

УДК 613.2: 613.3: 004.942

DOI 10.30679/2219-5335-2023-2-80-1-22

**МЕТОДИКИ И МОДЕЛИ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ
С ЗАДАНЫМ СОСТАВОМ**

Першакова Татьяна Викторовна
д-р техн. наук, профессор
ведущий научный сотрудник
отдела хранения
и комплексной переработки
сельскохозяйственного сырья
<https://orcid.org/0000-0002-8528-0966>

Краснодарский научно-исследовательский институт хранения и переработки сельскохозяйственной продукции – филиал ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия», Краснодар, Россия

Иванова Елена Александровна
старший преподаватель
кафедры системного анализа
и обработки информации
<https://orcid.org/0000-0002-6127-7762>

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина», Краснодар, Россия

В статье приведен сравнительный анализ существующих методик и моделей проектирования продуктов с заданным составом: экспериментально-статистическое моделирование, линейное программирование, объектно-ориентированный подход, модели нечеткой логики, нейронные сети. Для каждой методики выявлены их ключевые особенности, а также недостатки и границы эффективного применения. По результатам проведенного анализа обоснован выбор базовой методики для последующего практического применения – линейное программирование: симплекс-метод и его модификации. Далее в работе представлено

UDC 613.2: 613.3: 004.942

DOI 10.30679/2219-5335-2023-2-80-1-22

**TECHNIQUES AND MODELS
FOR DESIGNING
FOOD PRODUCTS
WITH A PRESENT COMPOSITION**

Pershakova Tatiana Viktorovna
Dr. Tech. Sci., Professor
Leading Research Associate
of Storage and Complex Processing
of Agricultural Raw Materials
Department
<https://orcid.org/0000-0002-8528-0966>

Krasnodar Research Institute for Storage and Processing of Agricultural Products – Branch of the North Caucasus Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture, and Winemaking, Krasnodar, Russia

Ivanova Elena Aleksandrovna
Senior Lecturer
Department of System Analysis
and Information Processing
<https://orcid.org/0000-0002-6127-7762>

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin», Krasnodar, Russia

The article provides a comparative analysis of existing methods and models for designing healthy food products with a given composition: experimental statistical modeling, linear programming, object-oriented approach, fuzzy logic models, neural networks. For each technique, their key features, as well as shortcomings and boundaries of effective application, are identified. The choice of a basic technique for subsequent practical application is justified based on the results of the analysis – linear programming: the simplex method and its modifications.

описание математических моделей и алгоритмов для решения трех задач, реализующих проектирование компонентного состава продуктов питания для персонализированного питания. Для каждой методики определены наборы входных и выходных данных, ограничений, целевых функций, а также обобщенные последовательности действий при расчетах в виде блок-схем алгоритмов. Модель оптимизации компонентного состава позволит спроектировать выбранный продукт на основе его базовой рецептуры, оптимизировав его по заданному критерию: себестоимость, энергетическая ценность, степень содержания определенного химического компонента и т.д. Методика оптимизации сбалансированных по пищевой ценности рецептур продуктов с заданными свойствами и составом базируется на использовании норм физиологических потребностей в пищевых веществах для разных групп населения. Она позволяет оценить конкретную рецептуру продукта на предмет его соответствия этим нормам для заданной группы населения. Отличительной особенностью предлагаемой методики системного моделирования поликомпонентных пищевых продуктов является возможность проектирования рецептуры для заданных соотношений компонентов и химических веществ. Описанные модели в дальнейшем будут являться основой для разработки цифровых инструментов проектирования продуктов с заданным составом.

Ключевые слова:

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, МЕТОДИКА, АЛГОРИТМ, РЕЦЕПТУРА, ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОЕ ПИТАНИЕ, ПРОДУКТ, КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ, ЦИФРОВОЙ ИНСТРУМЕНТ

Further, the paper presents a description of mathematical models and algorithms for solving three problems that implement the design of the component composition of functional foods. For each technique, sets of input and output data, constraints, objective functions, as well as generalized sequences of actions in calculations in the form of flowcharts of algorithms are defined. The component composition optimization model will allow you to design the selected healthy food products based on its basic recipe, optimizing it according to a given criterion: cost, energy value, degree of content of a certain chemical component, etc. The methodology for optimizing nutritionally balanced food recipes with desired properties and composition is based on the use of norms of physiological needs for nutrients for different population groups. It allows to evaluate a specific formulation of a healthy nutrition product for its compliance with these standards for a given population group. A distinctive feature of the proposed method of system modeling of multicomponent food products of functional nutrition is the possibility of designing a recipe for given ratios of components and chemicals. The described models will further be the basis for the development of digital tools for designing healthy food products with a given composition.

Key words: MATHEMATICAL MODEL, METHOD, ALGORITHM, RECIPE, PERSONALIZED NUTRITION, PRODUCT, COMPONENT COMPOSITION, DIGITAL INSTRUMENT

Введение. В настоящее время тенденции в стране и мире в области здорового питания предусматривают отдельное и самостоятельное развитие та-

кого направления, как проектирование продуктов со сложным многокомпонентным составом, включающим в себя не только макронутриенты, но и необходимые организму витамины, минеральные и биологически активные вещества. При этом должен соблюдаться базовый принцип сбалансированного питания – потребление человеком пищевых нутриентов должно происходить последовательно, в определенном количестве и соотношении.

Проектирование продуктов питания с заданным составом представляет собой сложный и трудоемкий процесс как в части математического моделирования, так и разработки информационного и программного обеспечения соответствующих цифровых инструментов. В связи с этим задачу разработки методик и моделей продуктов здорового питания с заданным составом можно назвать актуальной и востребованной.

Цель работы – разработка и описание методик и моделей проектирования продуктов питания с заданным составом.

