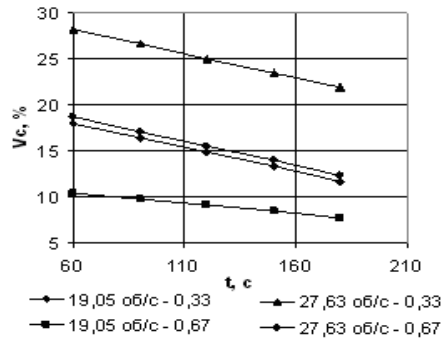


Рис. 5. Зависимость качества смешивания от времени процесса

Из характера графиков на рис. 5 следует, что наибольшее значение коэффициента неоднородности (20,98 %) достигается при наименьшем времени перемешивания (60 с) и при наименьшем коэффициенте загрузки (0,33), а наименьшее значение коэффициента неоднородности (10,61 %) достигается при наибольшем времени перемешивания (180 с) и при наибольшем коэффициенте загрузки (0,67).

Рациональные значения рабочих параметров процесса смесеприготовления мучной композитной смеси для производства печенья сахарного «Земляничное» определены по уравнению регрессии (1) с помощью стандартной функции «Поиск решения» пакета MS Excel:

- $n = 19,05 \text{ с}^{-1}$;
- $k_3 = 0,67$;
- $t = 180 \text{ с}$.

При этом значение коэффициента неоднородности V_c принимает минимальное значение 7,63 %, характерное для смесей хорошего качества.

Важными факторами, определяющими потребительские свойства мучных композитных смесей, являются их физико-механические характеристики: начальное сопротивление сдвигу, насыпная плотность, коэффициенты трения.

Проведены опыты по определению основных физико-механических свойств компонентов, входящих в рецептуру мучных смесей для печенья сахарного «Земляничное» (начальное сопротивление сдвигу τ_0 [Па], коэффициенты внутреннего $\mu_{\text{внут}}$ и внешнего $\mu_{\text{внеш}}$ трения), насыпная плотность ρ [кг/м³], а также исследовано влияние на них размеров частиц.

Для исследования начального сопротивления сдвигу сыпучих материалов использовался прибор, основанный на методе кольцевого сдвига образца [4]. Прибор состоит из рамы, силового блока и двух антифрикционных дисков (верхнего и нижнего). Материал засыпался на нижний антифрикционный диск, а избыток срезался так, чтобы засыпанный слой составлял 10 мм, далее опускался верхний диск массой 1 кг (для уплотнения под предварительной нагрузкой 9,81 Н). После этого силовой блок нагружался до начала сдвига верхнего диска.

На рис. 6 представлены зависимости начального сопротивления сдвигу от размеров частиц при разной величине предварительной нагрузки (9,81; 39,24; 58,86 Н). Из приведенных зависимостей следует, что с повышением размера частиц в смеси происходит линейное уменьшение значений начального сопротивления сдвигу. С увеличением предварительной нагрузки с 9,81 до 58,86 Н сопротивление сдвигу повышается, что можно объяснить уплотнением частиц и увеличением межмолекулярных сил.

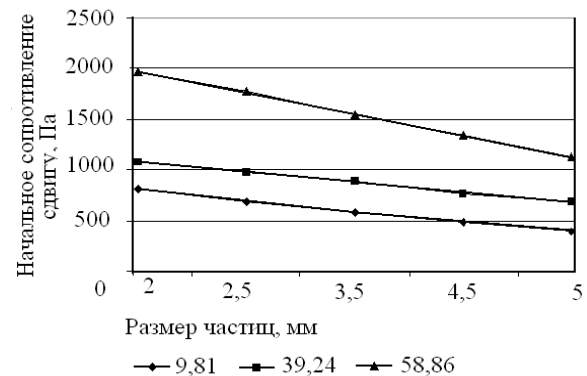


Рис. 6. Зависимость начального сопротивления сдвигу от размера частиц

Исследования по определению коэффициентов внутреннего $\mu_{\text{внут}}$ и внешнего $\mu_{\text{внеш}}$ трения выполнялись на приборе, состоящем из неподвижной и подвижной (с рифленной резиновой поверхностью) платформ. На подвижной платформе равномерно распределялся сыпучий материал с толщиной слой 10 мм. На слой материала без нажатия укладывалась прижимная доска весом 4,05 Н. При плавном поднимании подвижной платформы в момент начала ее движения, когда возникает сдвиг в слоях сыпучего материала, фиксировался угол подъема, являющийся искомым углом трения [4]. На рис. 7 представлены зависимости коэффициентов трения от размеров частиц. Из приведенных зависимостей следует, что с повышением размера частиц в смеси происходит линейное уменьшение коэффициентов трения (так

как уменьшается площадь контакта частиц и фаз), и если сравнить значения коэффициентов внешнего $\mu_{\text{внеш}}$ и внутреннего $\mu_{\text{внут}}$ трения, то явно видно:

$\mu_{\text{внеш}} < \mu_{\text{внут}}$, что можно объяснить таким явлением, как аутогезия (взаимодействие частиц между собой), в результате чего силы взаимодействия частиц становятся больше, чем частиц с поверхностью контакта.

