

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНО-ШНЕКОВОГО СМЕСИТЕЛЯ МЕТОДОМ МНОЖЕСТВЕННОЙ РЕГРЕССИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ МУЧНОЙ ХЛЕБОПЕКАРНОЙ СМЕСИ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ПИТАНИЯ СПОРТСМЕНОВ

Д.М. Бородулин^{1,*}, Е.В. Невская², Д.И. Киселев¹,
А.А. Шледенко², М.Н. Потапова¹

¹ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)»,
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47

²ФГБНУ «Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности»,
107553, Россия, г. Москва, ул. Б. Черкизовская, 26а

*e-mail: borodulin_dmitri@list.ru

Дата поступления в редакцию: 10.03.2016

Дата принятия в печать: 25.04.2016

В настоящее время многие регионы Российской Федерации, а в том числе и Кемеровская область, сталкиваются с большими проблемами качественного питания, продукция с низким содержанием эссенциальных макро- и микронутриентов все чаще заполняет продуктовый рынок. Поэтому обогащение продуктов питания аминокислотами, полиненасыщенными жирными кислотами омега-3 и омега-6, витаминами, минеральными веществами и др. является актуальной задачей. В лаборатории кафедры «Технологическое проектирование пищевых производств» Кемеровского технологического института пищевой промышленности (университета) был разработан центробежно-шнековый смеситель для сыпучих материалов с подобранными рациональными параметрами работы для обогащения витаминами и другими полезными веществами мучной смеси. Анализируя процесс смешивания с помощью метода множественной регрессии, установили, что наиболее адекватно описывает процесс «Регрессия поверхности отклика», и выявили, что значительное влияние на качество смешивания оказывает количество витков шнека и частота вращения рабочего органа. В ФГБНУ НИИХП проведены исследования по оптимизации качественного и количественного ингредиентного состава мучной хлебопекарной смеси. Проведен анализ биологической ценности хлеба, полученного из мучной хлебопекарной смеси, и выявлено, что его аминокислотный скор увеличился от 9 до 43 % по сравнению с контрольным образцом без добавок. Установлен срок годности мучной хлебопекарной смеси.

Центробежно-шнековый смеситель, регрессионный анализ, качество смешивания, неоднородность смеси, множественная регрессия, рациональные параметры, биологическая ценность, мучная хлебопекарная смесь

Введение

Для достижения высоких спортивных результатов необходимо сбалансированное адаптированное питание, учитывающее индивидуальные особенности спортсменов. В ТР ТС 027/2012 «О безопасности отдельных видов специализированной пищевой продукции, в том числе диетического лечебного и диетического профилактического питания» (принят Решением Совета Евразийской экономической комиссии 15.06.2012 № 34) дано определение пищевой продукции для питания спортсменов – это специализированная пищевая продукция заданного химического состава, повышенной пищевой ценности и (или) направленной эффективности, состоящая из комплекса продуктов или представленная их отдельными видами, которая оказывает специфическое влияние на повышение адаптивных возможностей человека к физическим и нервно-эмоциональным нагрузкам. Разработка специализированных продуктов для спортсменов различных видов спорта в настоящее время рассматривается в качестве одного из важных резервов роста их спортивных достижений.

Хлебобулочные изделия – наиболее доступные и высокоусвояемые пищевые продукты в структуре питания спортсменов, при этом за счет хлеба покрывается до четверти суточной потребности в энергии.

Анализ научно-технической литературы позволил установить основные медико-биологические рекомендации к питанию спортсменов [1, 12]. Поэтому основными принципами формирования ингредиентного состава изделий являются:

- комбинация различных видов белка – улучшает их синтез и уменьшает разрушение мышечной ткани;
- комбинация простых и сложных углеводов – ускоряет процесс восполнения гликогена и поддерживает стабильный уровень сахара в крови;
- наличие полиненасыщенных жирных кислот серии омега-3 и омега-6 – способствуют энергообеспечению спортсменов, повышают выносливость и объем мышечной массы;
- антиоксиданты – обеспечивают снижение последствий силовых тренировок посредством инактивации свободных радикалов.

Изучен химический состав и проведен анализ ряда натуральных обогатителей, обладающих иммуномодулирующими и антиоксидантными свойствами, содержащими также незаменимые макро- и микронутриенты [10]. В качестве рецептурных компонентов использовались следующие ингредиенты: овсяные отруби, сухая пшеничная клейковина, нутовая мука и семена кунжута.

Овсяные отруби являются источником клетчатки, витаминов А, Е, группы В и ценных микро- и макроэлементов. Клетчатка благотворно влияет на деятельность всей системы пищеварения, особенно на работу кишечника. Витамины группы В активно участвуют в энергетическом, углеводном, жировом, белковом и водно-солевом обмене в организме, благоприятно влияют на кроветворение. Витамин Е является сильным антиоксидантом. Благодаря повышенному содержанию белков и клетчатки употребление овсяных отрубей способствует наращиванию мышечной массы и рекомендуется для питания спортсменов [9].

Нутовая мука – источник кальция, цинка, калия, магния, фосфора и железа, в ней содержится большое количество клетчатки, сложных углеводов и аминокислот. В нутовой муке содержится витамин В6, который влияет на повышение иммунитета [7].

Семена кунжута содержат полиненасыщенные жирные кислоты омега-3, омега-6, витамины, макро- и микроэлементы, антиоксиданты. Их употребление укрепляет сердечную мышцу, повышает эластичность сосудов, снижает уровень холестерина в крови. Также кунжут обладает иммуностимулирующими свойствами [8].

В ФГБНУ НИИ хлебопекарной промышленности проводится работа по созданию мучных хлебопекарных смесей [10]. Актуальность исследований обусловлена возможностью или при необходимости приготовления хлебобулочных изделий на предприятиях общественного питания и в домашних условиях с использованием хлебопечек, при подготовке и проведении соревнований. Готовые смеси разрабатываются на базе отечественного природного натурального сырья, позволяющего повысить пищевую и биологическую ценность изделий.