Задачи исследования:

- анализ известных методов проектирования продуктов питания с заданным составом;
- разработка и описание методики оптимизации компонентного состава продуктов для персонализированного питания;
- разработка и описание методики системного моделирования поликомпонентных пищевых продуктов;
- разработка и описание методики оптимизации сбалансированных по пищевой ценности рецептур продуктов с заданными свойствами и составом.

Научная новизна результатов работы заключается в том, что описанные методики и модели базируются на реализованной ранее авторами комплексной функционально-структурной модели процесса проектирования продуктов здорового питания, предназначенной для расчетов рецептур практически любых видов продукции, централизованного хранения для по-

следующего циклического использования нормативно-справочной информации и результатов проектирования.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования являются пищевые продукты в части наиболее перспективных групп: хлеб и хлебобулочные изделия, безалкогольные напитки, кондитерские изделия, плодовые и овощные консервы. В качестве методов исследования рассмотрены следующие подходы к моделированию продуктов для персонализированного питания: экспериментально-статистическое моделирование, линейное программирование, объектно-ориентированный подход, нечетко-множественные модели, нейронные сети. Предложенные авторами модели базируются на принципах линейного программирования в части симплекс-метода и его разновидностей. Формализация описанных методик выполнена в виде блок-схем алгоритмов.

Обсуждение результатов. Задача проектирования продуктов питания с заданным составом является актуальной на протяжении достаточно долгого времени. За этот период было предложено большое количество методик и моделей, реализующих данный процесс. Анализом и разработкой моделей конструирования рецептур поликомпонентных продуктов занимались такие ученые, как Н.Н. Липатов (мл), П.А. Лисин, Н.В. Донских, Л.С. Зеленина, Е.И. Муратова и др. [1-10].

Анализ научных источников показал, что на современном этапе изучения данного вопроса наиболее востребованными подходами являются:

- методы экспериментально-статистического моделирования (Михайлов Н.А., Липатов Н.Н.);
- методы линейного программирования (Лисин П.А., Борисенко А.А.);
- нечетко-множественные модели (Муратова Е.И., Толстых С.Г.);
- нейронные сети (Лоза А.А., Муратова Е.И., Толстых С.Г.) и др.

Рассмотрим основные характеристики используемых методов и моделей.

Метод экспериментально-статистического моделирования основывается на выделении ключевого нутриента продукта и оптимизации его качества. Для расчетов и статистической обработки используется регрессионный анализ по методу наименьших квадратов [11, 12, 13].

Основываясь на данных проведенных экспериментов, строятся числовые ряды следующего вида (рис.1).

№	x_1	x_2	...	x_k	$y^{\text{эксп}}$
1	x_{11}	x_{21}	...	x_{k1}	y_1
2	x_{12}	x_{22}	...	x_{k2}	y_2
...
N	x_{1N}	x_{2N}	...	x_{kN}	y_N

Рис. 1. Экспериментально-статистическое моделирование

В качестве совокупности значений x_i принимаются количественные значения рецептурных компонент, вносимых в процессе приготовления, а y_i – результат, характеризующий содержание нормируемого вещества в готовом продукте, подтвержденный лабораторным исследованием. Соответственно, нижеприведенное уравнение (1) позволит выполнить прогноз на новой комбинации x_i :

$$y_{\text{расч}} = f(x_1, x_2, \dots, x_k, b_0, b_1, \dots, b_i) \quad (1)$$

При этом использование метода наименьших квадратов обусловлено задачей подбора таких значений коэффициентов b_0, b_1, \dots, b_i , которые в наименьшей степени приводили бы к отличию от экспериментально измеренных данных:

$$Q = \sum_{i=1}^N (y_i^{\text{эксп}} - y_i^{\text{расч}})^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

Следовательно:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial b_0} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b_1} = 0 \\ \dots \\ \frac{\partial Q}{\partial b_i} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

В результате строится система линейных уравнений (4), по которым и осуществляется прогнозирование:

$$\begin{aligned} y &= a + bx \\ b_0 &= a, f_0 = 1 \\ b_1 &= b, f_1 = x \end{aligned} \quad (4)$$

Данный метод применяется для расчета белковой составляющей продукта. Недостатком метода является необходимость проведения большого количества дорогостоящих биохимических анализов.

Метод линейного программирования, известный как симплекс-метод, предусматривает представление данных в следующей форме:

$$\begin{aligned} \max(\min) F(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \sum_{j=1}^n c_j x_j \\ \sum_{i=1}^m a_{ij} x_j &\leq b_i, i = 1, 2, \dots, m, \\ x_j &\geq 0, j = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (5)$$

Где x_1, x_2, \dots, x_n - количества ингредиентов в рецептуре,

c_j - коэффициенты целевой функции,

a_j, b_j – коэффициенты, задающие ограничения количества нутриентов для каждого ингредиента,

m – количество нутриентов,

n – количество ингредиентов [2, 6, 14, 15, 16].

Недостатком метода является то, что в связи с тем, что задача сводится к нахождению экстремума линейной целевой функции при линейных ограничениях на исходные переменные, возможны ситуации, когда задача окажется частично или полностью вырожденной. В этом случае решение окажется на границе допустимых областей применения.

Объектно-ориентированный подход заключается в том, что рецептура представляется в виде иерархической структуры, где каждый объект может представлять как простое сырье, так и полуфабрикат, который, в свою очередь, также состоит из объектов этих классов (рис. 2) [4, 17].