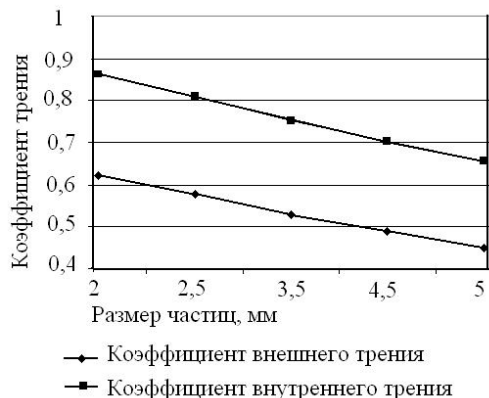


Рис. 7. Зависимость коэффициентов внешнего и внутреннего трения от размера частиц

Для измерения объемной насыпной плотности использовалась установка, состоящая из двух частей: механизма встряхивания с укрепленным на нем стеклянным мерным цилиндром и блока управления [5]. Исследовались три вида показателей насыпной плотности: 1) объемная насыпная плотность – отношение массы продукта к его объему без уплотнения продукта; 2) рыхлая насыпная плотность – отношение массы продукта к его объему после 100 ударов; 3) насыпная плотность – 625 ударов.

На рис. 8 представлены результаты экспериментального исследования насыпной плотности от размеров частиц при различном механическом воздействии (количестве ударов).

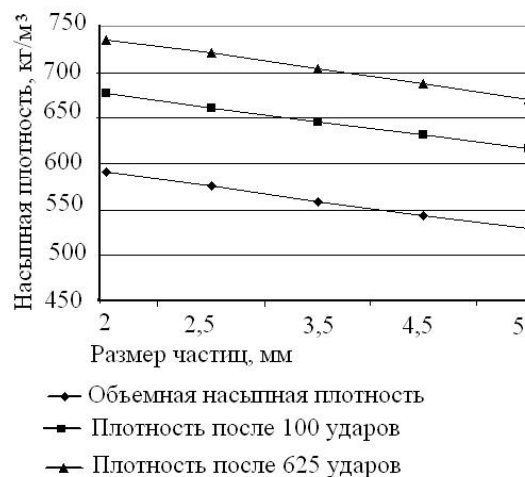


Рис. 8. Зависимость насыпной плотности от размера частиц

Из анализа графиков следует, что прямые, характеризующие объемную насыпную плотность, плотность после 100 и 625 ударов, параллельны, а значит, у всех трех прямых с повышением размеров частиц в смеси происходит линейное уменьшение значений плотности, а с увеличением количества ударов на материал происходит уменьшение объема смеси, следовательно, увеличение насыпной плотности.

Таким образом, в работе с использованием методов регрессионного анализа выявлены оптимальные значения технологических параметров процесса смесеприготовления, которые рекомендуется придерживаться при эксплуатации промышленных смесителей аналогичной конструкции с целью достижения максимально высокого качества приготавливаемой смеси.

Для мучных композитных смесей приведены данные по исследованию физико-механических свойств (начальное сопротивление сдвигу, насыпная плотность, коэффициенты трения) и влиянию на них размеров частиц.

Список литературы

1. Могильный, М.П. Новые сырьевые компоненты для производства хлебобулочных и мучных кондитерских изделий (характеристика, использование) / М.П. Могильный. – М.: ДеЛи Принт, 2006. – 121 с.
2. Бакин, И.А. Теоретические и практические аспекты разработки конструкций центробежных смесителей для переработки дисперсных материалов: монография / И.А. Бакин, В.Н. Иванец. – Кемерово: КемТИПП, 2007. – 156 с.
3. Грачев, Ю.П. Математические методы планирования эксперимента / Ю.П. Грачев, Ю.М. Плаксин. – М.: ДеЛи Принт, 2005. – 296 с.
4. Каталымов, А.В. Дозирование сыпучих и вязких материалов / А.В. Каталымов, В.А. Любартович. – Л.: Химия, 1990. – 240 с.
5. ГОСТ Р 51462-99. Продукты молочные сухие. Метод определения насыпной плотности. – Введ. 22.12.99. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1999.

ГОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности»,
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.
Тел./факс: (3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

SUMMARY

A.V. Shilov, D.V. Sukhorukov, I.A. Bakin

Choice of Rational Parameters of Flour Composite Mixes Preparation

The influence of technological parameters on mixing of flour composite mixes by the example of half-finished product for manufacture of sugar cookies has been investigated. The dependence of a mix factor heterogeneity on the process parameters has been obtained by the methods of the regress analysis. Rational values of technological parameters of the centrifugal mixer operation have been revealed.

Bulk materials, the mixing, centrifugal mixer.

Kemerovo Institute of Food Science and Technology
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia
Phone/Fax: +7(3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

