Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-3-64-69 Оригинальная статья/Research article
УДК 519.677 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Моделирование рецептур с равнозначными компонентами при неопределенности целевого критерия

Ольга П. Назарова [1] nazarova77o@mail.ru 0000-0003-0636-4748
Наталья Л. Сосницкая [2] sosnickaya19@rambler.ru 0000-0002-1118-1834

1 Мелитопольский государственный университет, пр-т Б.Хмельницкого, 18, г. Мелитополь, 72319, Россия

Аннотация. При разработке продуктов сложного сырьевого состава число рецептурных ингредиентов нередко превышает шесть, что делает традиционные методы расчёта рецептур затруднительными. С математической точки зрения рецептурная задача сводится к системе линейных уравнений и неравенств-ограничений, описывающих энергетическую ценность, химический, витаминный, жирнокислотный, аминокислотный и минеральный состав продукта. Такая система является неопределённой и допускает множество неотрицательных решений, каждое из которых соответствует технологически допустимому варианту рецептуры; задача технолога – выбрать из них вариант с минимальной себестоимостью при сохранении качественных показателей. Целью работы являлась разработка расчётного блока в пакете Mathcad для решения рецептурных задач линейного программирования в условиях неопределённости целевого критерия. В качестве объекта моделирования выбрана рецептура фарша варёных колбас, включающая говядину 1-го сорта, свинину полужирную, мясо птицы механической обвалки, молоко сухое цельное и яйцо цельное (или крахмал). Опорные качественные характеристики фарша получены экспериментально в 30 опытах (по три параллельных) на модельных колбасах «Молочная высшего сорта» и «Столовая первого сорта». Система ограничений сформирована по шести показателям – массовой доле влаги, жира, белка, золы, водосвязывающей способности и предельному напряжению сдвига – как отклонение от опорных значений в пределах установленных допусков. Решение получено симплекс-методом при минимизации себестоимости и дополнительном ограничении биологической ценности фарша на уровне не менее 190 единиц. Разработанный расчётный блок не требует навыков программирования, допускает оперативную корректировку исходных данных и может применяться при проектировании многокомпонентных пищевых систем.

Ключевые слова: показатели, оптимизация, технологии, моделирование, компоненты, характеристики, смеси.

Modeling of recipes with equivalent components when the target criterion is uncertain

Olga P. Nazarova [1] nazarova77o@mail.ru 0000-0003-0636-4748
Natalya L. Sosnickaya [2] sosnickaya19@rambler.ru 0000-0002-1118-1834

1 Melitopol State University, Russia, p-t B. Hmelnickogo., 18 Melitopol, 72319, Russia

Abstract. In the development of products with a complex raw material composition, the number of recipe ingredients often exceeds six, which makes conventional methods of recipe calculation difficult to apply. From a mathematical standpoint, the recipe problem reduces to a system of linear equations and inequality constraints describing the energy value and the chemical, vitamin, fatty acid, amino acid and mineral composition of the product. Such a system is indeterminate and admits a set of non-negative solutions, each corresponding to a technologically acceptable recipe variant; the task of the technologist is to select from them the variant with the minimum cost while maintaining the required quality indicators. The aim of the work was to develop a calculation block in the Mathcad package for solving linear programming recipe problems under uncertainty of the target criterion. The recipe of minced meat for cooked sausages was chosen as the modelling object, comprising first-grade beef, semi-fat pork, mechanically deboned poultry meat, whole milk powder and whole egg (or starch). The reference quality characteristics of the minced meat were obtained experimentally in 30 trials (three parallel runs each) on the model sausages "Molochnaya of the highest grade" and "Stolovaya of the first grade". The system of constraints was formed for six indicators – mass fractions of moisture, fat, protein and ash, water-binding capacity and ultimate shear stress – as deviations from the reference values within the established tolerances. The solution was obtained by the simplex method through cost minimisation with an additional constraint on the biological value of the minced meat of at least 190 units. The developed calculation block requires no programming skills, allows prompt adjustment of the input data and can be applied in the design of multicomponent food systems.

