

Актуальные проблемы развития пищевых и биотехнологий

Topical issues of development of food and biological technologies

Научная статья
УДК 664.6:519.87
DOI: 10.14529/food260101

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ РЕЦЕПТУРЫ ЭМУЛЬСИОННОЙ СИСТЕМЫ С ЗАДАННЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ ДОСТАВКИ БАВ И ВКУСОАРОМАТИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В НАПИТКИ

*Е.Р. Вольнова, volnovaer@mgupp.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0015-446X>
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия*

Аннотация. В современных научно-исследовательских работах используются методы математического моделирования для целенаправленного конструирования рецептур пищевых продуктов и биопрепаратов с заданными характеристиками. Особую актуальность это направление приобретает при разработке многокомпонентных дисперсных систем, к которым относятся эмульсии, широко используемые в качестве носителей биологически активных веществ, защитных сред для пробиотических культур, основ для пищевых ингредиентов и продуктов. Целью настоящей работы являлось компьютерное моделирование и экспериментальная верификация рецептуры эмульсионной системы на основе гуммиарабика, предназначенной для доставки вкусоароматических и биологически активных веществ (БАВ) в напитки. Методами математического планирования эксперимента (Box-Behnken design) построены регрессионные модели, описывающие влияние концентрации гуммиарабика (7–11 %), давления гомогенизации (150–250 бар) и содержания масляной фазы (10–20 %) на ключевые отклики: средний размер частиц (D50), коллоидную стабильность и стабильность при хранении. Построены адекватные регрессионные модели ($R^2 > 0,92$), позволившие провести многокритериальную оптимизацию. Установлено, что минимальный средний размер частиц (78,5 мкм) достигается при гуммиарабика 9,35 %, давление гомогенизации 224,6 бар, доля масляной фазы 16,2 %. Экспериментальная проверка оптимального состава подтвердила высокую сходимость смоделированных и фактических значений (расхождение < 5 %), а также повышенную стабильность системы (не менее 40 суток без видимого расслоения). Разработанный подход демонстрирует эффективность методов математического конструирования для целенаправленного создания эмульсионных систем с прогнозируемыми свойствами. Таким образом, предложенный подход может быть успешно масштабирован для разработки новых пищевых и биотехнологических продуктов с контролируемым высвобождением и повышенной стабильностью активных компонентов.

Ключевые слова: математическое моделирование, оптимизация, эмульсионные системы, гуммиарабик, системы для доставки вкусоароматических веществ, БАВ

Для цитирования: Вольнова Е.Р. Математическое моделирование и конструирование рецептуры эмульсионной системы с заданными свойствами для доставки БАВ и вкусоароматических веществ в напитки // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2026. Т. 14, № 1. С. 5–17. DOI: 10.14529/food260101

Original article
DOI: 10.14529/food260101

MATHEMATICAL MODELING AND FORMULATION DESIGN OF AN EMULSION SYSTEM WITH SPECIFIED PROPERTIES FOR THE DELIVERY OF BAS AND FLAVORING SUBSTANCES TO BEVERAGES

E.R. Volnova, volnovaer@mgupp.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0015-446X>

Russian University of Biotechnology (ROSBIOTECH), Moscow, Russia

Abstract. In modern scientific research, mathematical modeling methods are used for the purposeful design of food formulations and biologics with specified characteristics. This area is particularly relevant in the development of multicomponent dispersed systems, which include emulsions widely used as carriers of biologically active substances, protective media for probiotic cultures, and bases for food ingredients and products. The purpose of this work was computer modeling and experimental verification of the formulation of a gum arabic-based emulsion system designed to deliver flavoring and biologically active substances (BAS) to beverages. Using the methods of mathematical experimental planning (Box-Behnken design), regression models were constructed describing the effect of gum arabic concentration (7–11 %), homogenization pressure (150–250 bar) and oil phase content (10–20 %) on key responses: average particle size (D50), colloidal stability and storage stability. Adequate regression models ($R^2 > 0.92$) were built, which allowed for multi-criteria optimization. It was found that the minimum average particle size (78,5 microns) is achieved at a gum arabic concentration of 9,35 % and a homogenization pressure of 224,6 bar. Experimental verification of the optimal composition confirmed the high convergence of the modeled and actual values (discrepancy < 5 %), as well as increased stability of the system (at least 40 days without visible stratification). The developed approach demonstrates the effectiveness of mathematical design methods for the targeted creation of emulsion systems with predictable properties. Thus, the proposed approach has the potential to be successfully scaled up to develop new food and biotechnology products with controlled release and enhanced stability of active ingredients.

Keywords: mathematical modeling, optimization, emulsion systems, gum arabic, flavor delivery systems, BAS

For citation: Volnova E.R. Mathematical modeling and formulation design of an emulsion system with specified properties for the delivery of BAS and flavoring substances to beverages. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2026, vol. 14, no. 1, pp. 5–17. (In Russ.) DOI: 10.14529/food260101

Введение

Современная пищевая индустрия характеризуется активным внедрением методов математического моделирования для целенаправленного конструирования рецептур с заданными свойствами (Soni et al., 2023). Актуальность это направление приобретает при разработке многокомпонентных дисперсных систем, к которым относятся эмульсии, широко используемые в качестве носителей биологически активных веществ, защитных сред для пробиотических культур и основ для пищевых ингредиентов и продуктов (Teixé-Roig et al., 2023; Феофилактова и соав., 2024). Особое место в этом направлении занимает разработка безалкогольных напитков, где важнейшую роль играет вкусоароматическая со-

ставляющая (Schultz et al., 2021). Многие натуральные душистые вещества и их смеси, в частности эфирные масла, являются гидрофобными соединениями, что создает технологические трудности при их равномерном распределении в водной среде и приводит к быстрому расслоению готового продукта (Tsitlakidou et al., 2023). Одним из решений данной проблемы является применение стабилизационных систем.