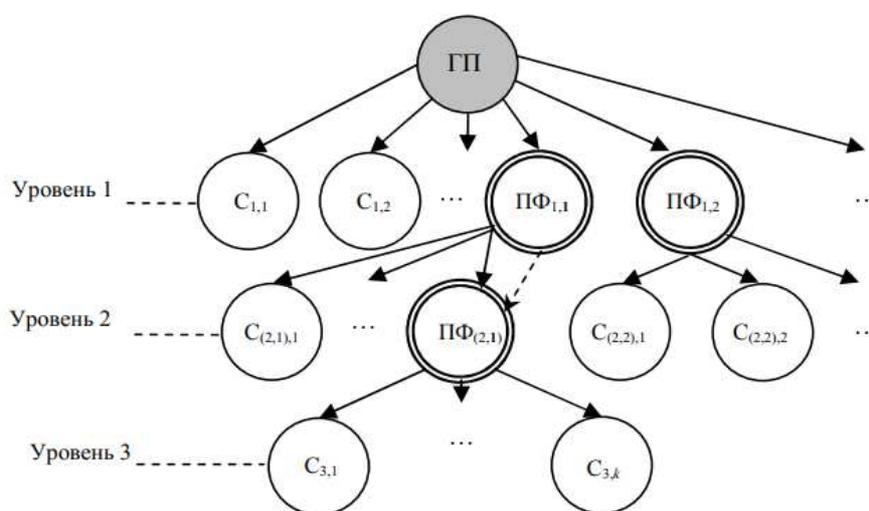


Рис. 2. Объектно-ориентированное представление данных

Один из базовых принципов объектно-ориентированного подхода – наследование, позволяет использовать свойства методы объектов классов предков, а также дополнять или модифицировать их новыми расчетными методами и формулами, учитывающими новые изменяющиеся факторы (особенности производства, новые технологии, расширение ассортимента, заменяемость ингредиентов и т.д.). Данный метод применяется к проектированию рецептур продуктов, в состав которых входит достаточно большое количество полуфабрикатов.

Метод нечетко-множественных описаний использует понятия лингвистических переменных. Механизм нечеткого логического вывода предполагает задание [6, 18, 19]:

- 1) множества входных лингвистических переменных: $V = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m\}$;
- 2) множества выходных лингвистических переменных: $W = \{w_1, w_2, \dots, w_s\}$;
- 3) множества нечетких продукционных правил: $P = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$.

Правила при этом согласуются относительно используемых в них лингвистических переменных: « R_1 : ЕСЛИ «Условие_1», ТО «Заключение_1», ... R_n : ЕСЛИ «Условие_n», ТО «Заключение_n».

Здесь «Условие_1»... «Условие_n» содержат входные лингвистические переменные; «Заключение_1»... «Заключение_n» содержат выходные лингвистические переменные.

Такой метод может быть использован в том случае, если оценка исходных экспериментальных данных не может быть представлена в явной числовой форме и носит субъективный характер (например, оценка органолептических показателей продукта).

Метод нейронных сетей применяется в тех случаях, где линейная аппроксимация работает неудовлетворительно. Нейронные сети учатся на примерах. Пользователь предварительно подбирает представительные данные, а затем запускает алгоритм обучения, который автоматически воспринимает и обрабатывает полученную структуру данных. Модель нейронной сети описывается как совокупность нейронов и их связей, что представляется в виде графа (рис. 3) [6, 20, 21, 22].

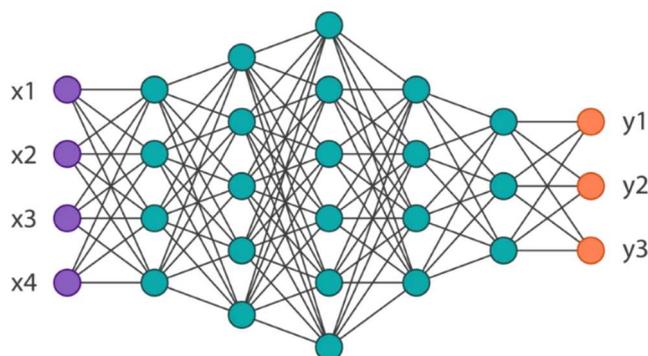


Рис. 3. Метод нейронных сетей

Здесь:

- x_i – входы нейрона; в качестве входов выступают задаваемые параметры продукта здорового питания;
- y_i – выходы нейрона, в качестве таковых выступают количественные значения рецептурных компонентов.

При этом каждый нейрон и его связи могут быть описаны так:

$$x_{(k)}^{(i+1)} = f(\sum_{j=1}^N w_j^{(k)} x_j^{(i)}), \quad (6)$$

где $x_j^{(i)}$ – входное значение параметра;

$w_j^{(k)}$ – сила связи.

Для расчета выхода нейрона используется функция активации. Наиболее часто используют функцию Leaky ReLU.

Нейросетевое моделирование состоит из следующих этапов: подготовка данных для тренировки сети; создание сети; обучение сети; тестирование сети; моделирование сети (использование сети для решения конкретной задачи).

Метод нейронных сетей может быть применен для построения поверхности отклика, отображающей изменение целевой функции (например, балловой оценки консистенции продукта) при варьировании входных параметров. Необходим достаточно большой объем «исторических данных» для корректного обучения сети. При добавлении нового входного параметра

или прогнозируемого значения рецептурных компонентов необходимо проводить переобучение сети, что предполагает задействование большого количестве вычислительных ресурсов.

Анализ методов проектирования продуктов здорового питания с заданным составом и их базовых моделей оптимизации и прогнозирования позволил, в качестве оптимального, выбрать метод линейного программирования (симплекс-метод). Выбор обуславливается его универсальностью относительно состава задаваемых параметров и ограничений, простотой применения (для каждого нового параметра, ограничения и значения целевой функции оптимизация осуществляется по одному алгоритму).

Таким образом, для всего многообразия рецептов и видов продуктов здорового питания, компонент, входящих в их состав, будет применяться один и тот же метод линейного программирования, отличающийся моделями ограничений, целевой функцией и исходных данных.

Основным назначением методики оптимизации компонентного состава функциональных продуктов питания является предоставление пользователю возможности выбора из множества возможных вариантов рецептуры по заданному признаку (критерию) оптимального варианта, например, проектируемый продукт должен иметь максимальную энергетическую ценность, или иметь заданное содержание витамина В1, или иметь минимальную себестоимость.