В процессе работы проводилась корректировка соотношения рецептурных компонентов методом пробных лабораторных выпечек хлебобулочных изделий. В табл. 1 приведено соотношение рецептурных компонентов для 300 г мучной хлебопекарной смеси без учета потерь.

Таблица 1

Рецептура мучной хлебопекарной смеси (без учета потерь) для приготовления хлеба для питания спортсменов

Наименование сырья	Расход, г
Мука пшеничная I сорт	220
Овсяные отруби	27
Нутовая мука	19
Соль поваренная	4
Сахар-песок	11
Клейковина сухая	8
Кунжут	11

Большое значение для получения высококачественных смесей имеет равномерное распределение всех входящих в рецептуру ингредиентов. При этом важно учитывать еще ряд факторов, которые создают дополнительные сложности, например, различие гранулометрических составов, плотности и других физико-механических характеристик компонентов смеси. Для решения этих проблем используют высокоэффективное смесительное оборудование, например, смесители непрерывного действия центробежного типа [2, 13].

С этой целью проведены исследования работы непрерывно действующего центробежного аппарата с повышенной накопительной способностью материала на основе регрессионного анализа и экспериментальных исследований при получении сухой мучной хлебопекарной смеси для спортивного питания [3, 6, 10].

Объекты и методы исследований

В качестве объекта исследований взят непрерывно действующий центробежно-шнековый смеситель [11], разработанный на кафедре «Технологическое проектирование пищевых производств» Кемеровского технологического института пищевой промышленности (университета). На данном аппарате были проведены эксперименты по выявлению степени влияния частоты вращения ротора n в диапазоне 500÷900 об/мин, количество отверстий в витках шнека Z_0 (4÷8) и количество витков Z_v (2÷4) на качество мучной хлебопекарной смеси. Нами было проведено 8 экспериментов при разных факторах (n , Z_0 , Z_v), в каждом из опытов осуществлялся отбор 30 проб по 30 грамм мучной смеси. Для дальнейшего анализа рассматриваемую мучную смесь (рецептура которой представлена в табл. 1) представляли как бинарную, в которой в качестве ключевого компонента приняли поваренную соль (имеющую минимальную массу по отношению к другим компонентам), а в качестве основного – другие ингредиенты согласно рецептуре. Далее полученные пробы подвергались химическому анализу, на основе которого определили концентрацию поваренной соли в каждой пробе [3]. Далее по известной методике [5] был рассчитан коэффициент неоднородности смеси для каждого эксперимента, представленный в табл. 2.

Таблица 2

Численные значения варьируемых факторов и коэффициента неоднородности мучной хлебопекарной смеси

Названия факторов и их значения						Коэффициент неоднородности V_c , % мучной хлебопекарной смеси
X1	X2	X3	n	Z_0	Z_v	
-1	-1	-1	500	4	2	5,92
-1	-1	+1	500	4	4	8,56
-1	+1	-1	500	8	2	9,37
-1	+1	+1	500	8	4	11,2
+1	-1	-1	900	4	2	5,6
+1	-1	+1	900	4	4	3,79
+1	+1	-1	900	8	2	12,06
+1	+1	+1	900	8	4	11,95

Анализ табл. 2 показал, что лучшее качество мучной хлебопекарной смеси $V_C = 3,79\%$ достигается при частоте вращения $n = 900$ об/мин, количестве витков $Z_V = 4$ и количестве отверстий на витках шнека $Z_O = 4$.

Для лучшего восприятия данных были построены графические и регрессионные зависимости коэффициента неоднородности от переменных факторов (рис. 1, 2 и 3).

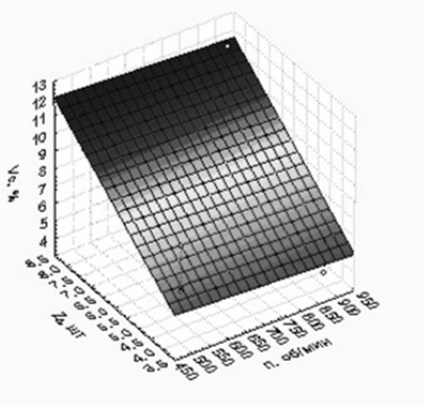


Рис. 1. Зависимость коэффициента неоднородности от частоты вращения и количества отверстий на витках

Из рис. 1 видно, что в исследуемом диапазоне частота вращения ротора не влияет на качество смешивания. Увеличение числа отверстий на шнеке ротора приводит к прямоточному высыпанию частиц из аппарата, при этом снижая время пребывания их в смесителе, что негативно сказывается на качестве конечного продукта. Регрессионное уравнение (1), полученное для данного случая, подтверждает наибольшее влияние числа отверстий на витках шнека Z_O (поскольку оно имеет максимальное численное значение) на качество мучной хлебопекарной смеси по отношению к частоте вращения ротора n .

$$V_C = -1,5119 - 0,001 \cdot n + 1,2944 \cdot Z_O \quad (1)$$

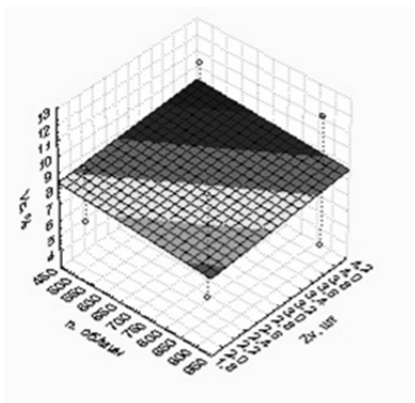


Рис. 2. Зависимость коэффициента неоднородности от частоты вращения и количества витков

Из рис. 2 видно, что в исследуемом диапазоне оптимальная частота вращения ротора n от 700 до 900 об/мин при количестве витков Z_V , равном 3. Уменьшение числа оборотов ротора и увеличение