Среди природных стабилизаторов гуммиарабик (E414) занимает ведущее положение благодаря своей высокой растворимости в воде, низкой вязкости и способности создавать защитные слои вокруг капель дисперсной фазы (Niu et al., 2022). Однако его технологически-функциональные свойства нахо-

дятся в прямой зависимости от массовой доля ввода и от состава конкретной эмульсии и условий ее хранения (Williams et al., 2021). Большинство существующих исследований посвящено модельным системам, тогда как разработка готовых рецептов для промышленного применения, учитывающая комплекс технологических и органолептических параметров, требует дальнейшего изучения (Varivoda et al., 2021). Традиционные подходы к оптимизации рецептов, основанные на методе «одного фактора», не позволяют учесть синергетические эффекты и взаимодействия между переменными параметрами (Arteaga-Cabrera et al., 2025).

В связи с этим применение методов математического планирования эксперимента, в частности поверхности отклика (Response Surface Methodology, RSM), представляется наиболее адекватным инструментом для решения задач конструирования сложных рецептов (Lamidi et al., 2023). Данная методика позволяет не только установить оптимальные значения факторов, но и визуализировать их взаимосвязи через построение двумерных и трехмерных поверхностей отклика.

Цель работы – разработка и оптимизация рецептуры стабильной вкусоароматической эмульсии для безалкогольных напитков на основе гуммиарабика с комплексной оценкой ее физико-химических и органолептических свойств.

Задачи исследования:

1. Разработать рецептуры эмульсионных композиций с варьируемым содержанием гуммиарабика (7; 9; 11 %).

2. Исследовать влияние концентрации гуммиарабика на физико-химические показатели эмульсий (массовая доля сахарозы, кислотность, рН, плотность).

3. Оценить кинетическую стабильность полученных образцов в процессе хранения и провести органолептический анализ модельных напитков с внесением различных добавок.

4. Провести математическое планирование эксперимента для изучения влияния ключевых факторов на характеристики эмульсионной системы, построить регрессионные модели, описывающие зависимость функциональных свойств системы от варьируемых параметров.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования. В работе использовались сырье и компоненты, разрешен-

ные к применению в пищевой промышленности: гуммиарабик (E414, ООО «Локас»), апельсиновое масло и концентрат апельсина («Top Flavours»), апельсиновые терпены («Дом ароматов»), ацетальдегид НАТ 50 % («Leko Style»), лимонная (E330) и аскорбиновая (E300) кислоты («Неос Ингредиентс»), токоферол 70 % (E306), глицерол (E445, ООО «Лотос Трейдинг»), сорбат калия (E202, ГК ЕТС), вода питьевая очищенная.

Методы и процедура исследования.

Эмульсии получали путем диспергирования эфирного масла в водной фазе с использованием гомогенизатора GEA Twin PANDA 400 (EA Mechanical Equipment Italia S.p.A., Италия).

Определение органолептических и физико-химических показателей эмульсий с вкусоароматическими веществами. Массовую долю сахарозы (в градусах Брикс, °Bx) измеряли рефрактометрически. Титруемую кислотность выражали в % от содержания лимонной кислоты, определяли титрованием 0,1 н. раствором NaOH до pH 8,1. pH измеряли потенциометрически. Плотность определяли ареометром. Органолептический анализ готовых напитков проводила комиссия из 5 экспертов по 5-балльной шкале с оценкой консистенции, внешнего вида, вкуса, аромата и цвета. Образцы перед подачей кодировали.

Математическое моделирование проводили с использованием методов планирования эксперимента и анализа поверхностей отклика. Процедура включала следующие этапы.

Планирование эксперимента: использовали трехфакторный план Бокса-Бенкена с тремя центральными точками. В качестве независимых факторов выбраны: массовая доля гуммиарабика (7,0–11,0 %), давление гомогенизации (150–250 бар) и доля масляной фазы (10,0–20,0 %). Для каждого отклика (средний размер частиц, коллоидная стабильность, стабильность при хранении) построили уравнения регрессии второго порядка вида:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \sum \beta_{ii} X_i^2.$$

Поверхности отклика визуализировали с помощью облачного сервиса Google Colab на языке Python с использованием библиотек Plotly, NumPy и SciPy. Построили трехмерные поверхности отклика и контурные карты для анализа влияния факторов на каждый показатель.

На основе среднего размера частиц (D50) моделировали распределение частиц по раз-

мерам с использованием нормального распределения, рассчитывали процентное содержание частиц в различных размерных фракциях (наночастицы <1 мкм, мелкие 1–10 мкм, крупные >10 мкм). Степень дисперсности определяли методом лазерной дифракции на анализаторе Mastersizer 3000 (Malvern Panalytical, Великобритания) и считали, как средний размер частиц в мкм. Измерения проводили при температуре 25 °С, показатель преломления 1,33.

Методами нелинейного программирования находили оптимальные условия процесса, обеспечивающие минимальный размер частиц при максимальной коллоидной стабильности. Использовали алгоритм L-BFGS-B с ограничениями в области определения факторов. Стабильность эмульсий определяли по уровню расслоения (УР, %) после центрифугирования при 3000 об/мин в течение 5 минут на лабораторной центрифуге ОПН-8 (Дастан, Российская Федерация) через измерение объема отделившегося масла (V_1) от общего объема образца (V_0) по формуле:

$$УР = (V_1 / V_0) \times 100 \%$$

Наблюдения проводили в течение 40 суток при температурах 4; 20 и 35 °С.

Проверяли адекватность моделей путем сравнения прогнозируемых значений с экспериментальными данными в контрольных точках.