Входными данными модели являются базовые рецептуры продуктов питания, химический состав ингредиентов, оптовые цены.

В основе предлагаемой методики лежит использование симплекс-метода.

Целевая функция будет выглядеть следующим образом:

$$F = \sum_{j=1}^n C_j X_j \rightarrow \max(\min) \quad (7)$$

Модель предполагает три вида ограничений: стандартные (8), ограничения для фиксированных ингредиентов (9) и ограничения по массе ингредиентов (10).

$$\sum_{j=1}^n A_{ij}X_j \leq b_i \quad (8)$$

$$X_j = f_j \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n X_j = Z \quad (10)$$

Используемые обозначения:

n – количество изменяемых ингредиентов в рецептуре;

nI – количество неизменяемых ингредиентов в рецептуре;

m – количество химических веществ в рецептуре;

X_1, X_2, \dots, X_n – количество каждого ингредиента рецептуры;

C_1, C_2, \dots, C_n – коэффициенты целевой функции ингредиентов (стоимость ингредиента, энергетическая ценность и т.д.);

A_{ij} – химический состав (массовая доля химического вещества i в ингредиенте j);

b_1, b_2, \dots, b_m – доля химического вещества в рецептуре;

f_1, f_2, \dots, f_{nI} – количество фиксированных ингредиентов;

Z – выход продукции.

Исходя из полученного таким образом набора исходных данных, формируется система линейных балансовых уравнений, решение которой в дальнейшем приведет к оптимизации компонентного состава с учетом пожеланий пользователя. К этой системе применяется алгоритм симплекс-метода (подробнее он описан ниже), и результат его работы в виде рассчитанного количества ингредиентов для рецептуры представляется пользователю.

Графическое описание приведенной последовательности действий в виде блок-схемы алгоритма показано на рисунке 4.

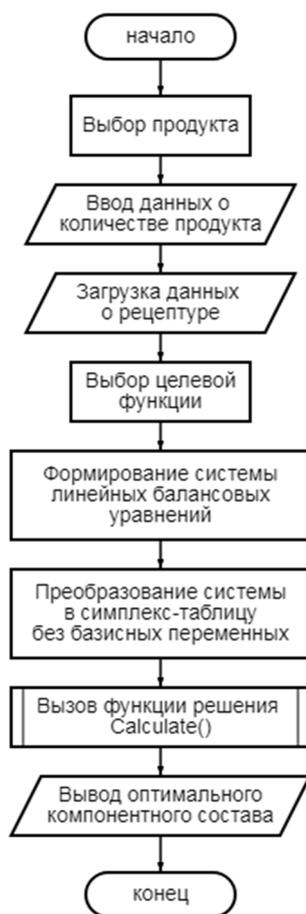


Рис. 4. Блок-схема методики оптимизации компонентного состава продуктов питания для персонализированного питания

Далее приведено более подробное описание алгоритма симплекс-метода в привязке к решению задачи оптимизации компонентного состава функциональных продуктов питания (рис. 5). Вычисления начинаются с некоторого «стартового» базисного решения, а затем ведется поиск решений, «улучшающих» значение целевой функции.

Результатирующее значение ингредиентов продукта будет записываться в отдельный массив. Расчеты по симплекс-методу продолжаются до тех пор, пока решение с учетом поставленных ограничений не найдено, либо, пока система не сделает вывод, что решения нет.

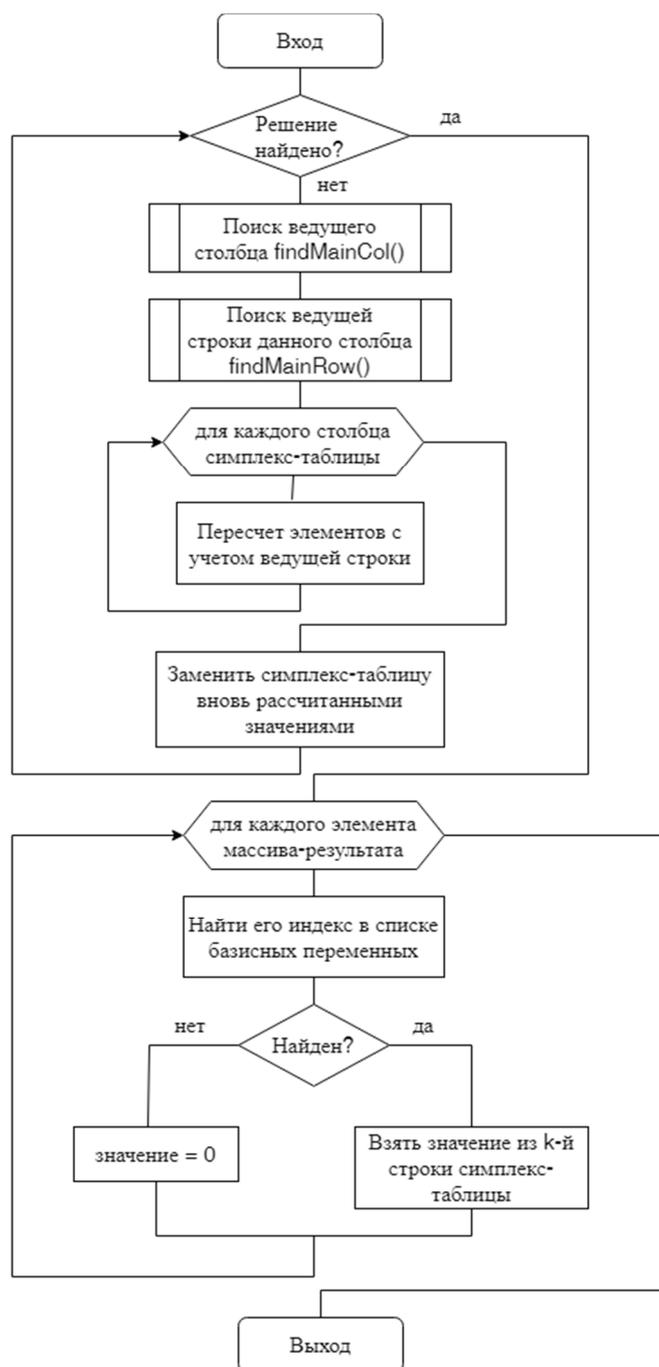


Рис. 5. Блок-схема алгоритма симплекс-метода

На каждом этапе расчета осуществляется поиск так называемого ведущего столбца, а после его успешного завершения – поиск ведущей строки для найденного столбца. После этого для каждого столбца симплекс-таблицы происходит пересчет элементов с учетом найденной ведущей строки,