количества витков шнека снижает коэффициент неоднородности V_C , что негативно сказывается на качестве получаемой мучной хлебопекарной смеси. Регрессионное уравнение (2), полученное для данного случая, подтверждает данное высказывание.

$$V_C = -8,3219 - 0,001 \cdot n + 0,3188 \cdot Z_V \quad (2)$$

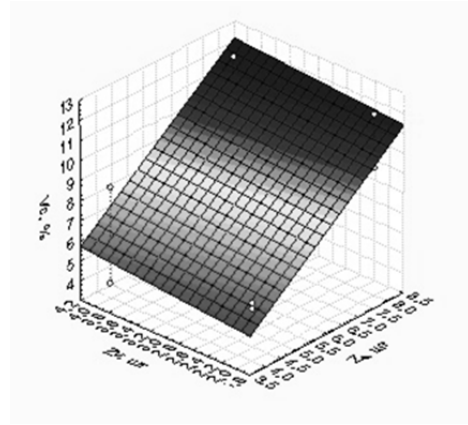


Рис. 3. Зависимость коэффициента неоднородности от количества отверстий на витках и числа витков

Из рис. 3 видно, что в исследуемом диапазоне количество витков на шнеке не влияет на качество смешивания. Увеличение числа отверстий на шнеке ротора приводит к прямоточному высыпанию частиц из аппарата, при этом снижая время пребывания их в смесителе, что негативно сказывается на качестве конечного продукта. Регрессионное уравнение (3), полученное для данного случая, подтверждает наибольшее влияние числа отверстий на витках шнека Z_O (поскольку оно имеет максимальное численное значение) на качество мучной хлебопекарной смеси по отношению к количеству витков на шнеке Z_V .

$$V_C = -0,1663 + 1,2944 \cdot Z_O + 0,3188 \cdot Z_V \quad (3)$$

Далее была исследована оценка влияния всех варьируемых конструктивных и технологических параметров на качество получаемой мучной хлебопекарной смеси на основе статистического анализа, проводимого с помощью модуля «Общие регрессионные модели», на основе которого получены три регрессионные модели.

Модель получена с помощью инструмента «Регрессия поверхности смеси», предназначенного специально для анализа экспериментов по смешиванию.

В табл. 3 приведены оценки модели. Коэффициент корреляции (R), равный 0,999, практически приблизился к единице, что говорит о сильной зависимости выходной переменной от входных переменных. Близость коэффициента корреляции к единице показывает приближение корреляционной связи к функциональной. Коэффициент детерминации (R^2) данной модели, равный 0,998, также близок к единице. Из этого следует, что доля дисперсии зависимой переменной, объясняемая рассматриваемой моделью зависимости, равна 99,8 %.

F-критерий Фишера имеет достаточно большое значение ($F = 175,074$), чтобы утверждать, что модель является адекватной и может быть использована для принятия решений к осуществлению прогнозов. Рассматриваемая модель является статистически значимой, так как p-уровень составляет всего 0,57 %. Это показывает, что модель с вероятностью 0,0057 будет являться лишь случайным совпадением для данной выборки.

Таблица 3

Оценка модели

Множественный коэффициент корреляции, R	0,999
Множественный коэффициент детерминации, R^2	0,998
Скорректированный коэффициент корреляции, R	0,992
F-критерий	175,074
p-уровень	0,005

В табл. 4 приведены коэффициенты регрессии модели. Статистическая значимость (p-уровень) у половины коэффициентов низкая, в пределах 4,7–5,5 %, у второй половины завышена 54,45–98,01 %. Это показывает, что каждый найденный коэффициент с вероятностью, равной соответствующему ему p-уровню, будет говорить, что найденная зависимость является лишь случайной особенностью данной выборки. Аналогичные результаты отображает t-критерий Стьюдента. У половины коэффициентов он достаточно высок, что говорит о высокой статистической значимости этих коэффициентов. В соответствии с этим оценены коэффициенты β . Данный коэффициент оценивает меру чувствительности одной переменной к другой переменной. Это означает, что наиболее чувствительным для V_C будет влияние Z_V и совместное влияние $n \cdot Z_O$ и $n \cdot Z_V$, причем первые два фактора дают прямо пропорциональную зависимость, а последний – обратно пропорциональную. Чувствительность V_C к Z_O достаточно мала, а к n и $Z_O \cdot Z_V$ приближается к нулю.

Таблица 4

Коэффициенты модели

Коэффициенты модели	V_C , % Param	V_C , % t	V_C , % p	V_C , % Beta
n	-0.0006	-0.20	0.85	-0.05
Z_O	-0.30056	-0.72	0.54	-0.21
Z_V	3.65	4.40	0.04	1.27
$N \cdot Z_O$	0.002	4.06	0.05	1.18
$N \cdot Z_V$	-0.004	-4.10	0.05	-1.19
$Z_O \cdot Z_V$	-0.003	-0.02	0.98	-0.007

Статистическая значимость (p-уровень) у всех коэффициентов находится в пределах 0,9–0,04, что говорит о высокой статистической значимости рассматриваемых коэффициентов. В соответствии с этим оценены коэффициенты Beta, показывающие,

что все параметры практически в равной степени влияют на V_C .

Сложив коэффициенты (параметры модели Param) из табл. 4, получаем итоговую регрессионную модель (уравнение регрессии), позволяющую прогнозировать значения зависимой переменной V_C :

$$V_C = -0,00068 \cdot n - 0,3 \cdot Z_O + 3,65 \cdot Z_V + 0,002 \cdot n \cdot Z_O - 0,004 \cdot n \cdot Z_V - 0,003 \cdot Z_O \cdot Z_V. \quad (4)$$

Используя данную модель, можно сравнить наблюдаемые значения (полученные в ходе эксперимента) зависимой переменной с предсказанными (полученные с помощью математической модели). Результат сравнения приведен в табл. 5. Разница наблюдаемых и предсказанных значений оценена с помощью относительной погрешности по формуле

$$\Delta V_C = \frac{|V_C^{\text{Набл}} - V_C^{\text{Пред}}|}{V_C^{\text{Набл}}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Из табл. 5 видно, что погрешность для каждого исследования достаточно мала, следовательно, модель можно использовать для предсказания значений зависимой переменной.

