

Drake M.A. Invited review: sensory analysis of dairy foods. *J. Dairy Sci.* 90, 4925-4937. 2007.

Flom J.D., Sicherer S.H. Epidemiology of cow's milk allergy. *Nutrients* 11. 2019.

Loffredi E., Moriano M.E., Masseroni L., Alamprese C. Effects of different emulsifier substitutes on artisanal ice cream quality. *Lwt*, 137. Article 110499. 10.1016/j.lwt.2020.110499. 2021.

Schepers J., Annemans L. The potential health and economic effects of plant-based food patterns in Belgium and the United Kingdom. *Nutrition*. 2018. 48, 24-32.

Stasiak J., Stasiak D., Libera J. The potential of aquafaba as a structure-shaping additive in plant-derived food technology. 2023/

Tomczyk E. Pro-ecological social attitudes as one of today's ways of understanding sustainable development. *Contemporary nutritional trends: Vegetarianism and veganism. Zrównowazony Rozw. Deb. Nauk.* 2018. 3, 111-118. (In Polish.)

Сведения об авторах

Восканян Ольга Станиславовна, доктор технических наук, профессор, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского.

Шипилова Полина Александровна, студентка четвертого курса факультета пищевых технологий и биоинженерии.

М.В. Клоконос, В.И. Карпов, И.А. Никитин, О.А. Орловцева, С.Н. Тефилова

M.V. Klokonos, V.I. Karpov, I.A. Nikitin, O.A. Orlovtseva, S.N. Tefikova

ОПТИМИЗАЦИЯ НУТРИЕНТНОГО СОСТАВА ПИЩЕВОЙ СМЕСИ ПРИ УЧЕТЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

OPTIMIZATION OF THE NUTRIENT COMPOSITION OF THE FOOD MIXTURE WITH CONSIDERING INDIVIDUAL CONSUMER LIMITATIONS

Аннотация:

В работе рассматривается задача оптимизации нутриентного состава пищевой смеси, которая предназначена для включения в рационы лиц, генетически предрасположенных к заболеваниям, возникающим вследствие нарушения минеральной плотности костной ткани (МПКТ), путем подбора соотношений по количеству основного и дополнительного сырья в рецептуре смеси. Проведена математическая постановка задачи и получен результат ее решения с помощью компьютерной программы. Формирование оптимального состава смеси рассчитывалось с использованием двух критериев — ограничений по соотношению основного и дополнительного сырья и учета заданных требований эталона по количеству макронутриентов и значимых микронутриентов, которые позволят обеспечивать своевременную нутрициологическую поддержку людей с предрасположенностью к нарушению МПКТ. Для смоделированного образца пищевой смеси определены базовые органолептические и физико-химические показатели качества (влажность, кислотность, массовая доля белка и жира), проводимые в соответствии с нормативными документами.

Ключевые слова: персонализированное питание, остеопороз, генетическая предрасположенность, нутригенетика, нутригеномика.

Abstract:

The paper considers the problem of optimizing the nutrient composition of the food mixture, which is intended to be included in the diets of persons genetically predisposed to diseases arising from a violation of bone mineral density (BMD), by selecting the ratios according to the amount of main and additional raw materials in the mixture recipe. The mathematical formulation of the problem is carried out and the result of its solution is obtained using a computer program. The formation of the optimal composition of the mixture was calculated taking into account two criteria — restrictions on

the ratio of the main and additional raw materials and taking into account the specified requirements of the standard for the amount of macronutrients and significant micronutrients, which will provide timely nutritional support for people with a predisposition to impaired BMD. For the simulated sample of the food mixture, the basic organoleptic and physico-chemical quality indicators (humidity, acidity, mass fraction of protein and fat) were determined, carried out in accordance with regulatory documents.

Keywords: personalized nutrition, osteoporosis, genetic predisposition, nutrigenetics, nutrigenomics.