и найденные вновь рассчитанные элементы заменяют собой «старую» симплекс-таблицу. В случае нахождения решения происходит окончательное формирование массива результирующих данных. Просматривается каждый элемент массива, рассчитанного на предыдущем этапе, осуществляется поиск его индекса k в списке базисных переменных, и, если он там имеется, из симплекс-таблицы выбирается строка с найденным индексом.

Решение задачи оптимизации сбалансированных по пищевой ценности рецептур продуктов с заданными свойствами и составом предполагает определение соответствия спроектированных рецептур продуктов питания нормам физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации [23].

Рассмотрим модель решения данной задачи. Доля суточной потребности D_{kj} в химическом веществе j для группы населения k определяется по формуле (11).

$$D_{kj} = \sum_{i=1}^n Norm_{kj} A_{ij} \quad (11)$$

где:

n – количество изменяемых ингредиентов в рецептуре;

D_{kj} – доля суточной потребности в химическом веществе j для группы населения k ;

A_{ij} – химический состав (массовая доля вещества i в ингредиенте j);

$Norm_{kj}$ – норма суточной физиологической потребности группы населения k в пищевом веществе j .

Обобщенная блок-схема решения данной задачи показана на рисунке 6.

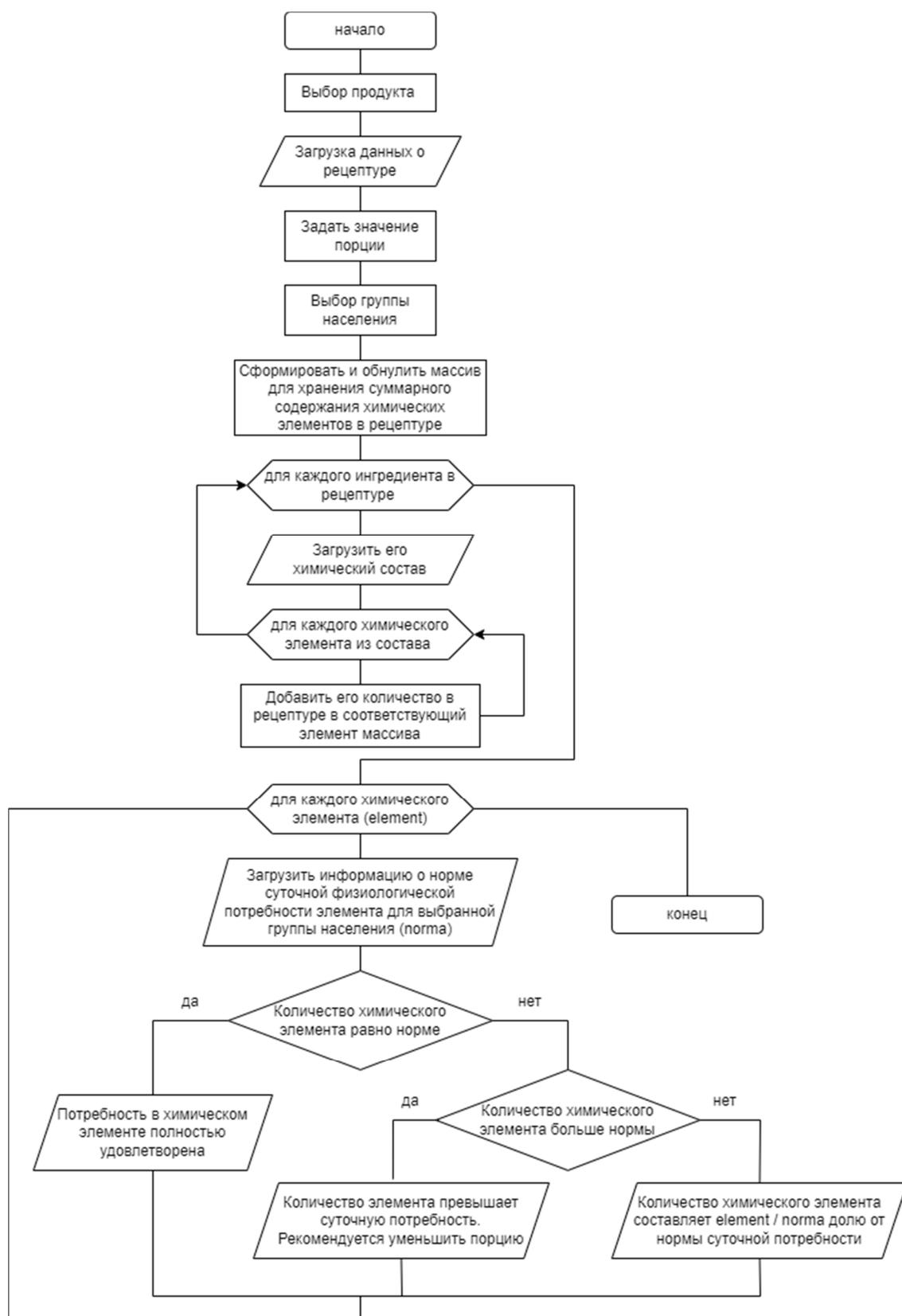


Рис. 6. Блок-схема методики определения соответствия спроектированных рецептов нормам физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения

Для корректной работы алгоритма на предварительных этапах в базу данных должны быть загружены сведения о группах населения по совокупности наборов нескольких характеристик, а также, для каждой группы, список норм физиологических потребностей в отдельных элементах или химических веществах.