Таблица 5

Сравнение наблюдаемых и предсказанных значений

№	V_C , % Наблюдаемые	V_C , % Модельные	Относительная погрешность, %
1	5,95	5,70	3,67
2	8,56	8,30	2,97
3	9,37	9,11	2,71
4	11,2	11,69	4,38
5	5,6	5,39	3,61
6	3,79	4,25	12,25
7	12,06	12,52	3,85
8	11,95	11,35	4,98

Ввиду приведенных выше рассуждений, модель, полученная в ходе исследования, может считаться адекватной и может быть использована для дальнейшего тестирования.

Из табл. 5 видно, что среднее значение относительной погрешности составляет 4,80 %.

Вторая модель получена с помощью инструмента «Регрессия поверхности отклика».

В табл. 6 приведены оценки модели. Коэффициент корреляции (R), равный 0,994, практически приблизился к единице, что говорит о сильной зависимости выходной переменной от входных переменных. Близость коэффициента корреляции к единице показывает приближение корреляционной связи к функциональной. Коэффициент детерминации (R^2) данной модели, равный 0,988, также близок к единице. Из этого следует, что доля дисперсии зависимой переменной, объясняемая рассматриваемой моделью зависимости, равна 98,8 %.

F-критерий Фишера имеет небольшое значение ($F = 14,61$) при шести степенях свободы модели, следовательно, нельзя точно утверждать, что модель является адекватной и может быть использо-

вана для принятия решений к осуществлению прогнозов. Рассматриваемая модель не обладает большой статистической значимостью, так как р-уровень составляет 19,75 %. Это показывает, что модель с вероятностью 0,1975 будет являться лишь случайным совпадением для данной выборки.

Таблица 6

Оценка модели

Множественный коэффициент корреляции, R	0,994
Множественный коэффициент детерминации, R ²	0,988
Скорректированный коэффициент корреляции, R	0,921
F-критерий	14,316
р-уровень	0,197

В табл. 7 приведены коэффициенты регрессии модели. Статистическая значимость (р-уровень) у коэффициентов несильно хорошая и колеблется в пределах от 18,21 до 78,3 %. Это показывает, что каждый найденный коэффициент с вероятностью, равной соответствующему ему р-уровню, будет говорить, что найденная зависимость является лишь случайной особенностью данной выборки. Аналогичные результаты отображает t-критерий Стьюдента. У половины коэффициентов он высок, что говорит о достаточной статистической значимости этих коэффициентов. В соответствии с этим оценены коэффициенты β . Данный коэффициент оценивает меру чувствительности одной переменной к другой переменной. Это означает, что наиболее чувствительным для V_C будет влияние Z_V и совместное влияние $n \cdot Z_O$ и $n \cdot Z_V$, причем первые два фактора дают прямо пропорциональную зависимость, а последний – обратно пропорциональную. Чувствительность V_C к остальным факторам достаточно мала. Квадратичная связь между зависимой и независимыми переменными не обнаружена.

Таблица 7

Коэффициенты модели

Коэффициенты модели	V_C , % Param	V_C , % T	V_C , % p	V_C , % Beta
Св. член	4.36	0.76	0.58	-
n	-0.005	-0.73	0.59	-0.34
Z_O	-0.73	-0.99	0.50	-0.49
Z_V	2.78	1.87	0.31	0.94
$n \cdot Z_O$	0.002	3.39	0.18	1.70
$n \cdot Z_V$	-0.003	-2.54	0.23	-1.27
$Z_O \cdot Z_V$	-0.05	0.35	0.78	0.16

Статистическая значимость (р-уровень) у всех коэффициентов находится в пределах 0,1–0,7, что говорит о высокой статистической значимости рассматриваемых коэффициентов. В соответствии с этим оценены коэффициенты Beta, показывающие, что все параметры практически в равной степени влияют на V_C .

Сложив коэффициенты (параметры модели Param) из табл. 7, получаем итоговую регрессионную модель (уравнение регрессии), позволяющую прогнозировать значения зависимой переменной V_C :

$$V_C = 4,36 - 0,005 \cdot n - 0,73 \cdot Z_O + 2,78 \cdot Z_V + 0,002 \cdot n \cdot Z_O - 0,003 \cdot n \cdot Z_V - 0,05 \cdot Z_O \cdot Z_V. \quad (6)$$

Используя данную модель, можно сравнить наблюдаемые значения (полученные в ходе эксперимента) зависимой переменной с предсказанными (полученные с помощью математической модели). Результат сравнения приведен в табл. 8.

Разница наблюдаемых и предсказанных значений оценена с помощью относительной погрешности по формуле (5).

Таблица 8

Сравнение наблюдаемых и предсказанных значений

№	V_C , % Наблюдаемые	V_C , % Модельные	Относительная погрешность, %
1	5,92	6,23	5,29
2	8,56	8,24	3,66
3	9,37	9,05	3,34
4	11,2	11,51	2,80
5	5,6	5,28	5,60
6	3,79	4,10	8,27
7	12,06	12,37	2,60
8	11,95	11,63	2,62

Из табл. 8 видно, что остатки от сравнения достаточно малы, следовательно, модель можно использовать для предсказания значений зависимой переменной, а также среднее значение относительной погрешности составляет 4,27 %. Ввиду приведенных выше рассуждений модель, полученная в ходе исследования, может считаться адекватной и может быть использована для дальнейшего тестирования.

Третья модель получена с помощью инструмента «Множественная регрессия», модуля «Общие регрессионные модели».

