

DOI: 10.12737/24883

Чернышева Е.В., канд. техн. наук, доц.,
Черноситова Е.С., канд. техн. наук, доц.,
Серых И.Р., канд. техн. наук, доц.,
Воронцова В.В., магистрант,
Чернышева А.С., студент

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ МЕТОДОМ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

bellena_74@mail.ru

Приведены результаты планирования и реализации полного факторного эксперимента по подбору технологических параметров производства спецжиров, обеспечивающих получение требуемых значений жирности. Результаты регрессионного анализа позволяют выявить и оценить влияние компонентов на жирность продукта на выходе процесса. Установлены значения технологических параметров, позволяющих получить требуемое значение исследуемого параметра.

Ключевые слова: планирование эксперимента, полный факторный эксперимент, регрессионный анализ, факторы.

В настоящее время, в период интенсивного развития техники, методов и технологий, каждое предприятие стремится улучшить свое производство и повышать качество выпускаемой продукции, расширять ассортимент и совершенствовать имеющиеся бизнес-процессы. Такие стремления всегда сопровождаются множеством проб и ошибок, а, следовательно, и затратами. Для снижения издержек проводят анализ и оптимизацию всего производства в целом, а также отдельных процессов. Особое внимание следует уделить оптимизации пищевых производств, так как пищевая промышленность одна из самых важных для любого государства, поскольку качественные продукты питания являются залогом здоровья нации.

Для оптимизации процессов производства и прогнозирования свойств готовой продукции широко применяются методы планирования эксперимента [1-8]. Они позволяют получить модель объекта или процесса, определить факторы, влияющие на модель, подобрать оптимальные условия протекания процесса и др.

Целью данного исследования является изучение влияния технологических факторов на свойства жиров специального назначения для дальнейшего использования при оптимизации процесса производства данного вида продукции. Оптимизация позволяет повысить производительность оборудования, экономно расходовать сырье, материалы и ресурсы [9-12].

Жиры специального назначения – это кулинарные жиры, кондитерские жиры и заменители молочного жира, применяемые в изготовлении продуктов сыродельного, молочного, масложирового и хлебопекарного направления.

Растительный заменитель молочного жира не содержит вредного для организма холестерина

на и трансизомеров жирных кислот в отличие от жиров животного происхождения. Эти жиры хорошо действуют на обмен веществ, улучшают работу ферментов. Кроме того, использование спецжиров в кондитерской, хлебопекарной, молочной и других отраслях пищевой промышленности постоянно возрастает в связи с активной инновацией в этих отраслях. Это диктует необходимость постоянно расширять ассортимент специальных жиров, выпускаемых масложировой промышленностью. При этом потребители специальных жиров все более активно влияют на формирование этого ассортимента. Также следует отметить, что расширение производства специальных жиров является в последние несколько лет основной тенденцией развития маргариновой отрасли в РФ [13].

Являясь одним из основных ингредиентов многих продуктов, спецжир и его характеристики оказывают непосредственное влияние на потребительские свойства готовой продукции, улучшая органолептические показатели, и при этом снижая ее себестоимость. Поэтому обеспечение стабильности качества этого компонента и прогнозирование его свойств является важным элементом обеспечения качества готовой продукции.

На начальном этапе исследования математическое описание влияния факторов на свойства спецжира будем искать в виде линейного уравнения, для получения которого воспользуемся полным факторным экспериментом [7, 14-18].

Эксперимент выполнялся на базе одного из современных предприятий, которое выпускает жиры специального назначения по собственным рецептурам. Выпускаемая продукция соответствует установленным нормативным требовани-

ям и требованиям Технического регламента ТР ТС 024/2011 «Технический регламент на масложировую продукцию»; система менеджмента качества, охватывающая производство спецжиров, сертифицирована на соответствие требованиям международного стандарта ИСО 9001. Также качество выпускаемой продукции подтверждается соответствием международным стандартам на пищевую продукцию (International Fegtured o – IFS Food), международным стандартом пищевой безопасности Британского розничного консорциума (BRC Global Standard for Food Safety), стандартам RSPO, Kosher, Halal, Sedex.

Для каждого технологического процесса существует свое оптимальное сочетание факторов, при котором достигается наибольшая его эффективность. Любое отклонение от опти-

мального режима ведет к снижению производительности, срока службы оборудования, ухудшению качества и удорожанию конечного продукта [12].