Keywords: indicators, optimization, technologies, modeling, components, characteristics, mixtures.

Введение

В пищевых технологиях при моделировании продуктов сложного сырьевого состава используют основной принцип теории сбалансированного питания – компоненты должны поступать в организм человека в определённом количестве и соотношении.

Сложность решения многокомпонентной рецептурной задачи состоит также в том, что в настоящее время при составлении рецептов продуктов питания применяют достаточно большое количество ингредиентов (от 6 и более). Использование в этом случае рассмотренных выше методов расчёта рецептур достаточно затруднено.

Для цитирования
Назарова О.П., Сосницкая Н.Л. Моделирование рецептур с равнозначными компонентами при неопределенности целевого критерия // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 3. С. 64–69. doi:10.20914/2310-1202-2026-3-64-69

For citation
Nazarova O.P., Sosnickaya N.L. Modeling of recipes with equivalent components when the target criterion is uncertain. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 3. pp. 64–69. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-3-64-69

© 2026, Назарова О.П. и др. / Nazarova. O.P. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

С математической точки зрения рецептурные расчёты представляют собой решение системы линейных уравнений и неравенств-ограничений. Система уравнений и неравенств позволяет адекватно описывать изменение энергетической ценности, химического, витаминного, жирнокислотного и аминокислотного, минерального состава для разрабатываемых пищевых рецептов в зависимости от соотношения и норм используемых ингредиентов.

Производственный интерес представляет неопределённая система, у которой множество неотрицательных решений. С технологической точки зрения это означает множество различных вариантов рецептур разрабатываемого состава продукта. Задача инженера-технолога состоит в том, чтобы из множества вариантов выбрать рецептуру с заданными параметрами, при которых соблюдается минимальная себестоимость, качественные показатели продукта, а также максимальный объем использования сырьевых ресурсов. При этом максимальная энергетическая ценность продукта должна сохраняться [7, 9, 10].

В настоящее время многие инженеры-технологи для снижения себестоимости продукта широко практикуют замену натуральных продуктов относительно дешёвыми ингредиентами.

Рецептурные задачи относятся к разделу линейного программирования, сущность которых заключается в том, чтобы из множества возможных вариантов рецептур выбрать по заданному признаку (функции цели) оптимальный план.

Качество пищевой продукции определяется совокупностью свойств её компонентов, благоприятно влияющих на здоровье человека. К показателям товарного качества относятся характеристики, по которым оценивается товар потребителем: внешний вид, цвет, запах, масса.

Поэтому актуальна проблема определения состава смеси из многих компонентов, а также оптимизация массовых долей компонентов, гарантирующих требуемые характеристики физико-химических и других свойств. Целью исследования является применение современных пакетов для решения задач линейного программирования на примере задачи пищевых технологий.

Для определения оптимального соотношения компонентов рецептурной смеси (в частности, фарша), например при производстве колбасных изделий, целесообразна в ходе эксперимента оптимизация технологии составления фарша, а не конечного продукта, так как качественные характеристики фарша являются управляемыми параметрами, в отличие от качественных характеристик конечного продукта [5, 10].

Предварительное натурное моделирование технологии составления фарша варёных колбас проводилось на фаршах, содержащих мясо птицы (кур и уток) механической обвалки. При этом были изготовлены модельные колбасы «Молочная высшего сорта» и «Столовая первого сорта» без добавления мяса птицы после механической обвалки и определены качественные характеристики фарша этих видов колбас. Всего было проведено 30 экспериментов (по три параллельных опыта). Результаты экспериментов были подвергнуты математической обработке. Полученные числовые значения характеристик приняты за опорные.