В табл. 9 приведены оценки модели. Коэффициент корреляции (R), равный 0,885, имеет высокое значение, что говорит о сильной взаимосвязи между зависимой и независимыми переменными. Коэффициент детерминации (R²) данной модели, равный 0,784, также достаточно высок. Из этого следует, что доля дисперсии зависимой переменной, объясняемая рассматриваемой моделью зависимости, равна 78,4 %. F-критерий Фишера имеет небольшое значение (F = 4,84), следовательно, можно с небольшой точностью утверждать, что модель является адекватной и может быть использована для принятия решений к осуществлению прогнозов. Рассматриваемая модель является статистически значимой, так как р-уровень составляет 8,08 %. Это показывает, что модель с вероятностью 0,0808 будет являться лишь случайным совпадением для данной выборки.

Оценка модели

Таблица 9

Множественный коэффициент корреляции, R	0,88
Множественный коэффициент детерминации, R ²	0,87
Скорректированный коэффициент корреляции, R	0,62
F-критерий	4,84
p-уровень	0,08

В табл. 10 приведены коэффициенты регрессии модели. Статистическая значимость (p-уровень) у коэффициентов несильно хорошая и колеблется в пределах от 66,66 до 89,19 %. Это показывает, что каждый найденный коэффициент с вероятностью, равной соответствующему ему p-уровню, будет говорить, что найденная зависимость является лишь случайной особенностью данной выборки. Лишь у одного коэффициента, Z₀, p-уровень достаточно низкий – 1,95 %. Аналогичные результаты отображает t-критерий Стьюдента. В соответствии с этим оценены коэффициенты β. Данный коэффициент оценивает меру чувствительности одной переменной к другой переменной. Наибольшую чувствительность V_c проявляет к изменению параметра Z₀.

Таблица 10

Коэффициенты модели

Коэффициенты модели	V _c , % Param	V _c , % Г	V _c , % p	V _c , % Beta
Св. член	0,55	0,14	0,98	-
n	-0,001	-0,3	0,77	-0,06
Z ₀	1,29	3,77	0,01	0,87
Z _v	0,31	0,46	0,66	0,1

Статистическая значимость (p-уровень) у всех коэффициентов находится в пределах 0,01–0,9, что говорит о высокой статистической значимости рассматриваемых коэффициентов. В соответствии с этим оценены коэффициенты Beta, показывающие, что все параметры практически в равной степени влияют на V_c.

Сложив коэффициенты (параметры модели Param) из табл. 10, получаем итоговую регрессионную модель (уравнение регрессии), позволяющую прогнозировать значения зависимой переменной V_c:

$$V_c = 0,55562 - 0,00103 \cdot n + 1,29437 \cdot Z_0 + 0,31875 \cdot Z_v \quad (7)$$

Используя данную модель, можно сравнить наблюдаемые значения (полученные в ходе эксперимента) зависимой переменной с предсказанными (полученные с помощью математической модели). Результат сравнения приведен в табл. 11. Разница наблюдаемых и предсказанных значений оценена с помощью относительной погрешности по формуле (5).

Из табл. 11 видно, что остатки от сравнения невелики, следовательно, модель можно использовать для предсказания значений зависимой переменной, а также среднее значение относительной погрешности составляет 16,01 %. Ввиду приведенных выше рассуждений модель, полученная в ходе исследования, может считаться адекватной и может быть использована для дальнейшего тестирования.

Таблица 11

Сравнение наблюдаемых и предсказанных значений

№	V _c , % Наблюдаемые	V _c , % Модельные	Относительная погрешность, %
1	5,92	5,85	1,09
2	8,56	6,49	24,15
3	9,37	11,03	17,74
4	11,2	11,67	4,19
5	5,6	5,44	2,81
6	3,79	6,08	60,42
7	12,06	10,62	11,94
8	11,95	11,25	5,79

Анализ полученных моделей показывает, что наиболее адекватно описывает процесс смешивания при полученной мучной хлебопекарной смеси, модель получена при помощи инструмента «Регрессия поверхности отклика», поскольку значение средней относительной погрешности составило 4,27 %.

По полученной модели № 2 видно, что наибольшее влияние на коэффициент неоднородности оказывает количество витков и частота вращения, а самое минимальное влияние оказывает число отверстий на витках.

Следующий этап исследований посвящен практическому применению центробежно-шнекового смесителя и анализу пробной партии мучной хлебопекарной смеси и образцу полученного хлеба.



Рис. 4. Хлеб, приготовленный из мучной хлебопекарной смеси

Литературный обзор показал, что целесообразнее применять центробежно-шнековый смеситель для обогащения мучных смесей различными компонентами [3, 6], однако среднее время нахождения муки в аппарате не превышало 5–6 секунд, что недостаточно для перемешивания компонентов, находившихся в смеси в малом объеме, в результате чего качество полученной смеси несколько

ухудшалось. В предложенном нами аппарате установлен шнек, который осуществляет обратную рециркуляцию компонентов мучной смеси, тем самым увеличил их время нахождения в аппарате, доводя готовую смесь до более однородного состояния, в результате этого повышается качество получаемой мучной смеси. На его основе была произведена выпечка хлебобулочных изделий для питания спортсменов (рис. 4), физико-химические показатели которых приведены в табл. 12.

Таблица 12

Физико-химические показатели хлеба для питания спортсменов из мучной хлебопекарной смеси

Наименование показателя	Значение показателя
Удельный объем, см ³ /г	3,0-3,2
Пористость, %	76-78
Кислотность, град	2,0-2,5
Влажность, %	42-43
Общая деформация сжатия мякиша, ед. приб.	78-80

Рассчитана пищевая ценность хлебобулочного изделия и степень покрытия суточной потребности в пищевых веществах спортсмена за счет употребления 300 г хлеба в сутки. Суточная потребность в белке в среднем покрывается на 14,5 %, в углеводах – на 35 %.