Выходным параметром процесса приготовления спецжира является жирность продукта y (%), которая зависит от температуры при приготовлении x_1 (°C), жирности исходных компонентов x_2 (%) и концентрации красителя x_3 (%).

Математическое описание этого процесса в окрестности точки факторного пространства с координатами $x_{01} = 35^\circ\text{C}$, $x_{02} = 99,9\%$ и $x_{03} = 75\%$ будет представлено уравнением регрессии вида: $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$.

Условия проведения полного факторного эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Условия проведения эксперимента

Характеристика	$x_1, ^\circ\text{C}$	$x_2, \%$	$x_3, \%$
Основной уровень	35	99,9	75
Интервал варьирования	5	0,1	5
Верхний уровень	40	100	80
Нижний уровень	30	99,8	70

Матрица полного факторного эксперимента представлена в табл. 2.

Приведенные значения исследуемых факторов и результирующего признака были получены в ходе автоматизированного технологиче-

ского контроля процесса производства продукции (x_1 и x_2) и в результате испытаний объединенной пробы готовой продукции (x_3 и y) по ГОСТ 32189-2013.

Таблица 2

Матрица полного факторного эксперимента

№ опыта	X_1	X_2	X_3	$x_1, ^\circ\text{C}$	$x_2, \%$	$x_3, \%$	\bar{y}
1	-1	-1	-1	30	99,8	70	99,85
2	+1	-1	-1	40	99,8	70	99,88
3	-1	+1	-1	30	100	70	99,88
4	+1	+1	-1	40	100	70	99,89
5	-1	-1	+1	30	99,8	80	99,88
6	+1	-1	+1	40	99,8	80	99,89
7	-1	+1	+1	30	100	80	99,90
8	+1	+1	+1	40	100	80	99,90

Кодированные переменные X_1, X_2, X_3 , приведенные в табл. 2, связаны с температурой x_1 , жирностью x_2 и концентрацией x_3 следующими соотношениями [16]:

$$X_1 = \frac{x_1 - x_{01}}{\Delta x_1}, \quad X_2 = \frac{x_2 - x_{02}}{\Delta x_2}, \quad X_3 = \frac{x_3 - x_{03}}{\Delta x_3},$$

где x_i – кодированное значение фактора; Δx_i – интервал варьирования; X_i – натуральное значение фактора.

На основании результатов полного факторного эксперимента рассчитаем коэффициенты регрессии:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j = \frac{1}{8}(99,85 + 99,88 + 99,88 + 99,89 + 99,88 + 99,89 + 99,9 + 99,9) = 90,967$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{1j} \cdot y_j = \frac{1}{8}(-99,85 + 99,88 - 99,88 + 99,89 - 99,88 + 99,89 - 99,9 + 99,9) = 0,00125$$

$$b_2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{2j} \cdot y_j = \frac{1}{8}(-99,85 - 99,88 + 99,88 + 99,89 - 99,88 - 99,89 + 99,9 + 99,9) = 0,00875$$

$$b_3 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{3j} \cdot y_j = \frac{1}{8}(-99,85 - 99,88 - 99,88 - 99,89 + 99,88 + 99,89 + 99,9 + 99,9) = 0,00175,$$

где N – число опытов в эксперименте; j – номер опыта; X_{1j}, X_{2j}, X_{3j} – значение фактора для соответствующего опыта; y_j – значение переменной отклика для соответствующего опыта.

Рассчитаем дисперсию среднего значения:

$$S_y^2 = \frac{1}{8-1} [(99,85 - 99,88)^2 + (99,88 - 99,88)^2 + (99,88 - 99,88)^2 + (99,89 - 99,88)^2 + (99,88 - 99,88)^2 + (99,89 - 99,88)^2 + (99,90 - 99,88)^2 + (99,90 - 99,88)^2] = 0,00027$$

Определим среднеквадратичную ошибку в определении коэффициентов уравнения регрессии:

$$S_b = \pm \sqrt{\frac{S_y^2}{N}} = \pm \sqrt{\frac{0,00027}{8}} = 0,00058,$$

где N – число опытов в эксперименте; S_y^2 – дисперсия среднего значения.

Определяем доверительный интервал коэффициентов уравнения регрессии:

$$S_b t = t \cdot S_b = 2,31 \cdot 0,00058 = 0,0013,$$

где S_b – среднеквадратическая ошибка; t – табличное значение критерия Стьюдента при доверительной вероятности $P = 0,95$ и 7 степенях свободы [8, 10].

$$S_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2,$$

где N – число опытов в эксперименте; y_j – значение переменной отклика для соответствующего опыта; \bar{y} – среднее значение переменной отклика.