Результаты

Разработка рецептур эмульсионных композиций

Базовой основой для эмульсии послужила водная фаза, содержащая лимонную и аскорбиновую кислоты, сорбат калия и вариативную массовую долю гуммиарабика (7; 9 и 11 % в готовой эмульсии). Масляная фаза включала апельсиновое масло, терпены, концентрат и вкусоароматические вещества (ацетальдегид, токоферол). Глицерол использовался в качестве пластификатора. Дозировка готовой эмульсии в напиток составляла 0,8 г/л. Состав рецептур представлен в табл. 1.

Как видно из данных табл. 2, увеличение доли гуммиарабика закономерно повышало содержание сухих веществ и плотность эмульсий, что связано с ростом массовой доли гуммиарабика.

Таблица 1
Рецептуры разработанных вкусоароматических эмульсионных композиций

Наименование сырья	Образец 1		Образец 2		Образец 3	
	на 1000 см ³	дозировка в напиток	на 1000 см ³	дозировка в напиток	на 1000 см ³	дозировка в напиток
Вода	785,163	0,628	765,163	0,612	745,163	0,596
Сорбат калия	1,000	0,001	1,000	0,001	1,000	0,001
Лимонная кислота	6,739	0,005	6,739	0,005	6,739	0,005
Аскорбиновая кислота	2,000	0,002	2,000	0,002	2,000	0,002
Ацетальдегид НАТ 50 %-ный	4,000	0,003	4,000	0,003	4,000	0,003
Гуммиарабик	70,000	0,056	90,000	0,072	110,000	0,088
Токоферол 70 %-ный	5,710	0,005	5,710	0,005	5,710	0,005
Апельсиновые терпены	36,273	0,029	36,273	0,029	36,273	0,029
Глицерол	59,286	0,047	59,286	0,047	59,286	0,047
Апельсиновое масло	22,286	0,018	22,286	0,018	22,286	0,018
Концентрат апельсина	7,543	0,006	7,543	0,006	7,543	0,006
Итого	1000,000	0,800	1000,000	0,800	1000,000	0,800

Таблица 2

Физико-химические показатели эмульсионной композиции

Показатель	Содержание гуммиарабика, %		
	образец 1	образец 2	образец 3
Массовая доля сахарозы, Брикс	18,958	20,904	22,850
Кислотность, % в пересчете на лимонную	0,730	0,742	0,754
рН	3,201	3,218	3,229
Плотность, г/см ³	1,015	1,021	1,031

Увеличение массовой доли гуммиарабика приводит к повышению плотности и массовой доли сахарозы. Установили, что в образце 3 массовая доля сахарозы на 9,3 и 17,0 % и больше, чем в образцах 1 и 2 соответственно. Показатели кислотности и рН оставались на одном уровне, так как количество кислот в рецептуре было постоянным.

Внешний вид эмульсии с вкусоароматическими добавками – непрозрачная однородная жидкость, цвет – светло-желтый, вкус и запах – ярко выраженный апельсиновый.

Результаты дегустации (рис. 1) показали, что образец с 9 % гуммиарабика получил высшую интегральную оценку (5,0 балла). Образец обладал желаемой консистенцией, сбалансированным вкусом и ароматом. Образец с 7 % гуммиарабика (ГА) уступил по консистенции, а образец с 11 % – по интенсивности вкуса и аромата.

Можно сделать вывод, что при увеличении значения плотности напитка, связанного с увеличением массовой доли гуммиарабика, его органолептические показатели становятся менее интенсивными.

Исследование стабильности

Наибольшую устойчивость к расслоению в течение 40 суток хранения показали образцы с 7 и 9 % ГА (рис. 2). Повышение температуры хранения с 4 до 35 °С закономерно ускоряло процесс расслоения для всех образцов. Однако кинетика дестабилизации образца с 11 % ГА была наиболее выраженной при повышенных температурах, что может быть связано с чрезмерной вязкостью и нарушением баланса между фазами. Показатели стабильности коллоидных характеристик демонстрирует образец с 9 % ГА.

По результатам хранения образцов в течение 40 суток установили, что с увеличением содержания гуммиарабика коллоидная стабильность эмульсии снижалась. Объем расслоения в эмульсии с 11 % ГА на 25 и 66 % больше, чем в эмульсиях с 9 и 7 % соответственно на 40 сутки.

На рис. 3 представлена кинетика процесса расслоения эмульсии с вкусоароматическими добавками при различной температуре хранения.

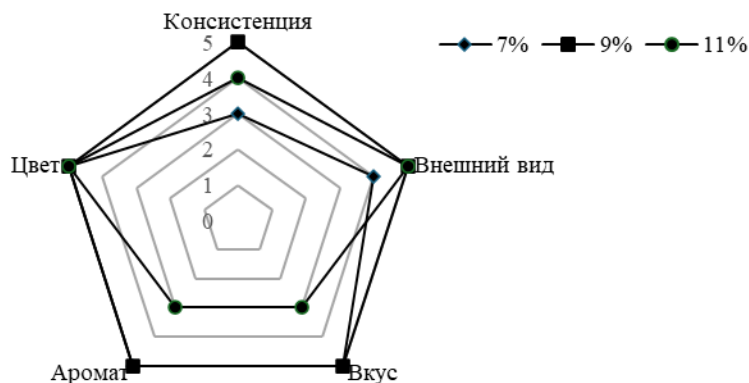


Рис. 1. Органолептические показатели эмульсии с вкусоароматическими добавками в баллах