Далее провели анализ биологической ценности полученного хлеба. Для этого определили фактический аминокислотный состав изделия, приготовленного из мучной хлебопекарной смеси. В качестве контрольного образца был взят хлеб, приготовленный из муки первого сорта без добавок. Результаты сравнительного анализа аминокислотного сора изделий представлены на рис. 5.

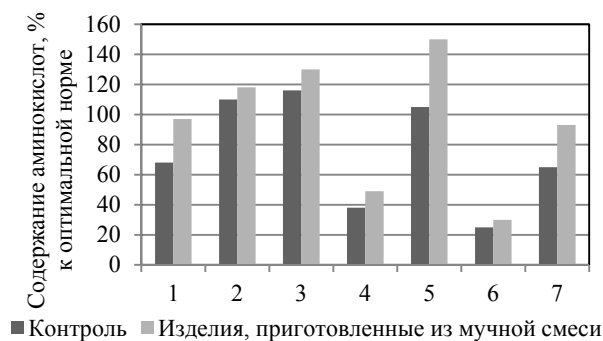


Рис. 5. Аминокислотный сора изделий, приготовленных из мучной хлебопекарной смеси:

- 1 – изолейцин; 2 – лейцин; 3 – лизин; 4 – валин;
5 – треонин; 6 – метионин + цистин;
7 – фенилаланин + тирозин

Анализ гистограммы аминокислотного сора изделий, приготовленных из мучной хлебопекарной смеси, показал, что содержание лимитирующих для хлеба незаменимых аминокислот увеличилось. По сравнению с контролем аминокислотный сора изолейцина увеличился до 41 %, лейци-

на – до 9 %, лизина – до 10 %, валина – до 26 %, треонина – до 43 %, метионина и цистина – до 30 %, фенилаланина и тирозина – до 38 %, что свидетельствует о повышении биологической ценности данных изделий.

Известно, что глицин замедляет дегенерацию мышечной ткани (так как является источником креатина – вещества, содержащегося в мышечной ткани и используемого при синтезе ДНК и РНК), повышает выносливость и вызывает прилив сил, так как является одной из немногих аминокислот, которые способны оптимизировать усвоение сахара в организме. В опытном образце его количество возросло до 30 %.

Для установления хранимостойкости смеси провели ее закладку на хранение (при температуре +20–25 и влажности воздуха 40–60 %, изолировав от источников сильного нагрева или охлаждения) сроком на 5 месяцев. Смеси упаковывали в полипропиленовые пакеты и запаивали их на упаковочной машине.

Каждый месяц проводили выпечку и контролировали физико-химические показатели (удельный объем, пористость, влажность, кислотность, общую деформацию сжатия мякиша хлеба) и органолептические показатели. Для оценки органолептических показателей качества хлебобулочных изделий в отделе технологии ФГБНУ НИИ хлебопекарной промышленности проведены 5 дегустационных совещаний.

Изделия оценивали по пятибалльной системе по показателям: форма, поверхность, состояние мякиша, цвет, вкус и запах.

Средняя дегустационная оценка составила: после изготовления – 5; через 1 месяц – 5 баллов; через 2 месяца – 4,92 балла; через 3 месяца – 4,93 балла; через 4 месяца – 4,5 балла; через 5 месяцев – 4,3 балла.

На 4-й месяц хранения в изделиях появлялся привкус горечи.

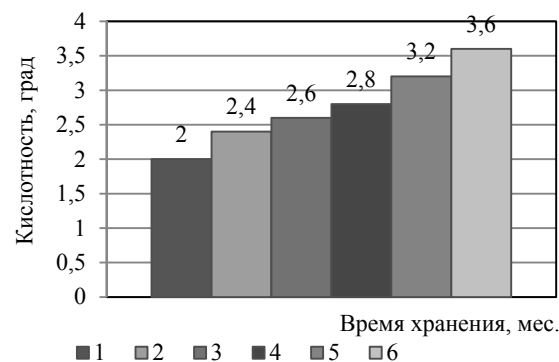


Рис. 6. Динамика кислотности хлебобулочных изделий в процессе хранения мучной хлебопекарной смеси:
1 – начальная точка; 2 – через 1 месяц хранения;
3 – через 2 месяца хранения; 4 – через 3 месяца хранения;
5 – через 4 месяца хранения; 6 – через 5 месяцев хранения

Показатели изменения кислотности изделий, приготовленных из смеси через 1, 2, 3, 4 и 5 месяцев, приведены на рис. 6.

Установлено, что в процессе хранения смеси незначительно изменялись все показатели качества. В наибольшей степени увеличивалась кислотность – на 80 % по сравнению с начальной. Вероятно, это обусловлено окислительными процессами, протекающими в липидах сырья, входящего в рецептуру смеси. По результатам физико-химических анализов и дегустаций опытных образцов принято решение установить срок годности смеси не более 4 месяцев.

Выводы

1. Наилучшее качество смешивания $V_C = 3,79\%$ достигается при рациональных конструкторских параметрах работы смесителя: частоте вращения $n = 900$ об/мин, количестве витков $Z_V = 4$ и количестве отверстий на витках $Z_O = 4$.

2. Наиболее адекватно описывает процесс смешивания модель «Регрессия поверхности отклика» с общей относительной погрешностью $V_C = 4,27\%$, из которой видно, что наибольшее влияние на ко-

эффициент неоднородности оказывает количество витков и частота вращения рабочего органа, а самое минимальное значение оказывает число отверстий на витках.

3. Методом пробных лабораторных выпечек установлено оптимальное соотношение рецептурных компонентов в мучной хлебопекарной смеси.

4. Выявлено, что суточная потребность спортсмена в белке в среднем покрывается на 14,5 %, в углеводах – на 35 % за счет употребления 300 г хлеба, приготовленного из мучной хлебопекарной смеси.