Материалы и методы

Многокомпонентные смеси относятся к классу сложных систем, характеризующихся большим числом взаимосвязанных параметров. Задача исследования таких систем осуществляется в условиях неопределённости. Использование методов линейного программирования, для конкретных задач (нестабильными качественными характеристиками сырья, условиями производства, спросом на продукцию, нечёткими целевыми технологическими, экономическими, социальными критериями управления) осложняет расчёты. Все это требует корректировки подходов при разработке новых и действующих технологий, а значит, необходим доступный пакет или готовые расчётные блоки для автоматизации и корректировки расчётов. Знание и применение математических методов даёт возможность получить модель прогноза. Исследователь должен иметь представление при проведении эксперимента о численных методах, компьютерном моделировании, свободно ориентироваться в современных программных продуктах, уметь работать с современными математическими пакетами (один из них MathCAD).

Современные пакеты позволяют достаточно быстро решать сложные системы уравнений, строить графики зависимости, выполнить операции с матрицами.

Формирование расчётных блоков является главным в методике обучения будущего инженера при решении задач [3].

Пакет MathCAD имеет мощный математический аппарат, позволяющий выполнять символьные вычисления, решать системы алгебраических и дифференциальных уравнений,

операции с векторами и матрицами, создавать программы, строить графики и поверхности и т. д. [1, 2].

Результаты и обсуждения

В отечественной и зарубежной научной литературе [8–11] широко представлена проблема решения задач в современных пакетах. Однако представленный материал рассмотрен на методах решения, но не привязан к практическому внедрению более сложных задач. Также в литературе [5– 7] представлен справочный материал для состава рецептур и демонстрируются балансовые уравнения и неравенства ограничения Исследователь не всегда может самостоятельно решить задачу линейного программирования и вынужден обращаться к специалисту, что затрудняет оперативную корректировку рецептур. это значительно затрудняет корректировку рецептур. Разработанные расчётные блоки, позволят исследователю самостоятельно и без каких-либо затруднений выполнять поставленные задачи.

В работе использована задача оптимизации методом линейного программирования. Реализация решения задачи представлена в пакете MathCad. Использование симплекс-метода для оптимизации рецептур многокомпонентных пищевых продуктов позволяет получить значительное снижение себестоимости проектируемого продукта без потери его качественных показателей. В основу решения рецептурной задачи положен фундаментальный закон – закон сохранения массы вещества, реализация которого основана на симплекс-методе [10].

Задача оптимизации, в которой требуется найти числа x_j, $j \in J$, обращающие в максимум (минимум) линейную форму

$$\sum_{j \in J} c_j x_j \to \max \qquad (1)$$

при линейных ограничениях (равенств и неравенств):

$$\begin{aligned} &\sum_{j \in J} a_{ij} x_j \le b_i, \ i \in K \\ &\sum_{j \in J} a_{ij} x_j = b_i, \ i \in I \end{aligned} \qquad (2)$$

называется общей задачей линейного программирования (ЛП). Здесь $J = \{1,2., n\}$, K, I – некоторые заданные конечные наборы индексов; c_j, a_{ij}, b_i, $j \in J$, $i \in K \bigcup I$ – заданные числа.

Задача, в которой требуется найти максимум линейной формы (1) при условиях (2) и условиях $x_j \ge 0$, $j \in J$ называется задачей линейного программирования в нормальной форме.

Цель программного моделирования рецептуры колбас, включающих в свой состав мясо птицы механической обвалки, заключалась в том, чтобы получить фарш, качественные характеристики которого максимально приближались к опорным.

Опорные (безразмерные) потребительские свойства (качественные характеристики) фарша модельной молочной колбасы высшего сорта содержат: влага – 69,00 ± 1,20; жир – 14,50 ± 1,00; белок – 15,00 ± 1,10; зола – 1,00 ± 0,07; водосвязывающая способность (ВСС) – 42,55 ± 12,50; предельное напряжение сдвига (ПНС) – 5700,00 ± 100,00.