Так как коэффициенты b_3, b_2, b_0 по абсолютной величине больше или равны доверительному интервалу $S_b t = 0,01$, то все они являются статистически значимыми. А коэффициент b_1 по абсолютной величине меньше доверительного интервала, это свидетельствует о том, что данный коэффициент не является значимым в данном диапазоне факторного пространства. Следовательно, искомое уравнение имеет вид:

$$y = 99,88 + 0,01X_2 + 0,01X_3$$

Применив модель регрессионного анализа, проверили расчеты в программе Statistica [19] (рис. 1), значимые коэффициенты уравнения регрессии выделены красным.

Regression Summary for Dependent Variable: Жирность, % (Spreadsheet17)						
R= ,92743725 R^2= ,86013986 Adjusted R^2= ,75524476						
F(3,4)=8,2000 p<,03492 Std.Error of estimate: ,00791						
N=8	b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(4)	p-value
Intercept			90,96750	2,792675	32,57361	0,000005
X ₁ , °C	0,418121	0,186989	0,00125	0,000559	2,23607	0,089009
X ₂ , %	0,585369	0,186989	0,08750	0,027951	3,13050	0,035168
X ₃ , %	0,585369	0,186989	0,00175	0,000559	3,13050	0,035168

Рис. 1. Результаты регрессионного анализа в программе Statistic

Для проверки адекватности уравнения регрессии найдем расчетные значения функции отклика:

$$y_1^p = 99,88 + 0,01(-1) + 0,01(-1) = 99,86$$

$$y_2^p = 99,88 + 0,01(-1) + 0,01(-1) = 99,87$$

$$y_3^p = 99,88 + 0,01(+1) + 0,01(-1) = 99,87$$

$$y_4^p = 99,88 + 0,01(+1) + 0,01(-1) = 99,89$$

$$y_5^p = 99,88 + 0,01(-1) + 0,01(+1) = 99,87$$

$$y_6^p = 99,88 + 0,01(-1) + 0,01(+1) = 99,89$$

$$y_7^p = 99,88 + 0,01(+1) + 0,01(+1) = 99,89$$

$$y_1^p = 99,88 + 0,01(+1) + 0,01(+1) = 99,91$$

Вычислим оценку дисперсии адекватности:

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{N-B} \sum_{i=1}^N (y^3 - y_i^p)^2 = \frac{1}{8-4} [0,0001 + 0,0001 + 0,0001 + 0 + 0,0001 + 0 + 0,0001 + 0,0001] = 0,00015$$

где B – число коэффициентов регрессии; N – количество опытов; y^3 – экспериментальное значение функции отклика; y_i^p – расчетное значение функции отклика.

Проверку гипотезы адекватности модели проводим по критерию Фишера. Для этого найдем расчетное значение критерия:

$$F_p = \frac{\max(S_{ad}^2; S_y^2)}{\min(S_{ad}^2; S_y^2)} = \frac{0,00027}{0,00015} = 1,8$$

где S_y^2 – дисперсия среднего значения; S_{ad}^2 – дисперсия адекватности.

Расчетное значение критерия Фишера не превосходит табличное значение, которое составляет 3,83 [8], следовательно, уравнение регрессии адекватно.

Перейдем в уравнении от кодированных переменных к физическим.

$$X_2 = \frac{x_2 - x_{02}}{\Delta x_2} = 10x_2 - 999$$

$$X_3 = \frac{x_3 - x_{03}}{\Delta x_3} = 0,2x_3 - 15$$

Подставляя полученные выражения в уравнение регрессии, преобразуем его к виду:

$$y = 89,74 + 0,1x_2 + 0,002x_3$$

Графически результаты планирования эксперимента представлены на рис. 2, в виде поверхности отклика, построенной в программе Statistica. Коэффициенты уравнения поверхности отклика, рассчитанные в программе, незначительно отличаются от полученных расчетным методом в уравнения регрессии.