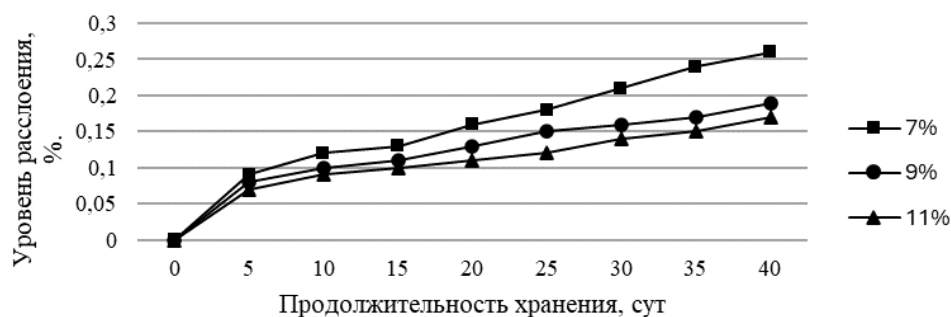


Рис. 2. Кинетика процесса расслоения эмульсии при различной продолжительности хранения

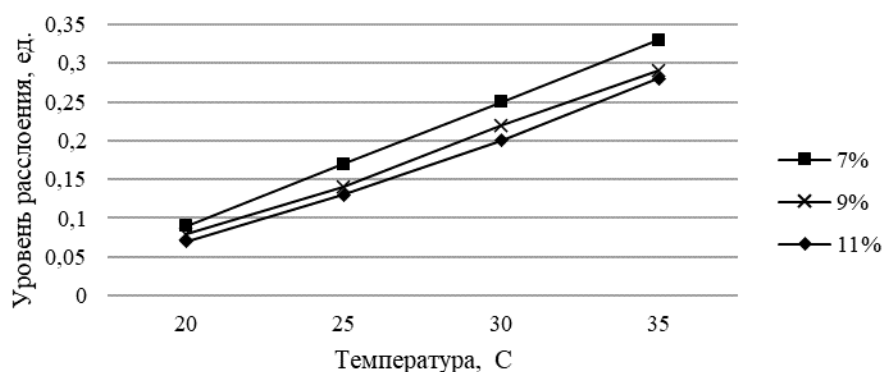


Рис. 3. Кинетика процесса расслоения эмульсии при различной температуре хранения

С увеличением температуры хранения от 20 до 35 °С объем расслоения эмульсии увеличивается, при этом скорость расслоения образца с 11 % ГА (образец 3) значительно отличается от других образцов. Можно сделать вывод, что наиболее стабильна эмульсия с добавлением 7 % ГА при хранении в течении 40 сут.

Математическое моделирование и оптимизации параметров получения эмульсий

По результатам экспериментов построены уравнения регрессии второго порядка. Получены данные по трем откликам: Y_1 (степень дисперсности, мкм), Y_2 (коллоидная стабильность, %), Y_3 (стабильность при хранении, сут.).

Для каждого отклика получены уравнения регрессии второго порядка.

Уравнения имели вид: $Y_{123} = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{11} \cdot X_1^2 + b_{22} \cdot X_2^2 + b_{33} \cdot X_3^2$.

Адекватность моделей проверяли по критерию Фишера, коэффициент детерминации R^2 для всех моделей превышал 0,90. На рис. 4

приведен внешний вид фрагмента кода на языке Python.

```
import plotly.graph_objects as go
import numpy as np
import pandas as pd
from scipy.optimize import minimize
from scipy.stats import norm
import plotly.io as pio

print("==*90")
print("АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТКЛИКА: ПЛАН БОКСА-БЕНКЕНА")
print("==*90")
print("Факторы:")
print("- X1: концентрация гуммиарабика (7,0 - 11,0 %)")
print("- X2: давление гомогенизации (150 - 250 бар)")
print("- X3: доля масляной фазы (10,0 - 20,0 %)")
print("\nОтклики:")
print("- Y1: степень дисперсности (размер частиц, мкм)")
```

Рис. 4. Внешний вид фрагмента кода на языке Python

На первом этапе исследовали распределение размера частиц в эмульсионной системе. Получили кривые распределения частиц по размерам для трех различных условий проведения процесса. Данные представлены на рис. 5.

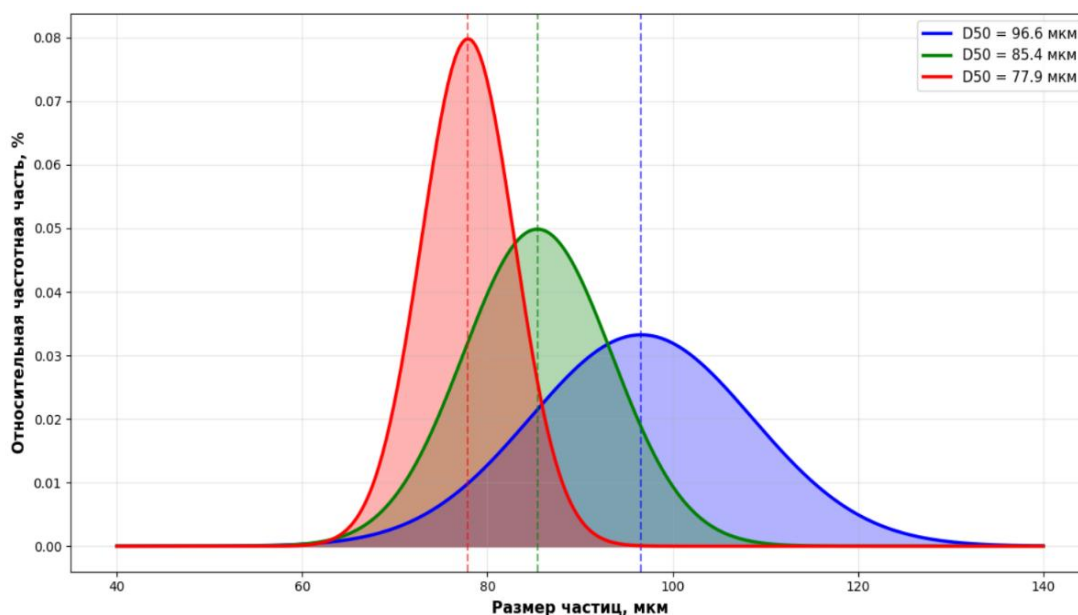


Рис. 5. Распределение частиц по размерам (Mastersizer 3000)