Для решения задачи вводятся следующие обозначения массовых долей компонентов фарша:

M_1 – содержание говядины 1 сорта; M_2 – содержание свинины полужирной; M_3 – содержание мяса птицы механической обвалки; M_4 – содержание молока сухого цельного, M_5 – содержание яйца цельного (или крахмала). Таким образом, неравенства-ограничения будут иметь вид:

1) влага:

$67{,}80 \le 77{,}70\ M_1 + 66{,}00\ M_2 + 70{,}00\ M_3 + 4{,}00\ M_4 + 74{,}00\ M_5 \le 70{,}20$;

2) жир:

$13{,}50 \le 7{,}00\ M_1 + 16{,}00\ M_2 + 16{,}00\ M_3 + 25{,}00\ M_4 + 11{,}50\ M_5 \le 15{,}50$;

3) белок:

$13{,}90 \le 20{,}20\ M_1 + 17{,}00\ M_2 + 13{,}00\ M_3 + 26{,}00\ M_4 + 12{,}70\ M_5 \le 16{,}10$;

4) зола:

$0{,}93 \le 1{,}10\ M_1 + 0{,}80\ M_2 + 0{,}90\ M_3 + 0{,}40\ M_4 + 1{,}10\ M_5 \le 1{,}07$;

5) водосвязывающая способность ВСС:

$30{,}05 \le 60{,}00\ M_1 + 32{,}50\ M_2 + 37{,}00\ M_3 + 55{,}00\ M_4 + 15{,}00\ M_5 \le 55{,}05$;

6) предельное напряжение сдвига ПНС:

$5600{,}00 \le 7000{,}00\ M_1 + 6500{,}00\ M_2 + 4700{,}00\ M_3 + 370{,}00\ M_4 + 120{,}00\ M_5 \le 5800{,}00$;

7) условие для массовых долей имеет вид:

$M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 = 1$.

В качестве целевой функции в задаче выбран показатель относительной биологической ценности (БЦ) фарша.

Биологическая ценность характеризует пищевые свойства, вкусовые достоинства, энергоёмкость и безвредность продукта, служит «надёжным индикатором», по которому можно

тестировать ту или иную технологию производства животного сырья и продуктов [11].

Целевая функция биологической ценности (БЦ) имеет следующий вид:

БЦ = 150,00 M_1 + 180,00 M_2 + 260,00 M_3 + 100,00 M_4 + 125,00 M_5.

Цель оптимизационной задачи – определить M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, при которых биологическая ценность достигает максимума при ограничениях (1…7).

Критерий БЦ во многих вариантах достигает значения 190,00…192,00. Критерий себестоимости (СБ) фарша для поставленной задачи имеет вид:

$$СБ = 17{,}80\ M_1 + 17{,}40\ M_2 + 25{,}40\ M_3 + 17{,}40\ M_4 + 0{,}74\ M_5.$$

В критерии СБ порциальные себестоимости компонентов не являются постоянными величинами, а зависят от их рыночной стоимости и уровня технологии. Каждый из коэффициентов, входящих в целевой критерий СБ, является себестоимостью соответствующего компонента.

Задачу можно сформулировать следующим образом: необходимо найти M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, для которых себестоимость (СБ) фарша достигнет минимума при ограничениях (1…7) и дополнительном ограничении биологической ценности (БЦ) фарша [1]:

$$150{,}00\ M_1 + 180{,}00\ M_2 + 260{,}00\ M_3 + 100{,}00\ M_4 + 125{,}00\ M_5 \geq 190{,}00.$$

Внедрение современных информационных математических систем дает возможность осуществлять оптимизацию рецептурного состава многокомпонентных пищевых систем, проводить интегральную оценку сбалансированности проектируемых продуктов питания. Использование пакета MathCAD, позволяет разрабатывать рецептуру пищевых многокомпонентных продуктов с заданной пищевой, биологической и энергетической ценностью [4, 6, 8]. Листинг расчётного блока приведён на рисунке 1.