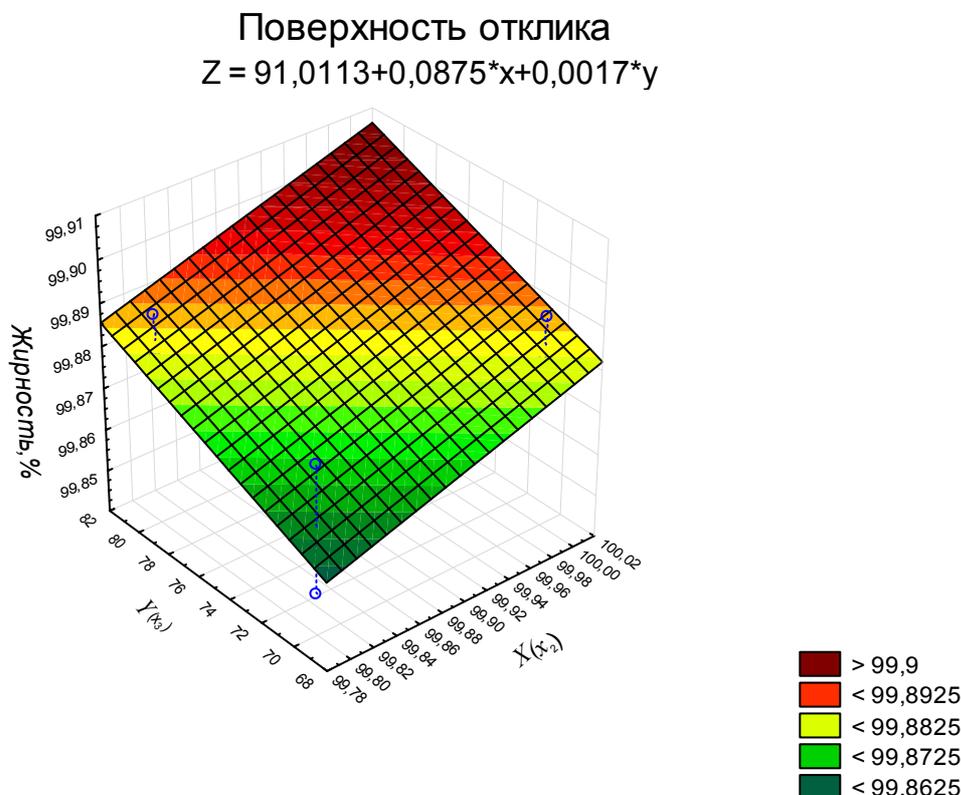


Рис. 2. Зависимость жирности готового продукта от факторных признаков: жирность исходных компонентов x_2 (%) и концентрация красителя x_3 (%)

Как видно из представленного графика жирность спецжира увеличивается при одновременном увеличении жирности исходных компонентов и концентрации красителя. Для получения максимальных значений исследуемого параметра, а именно такая жирность (99,9 %) чаще всего требуется крупным потребителям, использующим его в своем производстве (при изготовлении кондитерских изделий и молочной продукции), необходимо применять исходные компоненты с жирностью не менее 99,84 % и концентрацию красителя не менее 75 %. Однако с целью снижения стоимости готового продукта можно использовать в технологии производства сочетание минимальных значений факторных признаков, поскольку даже такое сочетание обеспечивает выполнение нормативных требований к спецжиру по показателю жирности: не менее 95 %.

Таким образом, с помощью полного факторного эксперимента получено уравнение, описывающее процесс приготовления заменителя молочного жира на современном пищевом предприятии. Данное уравнение позволяет выявить влияние компонентов на жирность продукта на выходе процесса. Из расчетов видно, что для оптимальной жирности продукта можно брать сочетание факторов с минимальными значениями, так как такой выбор позволит сократить расходы, и при этом жирность будет удовлетворять требования к продукту. Кроме того, в уравнение можно добавить другие компоненты (например, витамины - токоферол и др.), а, следовательно, проведя дополнительные исследования, получить новый продукт, избежать некоторых убытков и глубже исследовать процесс.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юракова Т.Г., Черноситова Е.С., Юраков Н.С. Исследование оптических свойств искусственных пигментных наполнителей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №10. с. 28-31.
2. Бондарь А.Г., Статюха Г.А., Потяженко И.А. Планирование эксперимента при оптимизации процессов химической технологии. Киев: изд. Наукова Думка, 1980. 207 с.
3. Логанина В.И., Федосеев А.А. Статистические методы контроля и управления качеством продукции: учебн. пособ. Ростов-на-Дону: изд-во Феникс, 2007.
4. Баласанян Б.С., Христафорян С.Ш. Полиномиальная аппроксимация результатов однофакторного эксперимента методами математического планирования // Прогресивні технології І системи машинобудування. 2007. № 1 (33). С. 18-25.