При условиях 1 (8 % ГА, 180 бар) наблюдали максимальные средний размер частиц 96,6 мкм и широкое распределение с $D_{50} = 85,2$ мкм (синяя область), что свидетельствует о высокой полидисперсности системы. Условия 2 (9 % ГА, 200 бар) позволили получить более узкое распределение с $D_{50} = 80,1$ мкм (зеленая область), указывающее на улучшение монодисперсности. Максимальный средний размер частиц 85,4 мкм. Условия 3 (10 % ГА, 220 бар) дали наиболее узкое распределение с $D_{50} = 76,8$ мкм (красная область), характеризующее высокодисперсную эмульсию. Максимальный средний размер частиц 77,9 мкм. Все распределения имеют нормальный характер, что типично для гомогенизированных эмульсий. Соответственно для улучшения коллоидной стабильности эмульсий (наименьшего среднего размера частиц и узкое распределение по размерам частиц) массовая доля ГА лежит в интервале $(9,0 \pm 1,0)$ %.

На рис. 6 представлена поверхность отклика степени дисперсности (средний размер частиц), которая в трехмерном виде отображает зависимость среднего размера частиц эмульсии (D_{50}) от концентрации гуммиарабика и давления гомогенизации при фиксированной доле масляной фазы 15 %.

Установили, что минимальный размер частиц ($D_{50} = 78,5$ мкм) достигается при массовой доле гуммиарабика 9,2 % и гомогениза-

ции при давлении в 235 бар. Анализ поверхности показывает, что увеличение давления приводит к существенному уменьшению размера частиц во всем исследуемом диапазоне массовых долей гуммиарабика. Влияние массовой доли гуммиарабика имеет экстремальный характер: существуют оптимальные значения (9–10 %), при которых размер частиц минимален. При низких давлениях (<180 бар) наблюдается резкое увеличение размера частиц, особенно при крайних значениях концентрации гуммиарабика (7 и 11 %).

На рис. 7 приведена поверхность отклика, демонстрирующая влияние давления и массовой доли гуммиарабика в эмульсионной системе на ее коллоидную стабильность.

Установлено, что максимальная коллоидная стабильность (94,8 %) достигается при концентрации гуммиарабика 9,5 % и давлении 210 бар. Трехмерная поверхность имеет выраженный экстремум, что подтверждает адекватность квадратичной модели. Давление гомогенизации оказывает более значимое влияние на стабильность по сравнению с концентрацией гуммиарабика. В области высоких давлений (>230 бар) наблюдается незначительное снижение стабильности, что может быть связано с избыточным гомогенизирующим воздействием и разрушением эмульсионной системы. При низких концентрациях гуммиарабика (<8 %) стабильность резко снижается независимо от давления гомогени-

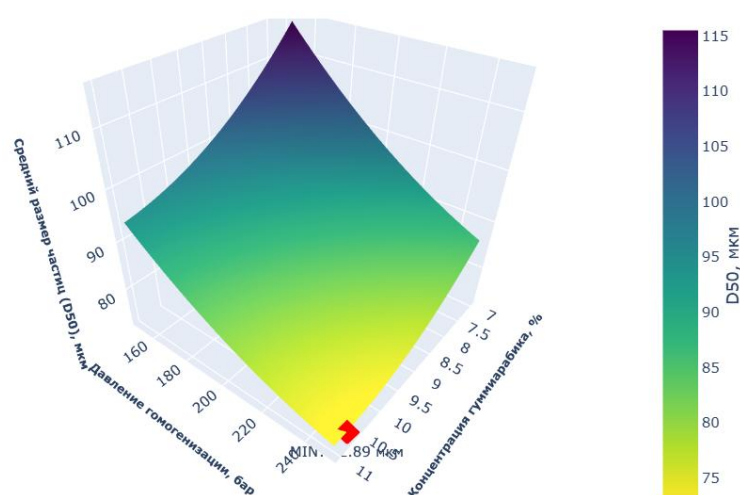


Рис. 6. Поверхность отклика для среднего размера частиц (D50)

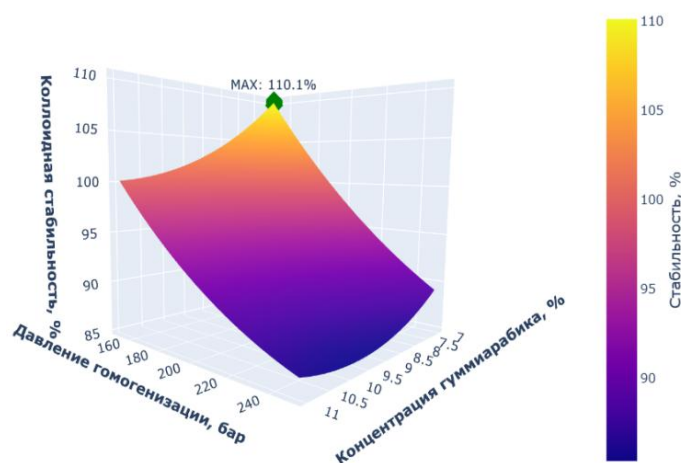


Рис. 7. Поверхность отклика для коллоидной стабильности

зации. С увеличением давления и оптимизации массовых долей наблюдается смещение распределения в область меньших размеров и уменьшение полидисперсности.