$X^T =$

	0	1	2	3	4	5
0	0	0.289	0.193	0.493	0.019	0.006

Рисунок 1. Листинг решения в пакете MathCad

Figure 1. Solution listing in Mathcad

Листинг программы прилагается (рисунок 2). Исследована многокомпонентная смесь (фарш), состоящая из говядины 1-го сорта, свинины полужирной, мяса птицы механической обвалки, молока сухого цельного, яйца цельного (или крахмала).

$$z(x) := 150x_1 + 180x_2 + 260x_3 + 100x_4 + 125x_5$$

Given

$$67.8 \leq 77.7x_1 + 66x_2 + 70x_3 + 4x_4 + 74x_5 \leq 70.2$$

$$13.5 \leq 7x_1 + 16x_2 + 16x_3 + 25x_4 + 11.5x_5 \leq 15.5$$

$$13.9 \leq 20.2x_1 + 17x_2 + 13x_3 + 26x_4 + 12.7x_5 \leq 16.1$$

$$0.93 \leq 1.1x_1 + 0.8x_2 + 0.9x_3 + 0.4x_4 + 1.1x_5 \leq 1.07$$

$$30.05 \leq 60x_1 + 32.5x_2 + 37x_3 + 55x_4 + 15x_5 \leq 55.05$$

$$5600 \leq 7000x_1 + 6500x_2 + 4700x_3 + 370x_4 + 120x_5 \leq 5800$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 1 \qquad x_5 \geq 0.006 \qquad x \geq 0$$

$$X := \text{Maximize}(z, x)$$

Рисунок 2. Листинг расчётного блока в пакете MathCad оптимальной рецептурной смеси (фарш)

Figure 2. Listing of the calculation block in the MathCad package for the optimal recipe mixture (minced meat)

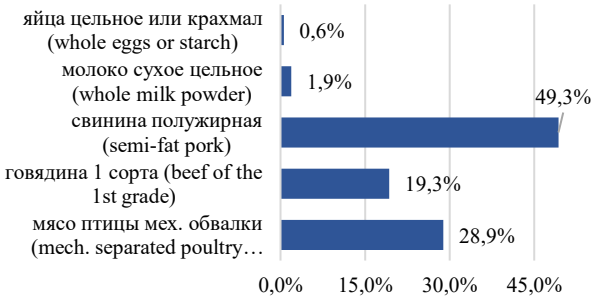


Рисунок 3. Состав оптимальной рецептурной смеси (фарш)

Figure 3. The composition of the optimal recipe mixture (minced meat)

Заключение

Разработан расчётный блок в пакете Mathcad, реализующий решение рецептурной задачи линейного программирования для многокомпонентной пищевой смеси в условиях неопределённости целевого критерия. Система ограничений построена по шести качественным характеристикам фарша – массовой доле влаги, жира, белка и золы, водосвязывающей способности и предельному напряжению сдвига – с условием нормировки суммы массовых долей. Найдены оптимальные дозировки компонентов смеси при минимизации себестоимости и дополнительном ограничении биологической ценности фарша на уровне не менее 190 ед.

Поскольку коэффициенты целевой функции зависят от рыночной стоимости сырья и уровня технологии, реализация расчёта в среде Mathcad позволяет оперативно пересчитывать рецептуру при изменении цен или требований к качеству продукта. Блок не требует навыков программирования и знания вычислительной схемы симплекс-метода, применяется в лабораторном практикуме по дисциплине «Моделирование в пищевых технологиях» и может быть использован при проектировании многокомпонентных пищевых систем.

Литература

1 Donkor N.A., Essien A., Affrifah N.S. A systematic review of linear programming techniques as applied to diet optimisation and opportunities for improvement // Journal of Optimization. 2023. V. 2023. P. 1271115. doi: 10.1155/2023/1271115

2 Назарова О.П. Моделирование и оптимизация рациона кормов для свиноводства // Сборник научных трудов ТГАТУ. Мелитополь, 2019. Вып. 19. Т. 2. С. 248–256.