На первом шаге осуществляется выбор продукта для проектирования и оптимизации из имеющегося перечня. Далее загружается информация о его рецептуре (для данной задачи можно использовать как базовые рецептуры, так и отличные от них, например, рассчитанные в ходе проведения оптимизации на предыдущем этапе).

Поскольку речь идет об оценке именно суточной потребности в элементах и химических веществах, а расчет рецептур осуществляется для различного количества продукта на выходе (100 кг, 1000 кг и т.д.), необходимо определиться с размером суточной порции, для которой будет рассчитываться соответствие или несоответствие нормам физиологической потребности.

Далее следует выбрать группу населения, для которой будут производиться расчеты.

Поскольку один и тот же химический компонент может содержаться в разных ингредиентах, составляющих рецептуру продукта питания, в отдельном массиве хранят суммарные значения содержания элементов и химических веществ в рецептуре.

После завершения предварительных операций начинается процесс расчетов. Предлагаемый алгоритм последовательно перебирает все ингредиенты, содержащиеся в рецептуре продукта, и загружает химический состав очередного ингредиента. Далее вложенным циклом осуществляется просмотр состава ингредиента на предмет содержащихся в нем элементов и химических веществ и суммирование количества каждого компонента с элементом массива, соответствующего данному химическому веществу. После завершения всех циклов вышеупомянутый массив будет хранить значения

массы всех элементов химических веществ, входящих в одну порцию рассматриваемого продукта.

Следующим этапом является загрузка данных о нормах физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для выбранной ранее категории населения по каждому химическому элементу. При этом происходит сравнение значения, хранящегося в массиве (а это суммарное количество текущего химического элемента в порции продукта), с рекомендуемым. Итогом сравнения могут быть три варианта:

– если количество химического элемента равно норме (или входит в рекомендуемый диапазон), делается вывод о том, что потребность в химическом элементе полностью удовлетворена. При этом допускается некоторая минимальная погрешность;

– если количество химического элемента значительно больше нормы, делается вывод, что количество превышает суточную потребность. В связи с этим алгоритм рекомендует уменьшить порцию продукта;

– если имеет место обратная ситуация, когда количество химического элемента меньше нормы, происходит расчет и вывод пользователю доли данного компонента в суточной норме потребности.

Системное моделирование поликомпонентных пищевых продуктов функционального питания основной своей целью ставит оптимизацию расчетов при проектировании продуктов сложного сырьевого состава. В отличие от методики оптимизации компонентного состава функциональных продуктов питания, здесь во главу угла становятся соотношения заданных химических веществ и компонентов, то есть сбалансированность продукта по основным пищевым веществам. Например, максимальное приближение к следующим соотношениям:

– белки : жиры : углеводы – 1,0:1,3:4,0;

– соотношение микроэлементов – Ca : Mg = 1,0 : 1,5 и Ca : Mg = 1,0 : 0,6.

Модель решения задачи предполагает введение дополнительных ограничений для оптимизации компонентного состава вида $V_1 : V_2 = k_1 : k_2$ (12).

$$k_2 \sum_{i=1}^n A_{V_2 i} - k_1 \sum_{i=1}^n A_{V_1 i} = 0 \quad (12)$$

где:

V_1 – химический компонент для левой части соотношения;

V_2 – химический компонент для правой части соотношения;

k_1 – коэффициент для левой части;

k_2 – коэффициент для правой части;

n – количество изменяемых ингредиентов в рецептуре;

$A_{V_1 i}$ – количество химического компонента V_1 в ингредиенте i ;

$A_{V_2 i}$ – количество химического компонента V_2 в ингредиенте i .

Обобщенный алгоритм системного моделирования поликомпонентных пищевых продуктов показан на рисунке 7. Перечень входных данных для задачи расчета оптимальной рецептуры, соответствующей заданным соотношениям элементов, можно представить следующим образом:

- выбранный продукт для проведения оптимизации;
- загруженная базовая рецептура этого продукта;
- для каждой пары ограничений в составе каждого заданного соотношения задаются наименование нутриента, а также его количество в пропорции отдельно как для левой, так и для правой части соотношения. При этом следует помнить, что увеличение количества соотношений для решения одной задачи оптимизации зачастую может привести к отсутствию оптимального решения. Причиной в этом случае будет резкое увеличение числа ограничений, возможно, конфликтующих между собой;
- целевая функция для оптимизации: наименование параметра, а также характер функции (минимизация или максимизация).