5. Петровский Э.А., Казанцева А.В. Прогнозирование выходов процессов предприятия методом математического планирования эксперимента // Перспективы науки. 2012. № 3 (30). С. 65-68.

6. Крючкова О.А., Крючков Ю.О., Таранцев Е.К. Исследование параметров для функции отклика с использованием метода планирования эксперимента // Современные информационные технологии. 2007. № 5. С. 10-13.

7. Пучка О.В., Вайсера С.С., Здесенко В.А. Прогнозирование эксплуатационных характеристик теплоизоляционных материалов методом математического планирования эксперимента // современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. научн. тр. XII-ой Междунар. научн.-практ. конф. в 4-х томах. 2015. С. 352-356.

8. Пучка О.В., Чернышева Е.В., Вайсера С.С., Сергеев С.В. Исследования морфологических инверсий и технологических характеристик теплоизоляционных материалов / Фундаментальные исследования. 2014. № 12-1. с.104-111.

9. Чернышева Е.В. Средства и методы управления качеством: учебное пособие. Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. 192 с.

10. Чернышева Е.В., Серых И.Р. Сертификация строительной продукции как механизм обеспечения гарантии качества / Наука и технология материалов: состояние и перспективы развития: сб. матер. Междун. науч.-техн. конф. Минск, 2005. с. 206-208.

11. Панфилова Н.П., Тарасов Р.В., Макарова Л.В. Оптимизация технологических процессов производства сахара методами планирования эксперимента // Современные научные исследования и инновации. 2014. № 6-1 (38). С. 16.

12. Бочкарев В.В. Оптимизация технологических процессов органического синтеза: учебное пособие. Томск: Изд. Томского политехнического университета, 2010. 185 с.

13. Султанович Ю.А., Нестерова Е.А., Степанова Л.И., Трубач И.Г. Перспективы рынка специализированных жиров // Переработка молока. 2010. №3. с. 38-41.

14. Ефремов Г.И., Карабаев Г.В., Говорова М.Ю. Применение метода планирования эксперимента для нахождения уравнения линейной регрессии / Развитие науки и образования. Проблемы преподавания в высшей школе: сб. мат. Междунар. научн.-метод. конф. в 2-х томах. 2011. С. 41-45.

15. Тузенко О.А., Кухарь В.В., Балалаева Е.Ю., Дубинина А.В. Исследование математических моделей в планировании эксперимента методом сравнительного анализа // Вестник национального технического университета Харькова.

ский политехнический институт. Серия: Информатика и моделирование. 2013. № 39 (1012). С. 182-188.

16. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: изд. Наука, 1976.

17. Чернышева Е.В., Серых И.Р. Основы научных исследований, планирование и организация эксперимента: учебное пособие. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 103 с.

18. Чернышева Е.В. Основы теории эксперимента: учебное пособие. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 68с.

19. Боровиков В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере. СПб.: изд. Питер, 2003. 688 с.

20. Чернышева Е.В., Серых И.Р., Стаинов В.В., Чернышева А.С. Актуальные проблемы промышленной безопасности // Zbornik radova: visoka tehnička škola strukovnih studija. Niš. Сербия. 2016. December. P. 164-165.

Chernysheva E.V., Chernositova E.S., Serykh I.R., Vorontsova V.V., Chernysheva A.S.

OPTIMIZATION PROCESS OF PRODUCTION PLANNING METHOD OF THE EXPERIMENT

The results of the planning and implementation of a full factorial experiment on the selection of technological parameters of production special, providing the required values of fat. The results of the regression analysis allow to identify and assess the influence of components on the fat content of the product process. Set values of technological parameters, allowing to obtain the desired value of the investigated parameter.

Key words: *design of experiments, full factorial experiment, regression analysis, factors.*

Чернышева Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Стандартизация и управление качеством»

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: bellena_74@mail.ru

Черноситова Елена Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Стандартизация и управление качеством»

Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: ES-Helen@yandex.ru

Серых Инна Робертовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретической механики и сопротивления материалов»

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: inna_ad@mail.ru

Воронцова Виктория Владимировна, студент магистратуры направления «Стандартизация и метрология» кафедры «Стандартизация и управление качеством»

Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: vorontsova.v.v@mail.ru