3 García-Leal J., Espinoza Pérez A.T., van Dooren C., Vásquez Ó.C. A review of the use of linear programming to optimize diets, nutritiously, economically and environmentally // Frontiers in Nutrition. 2022. doi: 10.3389/fnut.2022.850033

4 van Dooren C., Tyszler M., Kramer G., Aiking H. Combining low price, low climate impact and high nutritional value in one shopping basket through diet optimization by linear programming // Sustainability. 2015. V. 7. № 9. P. 12837–12855. doi: 10.3390/su70912837

5 De Carvalho I.S.T., Granfeldt Y., Dejmek P., Håkansson A. From diets to foods: using linear programming to formulate a nutritious, minimum-cost porridge mix for children aged 1 to 2 years // Food and Nutrition Bulletin. 2015. V. 36. № 1. P. 75–85. doi: 10.1177/156482651503600107

6 Lauk J., Nurk E., Robertson A., Parlesak A. Culturally optimised nutritionally adequate food baskets for dietary guidelines for minimum wage Estonian families // Nutrients. 2020. V. 12. № 9. P. 2613. doi: 10.3390/nu12092613

7 Миронова Н.Г., Ковбаса В.Н. Разработка оптимальных рецептур сухих завтраков повышенной биологической ценности с использованием математического моделирования // Хранение и переработка сельхозсырья. 1998. № 1. С. 51–52.

8 Amiri M., Sarani Rad F., Li J. Delighting palates with AI: reinforcement learning's triumph in crafting personalized meal plans with high user acceptance // Nutrients. 2024. V. 16. № 3. P. 346. doi: 10.3390/nu16030346

9 Bashiri B., Kaleda A., Vilu R. Integrating multi-criteria decision-making with multi-objective optimization for sustainable diet design // Journal of Cleaner Production. 2025. V. 500. P. 145233. doi: 10.1016/j.jclepro.2025.145233

10 Das R., Das K.N., Mallik S. An efficient evolutionary optimizer for solving complex dairy feed optimization problems // Computers and Electronics in Agriculture. 2023. V. 204. P. 107566. doi: 10.1016/j.compag.2023.107566

11 Ghosh S., Ghosh J., Pal D.T., Gupta R. Current concepts of feed formulation for livestock using mathematical modeling // Animal Nutrition and Feed Technology. 2014. V. 14. № 1. P. 205–223.

12 Parlesak A., Tetens I., Jensen J.D. et al. Use of linear programming to develop cost-minimized nutritionally adequate health-promoting food baskets // PLOS ONE. 2016. V. 11. doi: 10.1371/journal.pone.0163411

13 Шамкова Н.Т., Тамова М.Ю., Варивода А.А., Шелест Н.С. Математическое моделирование рецептуры овсяного печенья, обогащенного продуктами переработки топинамбура // Новые технологии. 2022. Т. 18. № 3. С. 106–117. doi: 10.47370/2072-0920-2022-18-3-106-117

14 Конева М.С., Гасымов Т.М., Усатиков С.В., Бугаец Н.А. Многокритериальная оптимизация сбалансированности состава и органолептических показателей специализированных продуктов питания противоанемической направленности // Известия вузов. Пищевая технология. 2016. № 1 (349). С. 110–113.

15 Bai Y., Herforth A., Masters W.A. Global variation in the cost of a nutrient-adequate diet by population group: an observational study // The Lancet Planetary Health. 2022. V. 6. № 1. P. e19–e28. doi: 10.1016/S2542-5196(21)00285-0

16 Иванова М.В. Оптимизация рецептуры молочных продуктов в табличном процессоре Excel // Современные проблемы и перспективы развития агропромышленного комплекса: сб. тр. III Междунар. науч.-практ. студ. конф.-конкурса, Вологда, Молочное, 22 ноября 2020 г. Вологда: ВГМХА им. Н.В. Верещагина, 2021. С. 164–167.

17 Михайлова Л.Р. Современный программный продукт для расчета кормовых рационов // Перспективные технологии и инновации в АПК в условиях цифровизации: мат. II Междунар. науч.-практ. конф., Чебоксары, 10 февраля 2023 г. Чебоксары: Чувашский ГАУ, 2023. С. 445–447.