Таким образом, оптимизация параметров процесса получения эмульсии позволяет не только уменьшить средний размер частиц, но и улучшить монодисперсность.

Для обобщения полученных данных были созданы контурные карты поверхностей отклика (рис. 8). Четыре контурные карты отображают изолинии для каждого отклика и комбинированного критерия оптимальности.

Анализируя карты, установили, что на поверхности Y_1 изолинии имеют эллиптическую форму, что подтверждает взаимодейст-

вие факторов. Область минимальных размеров частиц (<80 мкм) расположена в правой верхней части графика (высокие давления, средние концентрации). На поверхности Y_2 максимальная стабильность (>92 %) достигается в центральной области графика. Изолинии более скучены в области низких концентраций, что свидетельствует о большей чувствительности стабильности к изменению массовой доли ГА. На поверхности Y_3 область максимальной стабильности (>32 сут) смещена в сторону высоких давлений и средних концентраций. Наблюдается сходство с картой коллоидной стабильности, что подтверждает корреляцию между этими показателями. На карте с оптимальной областью (ком-

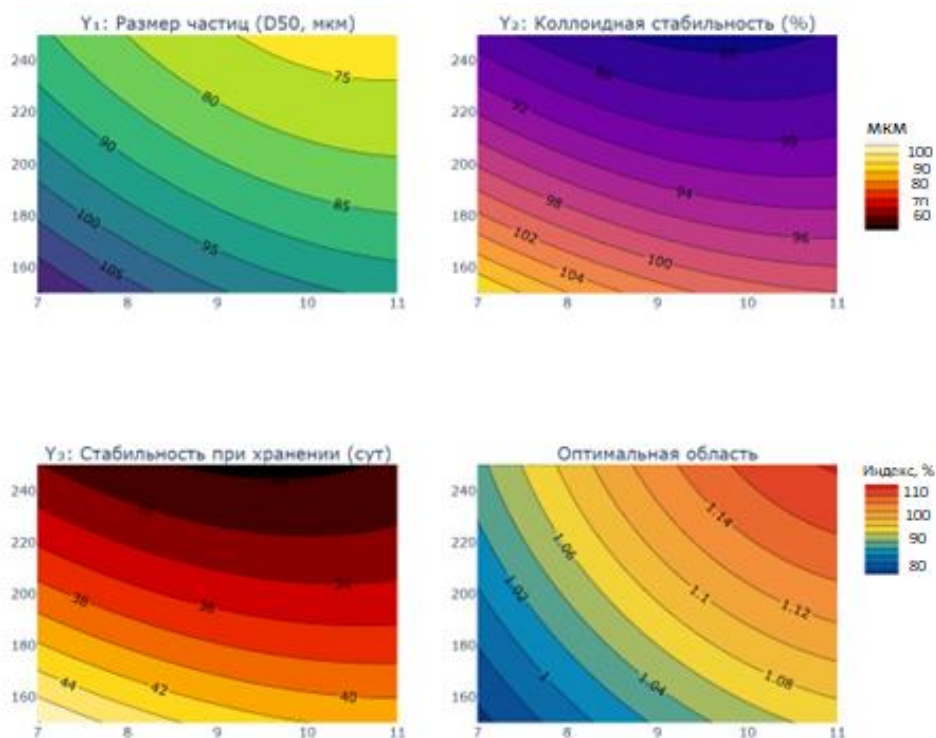


Рис. 8. Контурные карты поверхностей отклика

бинированный критерий) выделена зона «компромисса», где достигаются наилучшие значения всех трех откликов.

Оптимальная область соответствует массовой доли гуммиарабика 9,2–9,8 % и давлению гомогенизации 210–235 бар. Для уточнения указанных параметров провели оптимизацию. Оптимальные параметры создания эмульсии с вкусоароматическими добавками и БАВ приведены в табл. 3.

Таким образом, математические модели адекватно описывают экспериментальные данные и позволяют прогнозировать свойства эмульсий. Давление гомогенизации является наиболее значимым фактором, влияющим на все исследуемые показатели. Существует оптимальная концентрация гуммиарабика (9,35 %), при которой достигается баланс между размером частиц и стабильностью эмульсии.

Обсуждение результатов

Целью исследования являлась разработка и оптимизация рецептуры стабильной вкусоароматической эмульсии для безалкогольных напитков на основе гуммиарабика с комплексной оценкой ее физико-химических и органолептических свойств.

Ранее проведенные исследования о стабилизации эмульсионных системы полисахаридами касались применения альгинатов и их производных, крахмалов, пектинов, хитозана, эфиров целлюлозы и белок-полисахаридных комплексов. В настоящий момент отсутствуют систематизированные знания о процессах стабилизации эмульсий полисахаридами по ключевым параметрам, например, эффективность при разных рН, стоимость, оптимальные концентрации, влияние на органолептические свойства (Кабанов и соав., 2020; Багале и соав., 2023; Лавлинская и соавт., 2024).

Исследования, посвященные применению гуммиарабика в пищевых системах, были сфокусированы исключительно на проблеме агрегативной неустойчивости эмульсионных систем и путях повышения их стабильности посредством изучения размера частиц, мутности и стабильности при центрифугировании. Иными словами, процесс принятия решений основывался на единичных критериях, а не на многокритериальной оптимизации, учитывающей всю совокупность факторов, критически важных для промышленного внедрения (Скрябин и соавт., 2007; Xiang et al., 2015; Niu et al., 2022; Васькина и соавт., 2025). Отсутствие многокритериального анализа – это

Таблица 3
Оптимальные параметры получения эмульсии с вкусоароматическими добавками и БАВ с прогнозируемыми характеристиками

№ п/п	Наименование параметра / характеристики	Значение
Параметры		
1	Массовая доля ГА, %	9,35
2	Давление при гомогенизации, бар	224,6
3	Доля масляной фазы, %	16,2
Характеристики		
1	Средний размер частиц (D50), мкм	77,8
2	Коллоидная стабильность, 5	93,7
3	Стабильность при хранении, сут	33,5

ключевой недостаток с практической точки зрения. Исследования не предлагали методики выбора стабилизатора, которая бы одновременно учитывала: технологическую эффективность (стабильность, вязкость), влияние на потребительские качества продукта (вкус, запах, внешний вид).