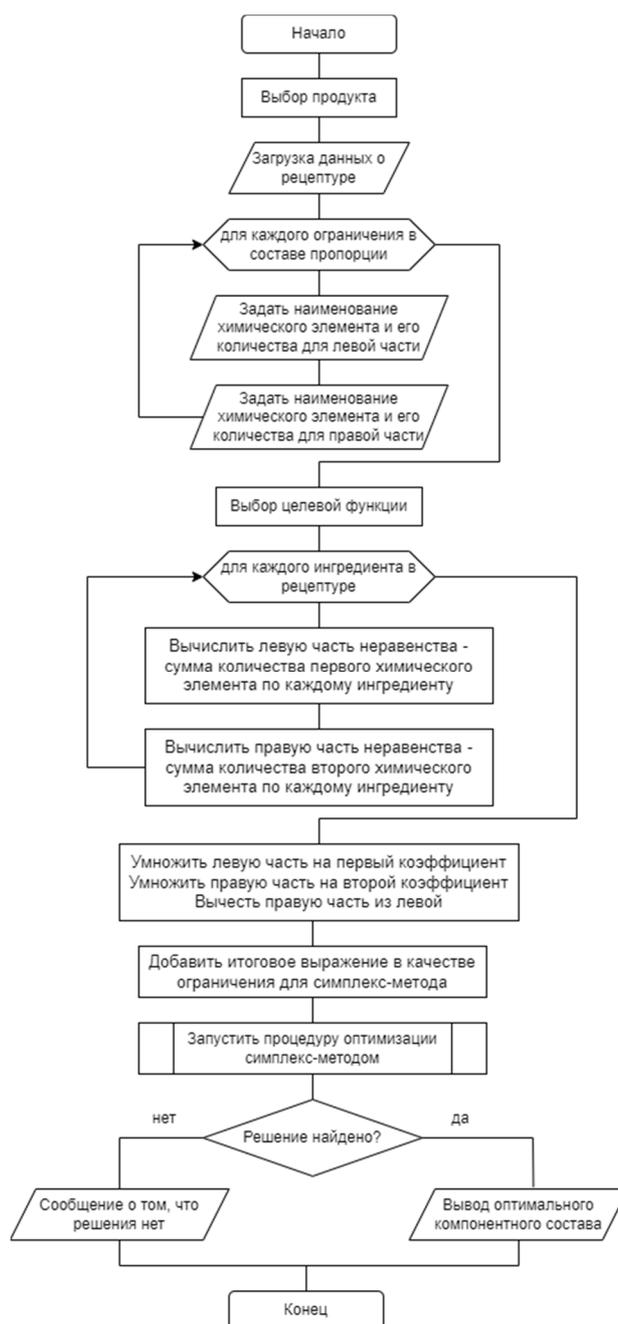


Рис. 7. Блок-схема алгоритма оптимизации рецептуры в соответствии с заданными соотношениями химических элементов

Базовым математическим средством оптимизации также будет являться симплекс-метод. Однако в данном случае для того, чтобы получить возможность безболезненно использовать его, к исходным данным необходимо применить некоторые математические преобразования, которые в конечном итоге позволят преобразовать задаваемые пользователем соотношения химических элементов в дополнительные ограничения симплекс-метода.

В случае успешного нахождения решения пользователю представляется оптимальный компонентный состав рецептуры. В противном же случае выдается сообщение о том, что решения нет. Если такое произошло, уточняются вводимые значения соотношений химических элементов, в частности, предпринимается попытка уменьшить количество соотношений, и запустить процедуру оптимизации снова.

Выводы. В процессе исследования на основе анализа известных методов проектирования продуктов питания с заданным составом в качестве наиболее рационального выбран метод линейного программирования (симплекс-метод). Выбор обусловлен его универсальностью относительно состава задаваемых параметров и ограничений, простотой применения. В результате работы спроектированы и описаны методики: оптимизации компонентного состава функциональных продуктов питания; системного моделирования поликомпонентных пищевых продуктов функционального питания; оптимизации сбалансированных по пищевой ценности рецептур продуктов с заданными свойствами и составом, позволяющие разработать оптимальный компонентный состав рецептуры продуктов здорового питания.

Литература

1. Липатов Н.Н. Принципы и методы проектирования рецептур пищевых продуктов, балансирующих рационы питания // Известия вузов. Пищевая технология. 1990. № 6. С. 5-10.
2. Лисин П.А. Практическое руководство по проектированию продуктов питания с применением Excel, MathCAD, Maple: учебное пособие для вузов – 3-е изд., испр. и доп. СПб: Лань, 2022. 260 с.
3. Композиционное проектирование поликомпонентных продуктов питания / П.А. Лисин [и др.]. // Аграрный вестник Урала. 2013. № 12(118). С. 42-46.
4. Донских Н.В. Разработка автоматизированной информационной системы для расчёта и оптимизации рецептур // Известия вузов. Пищевая технология. 2011. № 2-3 (320-321). С. 122-123.
5. Зеленина Л.С., Зюзина О.В. Разработка поликомпонентных пищевых систем методами компьютерного моделирования // Вестник ТГТУ. 2011. Том 17. № 4. С. 992-1000.
6. Автоматизированное проектирование сложных многокомпонентных продуктов питания: учебное пособие / Е.И. Муратова [и др.]. Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. 80 с.

7. Lisitsyn A., Chernukha I., Nikitina M. Russian methodology for designing multi-component foods in retrospect // *Foods and Raw materials*. 2020. Vol. 8, № 1. P. 2-11.
8. Разработка рецептур функциональных напитков с использованием натуральных красителей / Т.В. Яковлева [и др.]. // *Новые технологии*. 2021. Т. 17. № 3. С. 59-70.
9. Производство функциональных кондитерских изделий с применением растительных пищевых добавок / А.А. Тягушева [и др.]. // *Новости науки в АПК*. 2021. № 2. С. 359-361.
10. Разработка технологии и рецептуры сдобных булочных изделий, обогащенных пищевыми добавками / М.А. Казиминова [и др.] // *Новые технологии*. 2018. № 1. С. 37-42.
11. Лисин, П.А. Компьютерное моделирование поликомпонентных молочных продуктов // *Пищевая промышленность*, 2006. № 11. С. 60-61.
12. Yu P., Low M., Zhou W. Design of experiments and regression modelling in food flavour and sensory analysis: A review // *Trends in Food Science & Technology*. 2017. Vol. 71. P. 202-215.
13. Martens M., Tenenhaus M., Vinzi V.T. [et al.] The use of partial least squares methods in new food product development // *Consumer-Led Food Product Development*. 2007. P. 492-523.
14. Wirawan N.N., Fahmida U., Purwestri R.C. et al. Development of Food Multi-Mix Using a Linear Programming Approach to Fill the Nutrient Gap of Amino Acids and Micronutrients for Stunted Non-Wasted Children // *Foods*. 2023 Vol. 12. № 1. 64.
15. Berezina N.A., Artemov A.V., Nikitin I.A. et al. The Use of a Simplex Method with an Artificial basis in Modeling of Flour Mixtures for Bakery Products // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2017. Vol. 8. № 17. P. 338-344.
16. Squeo G., De Angelis D., Leardi R. et al. Background, Applications and Issues of the Experimental Designs for Mixture in the Food Sector // *Foods*. 2021. Vol. 10. № 5. 1128.
17. Ławrynowicz A., Wróblewska A., Adrian W.T. et al. Food Recipe Ingredient Substitution Ontology Design Pattern // *Sensors*. 2022. Vol. 22. № 3. 1095.
18. Krbez J., Shaout A. Fuzzy Nutrition System // *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*. 2013. Vol. 1. P. 1360-1371.
19. Derkanosova N.M., Vasilenko O.A., Shelamova S.A. et al. Use of the fuzzy-set theory in designing enriched bakery products // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 624. 012126.
20. Лоза А.А. Оценка эффективности новых продуктов питания с учетом использования инноваций // *RJOAS*. 2017. № 9(69). С. 247-252.
21. Gona S.N.R., Marellapudi H. Suggestion and invention of recipes using bi-directional LSTMs-based frameworks // *SN Applied Sciences*. 2021 Vol. 3. 553.
22. Tian Y., Zhang C., Metoyer R. et al. Recipe Recommendation With Hierarchical Graph Attention Network // *Frontiers in Big Data*. 2022 Vol. 4. 778417.
23. Методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации. Утв. 2021-22-07. М: 2021. 72 с.