18 Гращенков Д.В., Дубенко С.Э., Чугунова О.В. Применение методов математического моделирования при разработке рационов заданной пищевой ценности // Индустрия питания. 2023. Т. 8. № 1. С. 84–91. doi: 10.29141/2500-1922-2023-8-1-9

19 Ольховский Н.А., Соколинский Л.Б. Визуальное представление многомерных задач линейного программирования // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2022. Т. 11. № 1. С. 31–56. doi: 10.14529/cmse220103

20 Назарова О.П., Сосницкая Н.Л. Моделирование физических задач средствами MathCad // Современные тренды в междисциплинарных исследованиях и их практическое применение: монография. Вып. 110. В 2 ч. Ч. 2. Уфа: Аэтерна, 2026. С. 49–72.

References

1 Donkor N.A., Essien A., Affrifah N.S. A systematic review of linear programming techniques as applied to diet optimisation and opportunities for improvement. Journal of Optimization. 2023. vol. 2023. article 1271115. doi: 10.1155/2023/1271115.

2 Nazarova O.P. Modeling and optimization of feed ration for pig breeding. Collection of Scientific Works of TSATU. Melitopol, 2019. iss. 19. vol. 2. pp. 248–256. (in Russian).

3 García-Leal J., Espinoza Pérez A.T., van Dooren C., Vásquez Ó.C. A review of the use of linear programming to optimize diets, nutritiously, economically and environmentally. Frontiers in Nutrition. 2022. [Online first]. doi: 10.3389/fnut.2022.850033.

4 van Dooren C., Tyszler M., Kramer G., Aiking H. Combining low price, low climate impact and high nutritional value in one shopping basket through diet optimization by linear programming. Sustainability. 2015. vol. 7. no. 9. pp. 12837–12855. doi: 10.3390/su70912837.

5 De Carvalho I.S.T., Granfeldt Y., Dejmek P., Håkansson A. From diets to foods: using linear programming to formulate a nutritious, minimum-cost porridge mix for children aged 1 to 2 years. Food and Nutrition Bulletin. 2015. vol. 36. no. 1. pp. 75–85. doi: 10.1177/156482651503600107.

6 Lauk J., Nurk E., Robertson A., Parlesak A. Culturally optimised nutritionally adequate food baskets for dietary guidelines for minimum wage Estonian families. Nutrients. 2020. vol. 12. no. 9. article 2613. doi: 10.3390/nu12092613.

7 Mironova N.G., Kovbasa V.N. Development of optimal recipes for dry breakfasts of increased biological value using mathematical modeling. Storage and Processing of Agricultural Raw Materials. 1998. no. 1. pp. 51–52. (in Russian).

8 Amiri M., Sarani Rad F., Li J. Delighting palates with AI: reinforcement learning's triumph in crafting personalized meal plans with high user acceptance. Nutrients. 2024. vol. 16. no. 3. article 346. doi: 10.3390/nu16030346.

9 Bashiri B., Kaleda A., Vilu R. Integrating multi-criteria decision-making with multi-objective optimization for sustainable diet design. Journal of Cleaner Production. 2025. vol. 500. article 145233. doi: 10.1016/j.jclepro.2025.145233.

10 Das R., Das K.N., Mallik S. An efficient evolutionary optimizer for solving complex dairy feed optimization problems. Computers and Electronics in Agriculture. 2023. vol. 204. article 107566. doi: 10.1016/j.compag.2023.107566.

11 Ghosh S., Ghosh J., Pal D.T., Gupta R. Current concepts of feed formulation for livestock using mathematical modeling. Animal Nutrition and Feed Technology. 2014. vol. 14. no. 1. pp. 205–223.

12 Parlesak A., Tetens I., Jensen J.D. et al. Use of linear programming to develop cost-minimized nutritionally adequate health-promoting food baskets. PLOS ONE. 2016. vol. 11. [Online first]. doi: 10.1371/journal.pone.0163411.