5. Анализ аминокислотного скора хлеба, приготовленного из мучной хлебопекарной смеси, показал, что содержание лимитирующих для хлеба незаменимых аминокислот увеличивалось от 9 до 43 % по сравнению с контрольным образцом без добавок.

6. По результатам физико-химических анализов и дегустаций опытных образцов хлеба через 1, 2, 3, 4 и 5 месяцев хранения мучных хлебопекарных смесей установлен ее срок годности – не более 4 месяцев.

Список литературы

1. Борисова, О.О. Питание спортсменов: зарубежный опыт и практические рекомендации. – М., 2007. – 132 с.
2. Бородулин, Д.М. Развитие смесительного оборудования центробежного типа для получения сухих и увлажненных комбинированных продуктов: монография / Д.М. Бородулин, В.Н. Иванец; Кемеровский технологический ин-т пищевой пром-сти. – Кемерово, 2012.
3. Бородулин, Д.М. Применение смесителя непрерывного действия для витаминизации муки / Д.М. Бородулин, О.В. Салищева, А.А. Андрюшков // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2012. – № 9. – С. 58–61.
4. Бородулин, Д.М. Исследование функционирования центробежного смесителя для непрерывного действия методом множественного регрессионного анализа / Д.М. Бородулин, А.Б. Шушпанников, Л.А. Войтикова // Техника и технология пищевых производств. – 2012. – № 1. – С. 48–54.
5. Грачев, Ю.П. Математические методы планирования экспериментов / Ю.П. Грачев. – М.: Пищевая промышленность, 1969. – 315 с.
6. Разработка и исследование центробежного смесителя непрерывного действия для получения смесей спортивного питания / В.Н. Иванец [и др.] // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. – 2015. – № 1. – С. 48–55.
7. Казанцева, И.Л. Нутовая мука – перспективный и безопасный ингредиент пищевых систем // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2014. – № 5–6. – С. 13–16.
8. Кацерикова, Н.В. Кунжут как источник кальция в рационе лиц пожилого возраста / Н.В. Кацерикова, Ю.С. Липатова // Пищевая промышленность. – 2009. – № 2. – С. 48–49.
9. Климова, Е.В. Характеристика продуктов переработки овса как необходимых компонентов рационального питания человека // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. – 2007. – № 1. – С. 38.
10. Невская, Е.В. Оптимизация рецептурного состава хлебобулочных изделий для спортивного питания / Е.В. Невская, Л.А. Шлеленко, Д.М. Бородулин // Техника и технология пищевых производств. – 2015. – № 1 (36). – С. 60–64.
11. Пат. 148608 РФ, МПК В01F 7/00. Центробежно-шнековый смеситель / Бородулин Д.М., Ратников С.А., Киселев Д.И., Сухоруков Д.В., Железковский А.Е.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности» (Ru). – № 2013137989/05; заявл. 13.08.13; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.
12. Полиевский, С.А. Основы индивидуального и коллективного питания спортсменов. – М.: Физкультура и спорт, 2005. – С. 384.
13. Ivanets, V.N., Borodulin D.M., Shushpannikov D.V. Intensification of bulk material mixing in new designs of drum, vibratory and centrifugal mixers. // Foods and Raw Materials. 2015. № 3 (1). С. 62-69.

ANALYSIS OF CENTRIFUGAL SCREW MIXER OPERATION APPLYING MULTIPLE REGRESSION METHOD WHEN OBTAINING BAKER'S FLOUR MIX TO PRODUCE BAKERY PRODUCTS FOR SPORTSMEN

D.M. Borodulin^{1,*}, E.V. Nevskaya², D.I. Kiselev¹, L.A. Shlelenko², M.N. Potapova¹

¹Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University),
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia

²Research Institute of Baking Industry,
26A, B. Cherkizovskaya Str., Moscow, 107553, Russia

*e-mail: borodulin_dmitri@list.ru

Received: 10.03.2016

Accepted: 25.04.2016

Currently, many regions of the Russian Federation including the Kemerovo region face serious problems with food products quality. Foods having a low content of essential macro- and micronutrients fill the grocery market. Therefore, enrichment of foods with amino acids, omega-3 and omega-6 polyunsaturated fatty acids, vitamins, minerals, etc. is an urgent task. A centrifugal screw mixer for bulk materials with selected rational operation parameters used for the enrichment of flour mix with vitamins and other beneficial substances was developed in the laboratory of the department "Technological design of food production" at Kemerovo Technological Institute of Food Industry (University). Analyzing the mixing process applying a multiple regression method, we have found that "Regression response surface" most accurately describes the process and that the number of screw flights and the frequency of the operation element rotation influence the quality of mixing significantly. Investigations on the optimization of the qualitative and quantitative ingredient composition of baker's flour mix have been done at Research Institute of Baking Industry. Biological value of bread baked from the developed flour mix was analyzed, and it was found that its amino acid score had increased from 9 to 43% compared to the control additive-free sample. The shelf life for baker's flour mix has been established.

Centrifugal screw mixer, regression analysis, quality of mixing, heterogeneity of the mix, multiple regression, rational parameters, biological value, baker's flour mix