Выдвинутое предположение о недостаточности существующих данных о поведении гуммиарабика в сложных эмульсионных системах подтвердилось экспериментально. Это указывает на необходимость детального изучения вклада отдельных факторов, определяющих кислотность эмульсионной системы, в формирование её структурных и органолептических свойств при использовании полисахаридных стабилизаторов, в частности гуммиарабика.

В результате проведения настоящего исследования были разработаны и апробированы три рецептуры эмульсионных систем с содержанием гуммиарабика 7; 9 и 11 %. Установлено, что образец с 9 % содержанием гуммиарабика демонстрирует оптимальные характеристики по органолептическим показателям (интегральная оценка 5,0 баллов) и стабильности при хранении. Выявлены количественные зависимости влияния массовой доли гуммиарабика на физико-химические показатели. Установлено, что увеличение концентрации с 7 до 11 % приводит к закономерному росту содержания сухих веществ (с 18,96 до

22,85 °Бриксе) и плотности (с 1,015 до 1,031 г/см³) при сохранении стабильных значений кислотности и pH. Проведена комплексная оценка стабильности образцов в течение 40 суток хранения. Наибольшую устойчивость к расслоению показали образцы с 7 и 9 % гуммиарабика. Органолептический анализ подтвердил преимущество образца с 9 % содержанием гуммиарабика по интегральной оценке (5,0 баллов) и сбалансированности вкусоароматических характеристик. Построены адекватные регрессионные модели ($R^2 > 0,92$), позволившие провести многокритериальную оптимизацию. Определены оптимальные параметры процесса: концентрация гуммиарабика 9,35 %, давление гомогенизации 224,6 бар, доля масляной фазы 16,2 %. Экспериментальная проверка подтвердила высокую сходимость прогнозируемых и фактических значений (расхождение <5 %).

Заключение

Многокритериальная оптимизация позволила найти «компромиссные» условия, обеспечивающие высокие значения всех трех откликов. Разработанная методика может быть использована для оптимизации параметров получения эмульсий с заданными свойствами. Полученные результаты имеют практическую значимость для разработки рецептур и технологических режимов производства эмульсионных продуктов с улучшенными характеристиками.

Список литературы

1. Багале У., Калинина И.В., Науменко Н.В. и др. (2023) Возможности применения двойных эмульсий в пищевой промышленности. Часть 2: формирование пищевых систем нового формата // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии, 11(1): 27–34. <https://doi.org/10.14529/food230103>.
2. Васькина В.А., Быков А.А., Новожилова Е.С. [и др.] (2025). Применение растительных эмульсионных гелей в технологии мягкой карамельной массы // Хранение и переработка сельхозсырья, 33(2): 166–184. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.2.648>.
3. Лавлинская М.С., Сорокин А.В., Холявка М.Г. [и др.] (2024). Стабилизация пищевых эмульсий полисахаридами и белок-полисахаридными комплексами // Конденсированные среды и межфазные границы, 26(2): 187–196. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11933>.
4. Скрябин В.И., Гернет М.В., Соколов В.Б. (2007). Сырье для производства стабильных ароматических эмульсий // Пиво и напитки, (1), 30–31.
5. Феофилактова О.В., Мажаева Т.В., Бегичева С.В., Заворохина Н. В. (2024). Оценка био-доступности БАВ в составе биоактивных эмульсионных пищевых систем // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии, 12(2), 48–57. <https://doi.org/10.14529/food240206>.
6. Arteaga-Cabrera E., Ramírez-Márquez C., Sánchez-Ramírez E. et al. (2025). Advancing Optimization Strategies in the Food Industry: From Traditional Approaches to Multi-Objective and Technology-Integrated Solutions // Applied Sciences, 15(7), 3846. <https://doi.org/10.3390/app15073846>.
7. Kabanov V.L., Novinyuk L.V. (2020) Chitosan application in food technology: a review of recent advances // Пищевые системы, 3(1):10–15. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2020-3-1-10-15>.
8. Lamidi S., Olaleye N., Bankole Y. et al. (2023). Applications of Response Surface Methodology (RSM) in Product Design, Development, and Process Optimization // IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.106763>.
9. Niu H., Chen X., Luo T. et al. (2022). The interfacial behavior and long-term stability of emulsions stabilized by gum arabic and sugar beet pectin // Carbohydrate Polymers, 291:119623. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119623>.
10. Schultz M. (2021). Flavour Delivery // In: Fang, Y., Zhang, H. & Nishinari, K. Food Hydrocolloids. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0320-4_10.
11. Soni M., Yadav A., Maurya A. et al. (2023). Advances in Designing Essential Oil Nanoformulations: An Integrative Approach to Mathematical Modeling with Potential Application in Food Preservation // Foods, 12(21), 4017. <https://doi.org/10.3390/foods12214017>.
12. Teixé-Roig J., Oms-Oliu G., Odriozola-Serrano I. et al. (2023). Emulsion-Based Delivery Systems to Enhance the Functionality of Bioactive Compounds: Towards the Use of Ingredients from Natural, Sustainable Sources // Foods, 12(7), 1502. <https://doi.org/10.3390/foods12071502>.
13. Tsitlakidou P., Tasopoulos N., Chatzopoulou P., Mourtzinos, I. (2023). Current status, technology, regulation and future perspectives of essential oils usage in the food and drink industry // Food and Agriculture, 103: 6727–6751. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12695>.
14. Varivoda A.A., Temerbaeva M.V., Uryumtseva T.I. et al. (2021). The use of germinated barley in the production of fermented milk drinks // In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 677(2), 022104. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/2/022104>.
15. Williams P.A., Phillips G.O. (2021). Gum Arabic / In G.O. Phillips & P.A. Williams (Eds.), Handbook of hydrocolloids (3rd ed., pp. 627–652). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820104-6.00022-X>.
16. Xiang S., Yao X., Zhang W. et al. (2015). Gum Arabic-stabilized conjugated linoleic acid emulsions: Emulsion properties in relation to interfacial adsorption behaviors // Food Hydrocolloids, 48, 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.01.033>.