13 Shamkova N.T., Tamova M.Yu., Varivoda A.A., Shelest N.S. Mathematical modeling of the recipe of oatmeal cookies enriched with Jerusalem artichoke processing products. New Technologies. 2022. vol. 18. no. 3. pp. 106–117. doi: 10.47370/2072-0920-2022-18-3-106-117 (in Russian).

14 Koneva M.S., Gasymov T.M., Usatikov S.V., Bugaets N.A. Multi-criteria optimization of the balance of composition and organoleptic indicators of specialized food products with anti-anemic orientation. News of Universities. Food Technology. 2016. no. 1 (349). pp. 110–113. (in Russian).

15 Bai Y., Herforth A., Masters W.A. Global variation in the cost of a nutrient-adequate diet by population group: an observational study. The Lancet Planetary Health. 2022. vol. 6. no. 1. pp. e19–e28. doi: 10.1016/S2542-5196(21)00285-0.

16 Ivanova M.V. Optimization of the recipe of dairy products in the Excel spreadsheet. In: Current Problems and Prospects for the Development of the Agro-Industrial Complex: Collection of works of the III International Scientific and Practical Student Conference-Competition, Vologda, Molochnoe, November 22, 2020. Vologda: VGMKhA named after N.V. Vereshchagin, 2021. pp. 164–167. (in Russian).

17 Mikhailova L.R. Modern software product for calculating feed rations. In: Promising Technologies and Innovations in the Agro-Industrial Complex in the Context of Digitalization: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, Cheboksary, February 10, 2023. Cheboksary: Chuvash State Agrarian University, 2023. pp. 445–447. (in Russian).

18 Grashchenkov D.V., Dubenko S.E., Chugunova O.V. Application of mathematical modeling methods in the development of diets of specified nutritional value. Food Industry. 2023. vol. 8. no. 1. pp. 84–91. doi: 10.29141/2500-1922-2023-8-1-9 (in Russian).

19 Olkhovsky N.A., Sokolinsky L.B. Visual representation of multidimensional linear programming problems. Bulletin of SUSU. Series: Computational Mathematics and Informatics. 2022. vol. 11. no. 1. pp. 31–56. doi: 10.14529/cmse220103 (in Russian).

20 Nazarova O.P., Sosnitskaya N.L. Modeling of physical problems by means of MathCad. In: Modern Trends in Interdisciplinary Research and Their Practical Application: Monograph. Iss. 110. In 2 parts. Part 2. Ufa: Aeterna, 2026. pp. 49–72. (in Russian).

Сведения об авторах

Ольга П. Назарова к.т.н., доцент, кафедра высшей математики, физики и методики преподавания физико-математических дисциплин,, Мелитопольский государственный университет, пр-т Б.Хмельницкого 18, г. Мелитополь, 72319, Россия, nazarova77o@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-0636-4748

Наталья Л. Сосницкая д.п.н., профессор, кафедра высшей математики, физики и методики преподавания физико-математических дисциплин, Мелитопольский государственный университет, Мелитопольский государственный университет пр-т Б.Хмельницкого, 18, 72319, sosnickaya19@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0002-1118-1834

Information about authors

Olga P. Nazarova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, higher mathematics, physics and methods of teaching physical and mathematical disciplines department, Melitopol State University, B. Khmelnitsky Ave. 18, Melitopol, 72319, Russia, nazarova77o@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-0636-4748

Natalya L. Sosnickaya Dr. Sci. (Pedag.), professor, higher mathematics, physics and methods of teaching physical and mathematical disciplines department, Melitopol State University, B. Khmelnitsky Ave. 18, Melitopol, 72319, Russia, sosnickaya19@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0002-1118-1834

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 13/06/2026	**После редакции** 20/07/2026	**Принята в печать** 10/08/2026
Received 13/06/2026	**Accepted in revised** 20/07/2026	**Accepted** 10/08/2026