References

1. Borisova O.O. *Pitanie sportmenov: zarubezhnyy opyt i prakticheskie rekomendatsii* [Power athletes: international experience and best practices]. Moscow, "Sovetskiy sport" Publ., 2007. 132 p.
2. Borodulin D.M., Ivanets V.N. *Razvitie smesitel'nogo oborudovaniya tsentrobezhnogo tipa dlya polucheniya sukhikh i uvlazhnennykh kombinirovannykh produktov* [The development of mixing equipment of centrifugal type for reception of dry and moist combination products]. Kemerovo, KemIFST Publ., 2012. 178 p.
3. Borodulin D.M., Salishcheva O.V., Andryushkov A.A. *Primenenie smesitelya nepreryvnogo deystviya dlya vitaminizatsii muki* [The use of a mixers centrifugal type for vitaminise of flour]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya* [Storage and processing of farm products], 2012, no. 9, pp. 58–61.
4. Borodulin D.M., Shushpannikov A.B., Voytikova L.A. *Issledovanie funktsionirovaniya tsentrobezhnogo smesitelya nepreryvnogo deystviya metodom mnozhestvennogo regressionnogo analiza* [Research of functioning of the centrifugal mixer of continuous action by the method of multiple regression analysis]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Food Processing: Techniques and Technology], 2012, no. 1, pp. 98–103.
5. Grachev Yu.P. *Matematicheskie metody planirovaniya eksperimentov* [Mathematical methods of planning experiments]. Moscow, Food Industry Publ., 1969. 315 p.
6. Ivanets V.N., Borodulin D.M., Sukhorukov D.V., Chechko S.G. *Razrabotka i issledovanie tsentrobezhnogo smesitelya nepreryvnogo deystviya dlya polucheniya smesey sportivnogo pitaniya* [Design and research of centrifugal continuous mixer for mixtures for sports nutrition]. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya: Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv* [Scientific journal NRU ITMO. Series "Processes and Food Production Equipment"]. 2015, no. 1, pp. 48–55.
7. Kazantseva I.L. *Nutovaya muka – perspektivnyy i bezopasnyy ingredient pishchevykh sistem* [Chickpeas flour - a promising and safe food ingredient systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya* [Transactions of Higher Educational Institutions, Food Technology], 2014, no. 5–6, pp. 13–16.
8. Katserikova N.V., Lipatova Yu.S. *Kunzhut kak istochnik kal'tsiya v ratsionno lits pozhilogo vozrasta* [Sesame as a source of calcium in the diet of elderly]. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food industry], 2009, no. 2, pp. 48–49.
9. Klimova E.V. *Kharakteristika produktov pererabotki ovsa kak neobkhodimykh komponentov ratsional'nogo pitaniya che-loveka* [Characteristics of oats processed products as a necessary component of human nutrition]. *Pishchevaya i pererabatyvayushchaya promyshlennost'. Referativnyy zhurnal* [Food and processing industry. Abstract Journal], 2007, no. 1, pp. 38.
10. Nevskaya E.V., Shlelenko L.A., Borodulin D.M. *Optimizatsiya retsepturnogo sostava khlebobulochnykh izdeliy dlya sportivnogo pitaniya* [Optimization of the recipe composition of bakery products for sports nutrition]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Food Processing: Techniques and Technology], 2015, no. 1, pp. 60–64.
11. Borodulin D.M., Ratnikov S.A., Kiselev D.I., Sukhorukov D.V., Zhelezovsky A.E. *Centrobezhno - shnekovyy smesitel'* [Centrifugaal screw mixer]. Patent RF, no. 148608, 2014.
12. Polievskiy S.A. *Osnovy individual'nogo i kollektivnogo pitaniya sportmenov* [Their individual and collective power athletes]. Moscow, "Fizkul'tura i sport" Publ., 2005. 384 p.

13. Ivanets V.N., Borodulin D.M., Shushpannikov A.B., Sukhorukov D.V. Intensification of bulk material mixing in new designs of drum, vibratory and centrifugal mixers. *Foods and Raw Materials*, 2015, vol. 3, no. 1, pp. 62–69. DOI: 10.12737/11239.

Дополнительная информация / Additional Information

Анализ функционирования центробежно-шнекового смесителя методом множественной регрессии при получении мучной хлебопекарной смеси для приготовления хлебобулочных изделий для питания спортсменов / Д.М. Бородулин, Е.В. Невская, Д.И. Киселев, Л.А. Шлеленко, М.Н. Потапова // Техника и технология пищевых производств. – 2016. – Т. 41. – № 2. – С. 91–100.

Borodulin D.M., Nevskaya E.V., Kiselev D.I., Shlelenko L.A., Potapova M.N. Analysis of centrifugal screw mixer operation applying multiple regression method when obtaining baker's flour mix to produce bakery products for sportsmen. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2016, vol. 41, no. 2, pp. 91–100 (in Russ.).

Бородулин Дмитрий Михайлович

д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой технологического проектирования пищевых производств, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47, тел.: +7 (3842) 39-68-37, e-mail: borodulin_dmitri@list.ru

Невская Екатерина Владимировна

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности», 107553, Россия, г. Москва, ул. Б. Черкизовская, д. 26а, тел.: +7 (499) 780-72-92

Киселев Дмитрий Игоревич

аспирант кафедры технологического проектирования пищевых производств, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47, тел.: +7 (3842) 39-68-37, e-mail: Eidos-92@mail.ru

Шлеленко Лариса Андреевна

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности», 107553, Россия, г. Москва, ул. Б. Черкизовская, д. 26а, тел.: +7 (499) 780-72-92

Потапова Мария Николаевна

канд. техн. наук, доцент кафедры технологического проектирования пищевых производств, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47, тел.: +7 (3842) 39-68-68

Dmitriy M. Borodulin

Dr.Sci.(Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Technological Design of Food Production, Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-37, e-mail: borodulin_dmitri@list.ru

Ekaterina V. Nevskaya

Cand.Sci.(Eng.), Leading Researcher, State Scientific Institution Research Institute of the Baking Industry, 26A, B. Cherkizovskaya Str., Moscow, 107553, Russia, phone: +7 (499) 780-72-92

Dmitriy I. Kiselev

Postgraduate of the Department of Technological Design of Food Production, Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-37, e-mail: Eidos-92@mail.ru

Larisa A. Shlelenko

Cand.Sci.(Eng.), Leading Researcher, State Scientific Institution Research Institute of the Baking Industry, 26A, B. Cherkizovskaya Str., Moscow, 107553, Russia, phone: +7 (499) 780-72-92

Marya N. Potapova

Dr.Sci.(Eng.), Associate Professor of the Department of Technological Design of Food Production, Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-68