References

1. Lipatov N.N. Principles and methods of designing food recipes that balance diets // *Izvestiya vuzov. Food technology*. 1990. №. 6. P. 5-10. (in Russian)
2. Lisin P.A. Practical guide to the design of food products using Excel, MathCAD, Maple: a textbook for universities – 3rd ed., correct and additional. St. Petersburg: Lan, 2022. 260 p. (in Russian)
3. Lisin P.A., Moliboga E.A., Voronova T.D., Savelyeva Yu.S., Kister I.V. Compositional design of multicomponent foodstuff // *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2013. № 12(118). P. 42-46. (in Russian)

4. Donskikh N.V. Development of an automated information system for calculating and optimizing recipes. *Izvestiya vuzov. Food technology*. 2011. № 2-3 (320-321). P. 122-123. (in Russian)
5. Zelenina L.S., Zyuzina O.V. Development of polycomponent food systems by computer modeling // *Vestnik TSTU*. 2011. Volume 17. № 4. P. 992-1000. (in Russian)
6. Computer-aided design of complex multicomponent food products: textbook / E.I. Muratova et al. Tambov: FGBOU VPO "TSTU", 2011. 80 p. (in Russian)
7. Lisitsyn A., Chernukha I., Nikitina M. Russian methodology for designing multi-component foods in retrospect // *Foods and Raw materials*. 2020. Vol. 8, № 1. P. 2-11.
8. Development of recipes for functional drinks using natural dyes / T.V. Yakovleva et al. // *New technologies*. 2021. Vol. 17. № 3. P. 59-70. (in Russian)
9. Production of functional confectionery products with the use of vegetable food additives / A.A. Tyagushcheva et al. // *Science news in the agro-industrial complex*. 2021. № 2. P. 359-361. (in Russian)
10. Development of technology and recipes for rich bakery products enriched with food additives / M.A. Kazimirova et al. // *New technologies*. 2018. № 1. P. 37-42. (in Russian)
11. Lisin, P.A. Computer modeling of polycomponent dairy products // *Food industry*. 2006. № 11. P. 60-61. (in Russian)
12. Yu P., Low M., Zhou W. Design of experiments and regression modeling in food flavor and sensory analysis: A review // *Trends in Food Science & Technology*. 2017. Vol. 71. P. 202-215.
13. Martens M., Tenenhaus M., Vinzi V.T. et al. The use of partial least squares methods in new food product development // *Consumer-Led Food Product Development*. 2007. P. 492-523.
14. Wirawan N.N., Fahmida U., Purwestri R.C. et al. Development of Food Multi-Mix Using a Linear Programming Approach to Fill the Nutrient Gap of Amino Acids and Micronutrients for Stunted Non-Wasted Children // *Foods*. 2023 Vol. 12. № 1. 64.
15. Berezina N.A., Artemov A.V., Nikitin I.A. et al. The Use of a Simplex Method with an Artificial basis in Modeling of Flour Mixtures for Bakery Products // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2017. Vol. 8. № 17. P. 338-344.
16. Squeo G., De Angelis D., Leardi R. et al. Background, Applications and Issues of the Experimental Designs for Mixture in the Food Sector // *Foods*. 2021. Vol. 10. № 5. 1128.
17. Ławrynowicz A., Wróblewska A., Adrian W.T. et al. Food Recipe Ingredient Substitution Ontology Design Pattern // *Sensors*. 2022. Vol. 22. № 3. 1095.
18. Krbez J., Shaout A. Fuzzy Nutrition System // *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*. 2013. Vol. 1. P. 1360-1371.
19. Derkanosova N.M., Vasilenko O.A., Shelamova S.A. et al. Use of the fuzzy-set theory in designing enriched bakery products // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 624. 012126.
20. Loza A.A. Evaluation of the effectiveness of new food products, taking into account the use of innovations // *RJOAS*. 2017. № 9(69). P. 247-252. (in Russian)
21. Gona S.N.R., Marellapudi H. Suggestion and invention of recipes using bi-directional LSTMs-based frameworks // *SN Applied Sciences*. 2021 Vol. 3. 553.
22. Tian Y., Zhang C., Metoyer R. et al. Recipe Recommendation With Hierarchical Graph Attention Network // *Frontiers in Big Data*. 2022 Vol. 4. 778417.
23. Guidelines MP 2.3.1.0253-21. Norms of physiological needs for energy and nutrients for various groups of the population of the Russian Federation. Approved 2021-22-07. M: 2021. 72 p. (in Russian)