References

1. Uday Bagale, Kalinina I.V., Naumenko N.V., Kadi A.M.Y., Malinin A.V., Tsaturov A.V. (2023). The possibilities of using double emulsions in the food industry. Part 2: Formation of food systems of a new format. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 11(1), 27–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/food230103>.
2. Vaskina V.A., Bykov A.A., Novozhilova E.S. [et al.] (2025). Application of plant emulsion gels in the technology of soft caramel mass. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya*, 33(2), 166–184. (In Russ.) <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.2.648>.
3. Lavlinskaya M.S., Sorokin A.V., Khol'yavka M.G. [et al.] (2024). Stabilization of food emulsions by polysaccharides and protein-polysaccharide complexes. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy* [Condensed Matter and Interphases], 26(2), 187–196. (In Russ.) <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11933>.
4. Skryabin V.I., Gernet M.V., Sokolov V.B. (2007). Raw materials for the production of stable flavor emulsions. *Pivo i napitki*, (1), 30–31. (In Russ.)
5. Feofilaktova O.V., Mazhaeva T.V., Begicheva S.V., Zavorokhina N.V. (2024). Assessment of bioavailability of bas in the composition of bioactive emulsion food systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 12(2), 48–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/food240206>.
6. Arteaga-Cabrera E., Ramírez-Márquez C., Sánchez-Ramírez E., Segovia-Hernández J.G., Osorio-Mora O., Gómez-Salazar J.A. (2025). Advancing Optimization Strategies in the Food Industry: From Traditional Approaches to Multi-Objective and Technology-Integrated Solutions. *Applied Sciences*, 15(7), 3846. <https://doi.org/10.3390/app15073846>.
7. Kabanov V.L., Novinyuk L.V. (2020). Chitosan application in food technology: a review of recent advances. *Pishchevyye Sistemy* [Food Systems], 3(1), 10–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2020-3-1-10-15>.
8. Lamidi S., Olaleye N., Bankole Y., Obalola A., Aribike E., Adigun I. (2023). Applications of Response Surface Methodology (RSM) in Product Design, Development, and Process Optimization. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.106763>.
9. Niu H., Chen X., Luo T., Chen H., Fu X. (2022). The interfacial behavior and long-term stability of emulsions stabilized by gum arabic and sugar beet pectin. *Carbohydrate Polymers*, 291:119623. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119623>.
10. Schultz M. (2021). Flavour Delivery. In: Fang Y., Zhang H. & Nishinari K. (eds) *Food Hydrocolloids*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0320-4_10.
11. Soni M., Yadav A., Maurya A., Das S., Dubey N.K., Dwivedy A.K. (2023). Advances in Designing Essential Oil Nanoformulations: An Integrative Approach to Mathematical Modeling with Potential Application in Food Preservation. *Foods*, 12(21), 4017. <https://doi.org/10.3390/foods12214017>.
12. Teixé-Roig J., Oms-Oliu G., Odriozola-Serrano I., Martín-Belloso O. (2023). Emulsion-Based Delivery Systems to Enhance the Functionality of Bioactive Compounds: Towards the Use of Ingredients from Natural, Sustainable Sources. *Foods*, 12(7), 1502. <https://doi.org/10.3390/foods12071502>.
13. Tsitlakidou P., Tasopoulos N., Chatzopoulou P., Mourtzinos, I. (2023). Current status, technology, regulation and future perspectives of essential oils usage in the food and drink industry. *Food and Agriculture*, 103: 6727–6751. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12695>.
14. Varivoda A.A., Temerbaeva M.V., Uryumtseva T.I., Gerashchenko L.A., & Svirin A.G. (2021). The use of germinated barley in the production of fermented milk drinks. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 677(2), 022104. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/2/022104>.
15. Williams P.A., Phillips G.O. (2021). Gum arabic. In G.O. Phillips & P.A. Williams (Eds.), *Handbook of hydrocolloids* (3rd ed., pp. 627–652). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820104-6.00022-X>.
16. Xiang S., Yao X., Zhang W., Zhang K., Fang Y., Nishinari K., Phillips G.O., Jiang F. (2015). Gum Arabic-stabilized conjugated linoleic acid emulsions: Emulsion properties in relation to interfacial adsorption behaviors. *Food Hydrocolloids*, 48, 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.01.033>.

Информация об авторе

Вольнова Екатерина Романовна, кандидат технических наук, и.о. зав. каф. «Биотехнология и биоорганический синтез», Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия; volnovaer@mgupp.ru

Information about the author

Ekaterina R. Volnova, Candidate of Technical Sciences, Acting Head of the Department of Biotechnology and Bioorganic Synthesis, Russian University of Biotechnology (ROSBIOTECH), Moscow, Russia; volnovaer@mgupp.ru

Статья поступила в редакцию 20.12.2025

The article was submitted 20.12.2025