Весомый вклад в повседневную жизнь человека стремительно вносят новые тренды, связанные с цифровизацией, персонализацией и глобализацией общества. Глобальные изменения происходят и в сфере производства продуктов питания, а также обеспечения общества продовольственными продуктами, в которых не только изменены основные пищевые характеристики, но улучшены усвояемость и сбалансированность состава в соответствии с индивидуальными потребностями отдельных групп граждан²⁶.

В современной системе производства пищевой продукции перспективным является применение наработок новых направлений, таких как нутригенетика, нутригеномика, эпигеномика и других, возникших путем объединения научных знаний в области нутрициологии, диетологии, биохимии и биологии (генетики). Нутригенетика позволяет исследовать влияние генотипа на развитие и распространение заболеваний, ассоциированных с метаболическими процессами. Нутригеномика, в свою очередь, занимается вопросами взаимосвязи аспектов питания человека с индивидуальными возможностями и особенностями его генома, определяющими влияние отдельных компонентов пищи на экспрессию генов и на состояние человека в целом²⁷.

²⁶ Сидоренко Ю.И., Никитин И.А., Хайрулин М.Ф., Сидоренко М.Ю. Тенденции трансформации технологий продовольственного обеспечения в условиях глобализации // Хлебопродукты. 2020. № 1. С. 44-48; Nikitina M.A., Nikitin I.A., Semenina N.G., Zavalishin I.V., Goncharov A.V. Application of the hierarchy analysis method at the foodstuffs quality evaluation // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2018. Vol. 9. № 5. P. 51-59.

²⁷ Кунакова Р.В., Зайнуллин Р.А., Хуснутдинова Э.К., Ялаев Б.И. Здоровое питание XXI века: функциональные продукты питания и нутригеномика // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2016. Т. 21. № 8 (88). С. 5-14; Ferguson L.R. Nutrigenomics approaches to functional foods // Journal of the American Dietetic Association. 2009. № 109. P. 452-458. (DOI: 10.1016/j.jada.2008.11.024).

Следуя основным подходам нутригенетики, можно сделать несколько важных заключений:

1. Для снижения рисков возникновения заболеваний, связанных с нарушением метаболических реакций в организме, эффективными могут быть правильно подобранные соотношения нутриентов или их комбинации в составе продукта.

2. При введении в пищевой рацион нутриентов, положительно влияющих на экспрессию гена, становится возможным оказание своевременной врачебной помощи и поддержки человеку, заключающейся в снижении рисков неинфекционных алиментарно-зависимых заболеваний. А в отдельных случаях это может способствовать реализации скрытых возможностей организма, имеющих положительный потенциал²⁸.

К числу заболеваний, идентифицируемых при помощи генетических тестов, относятся заболевания, связанные с нарушением костного метаболизма. На современном этапе конкретизирован перечень нутриентов, обеспечивающих нормальный уровень обменных процессов при ремоделировании костной ткани. К основным компонентам относят кальций, являющийся главным нутриентом кости, и витамин D, обеспечивающий его усвоение и ассимиляцию. Однако совместно с этими нутриентами необходимы также аскорбиновая кислота, витамины группы В (В₆ и В₁₂), макроэлементы (фосфор, магний, калий) и микроэлементы (цинк, кремний, медь, марганец, селен, бор и некоторые другие), которые косвенно влияют на костный метаболизм, а нехватка их может быть ассоциирована с нарушением обмена и снижением плотности костной массы. Поэтому при наследственной предрасположенности к нарушению метаболизма костной ткани необходимо соблюдать особую диету, обеспечивающую поступление вышеперечисленных нутриентов в достаточном количестве.

Продовольственный рынок, особенно в мегаполисах, представлен широким ассортиментом продукции для здорового питания. Однако не всегда конкретные группы товаров могут удовлетворить потребности человека, имеющего ограничения в питании, например, при генетической предрасположенности к возникновению заболеваний. Развитие современных технологий позволяет говорить о «проектировании» пищевых продуктов с заданными свойствами.

²⁸ Müller M., Kersten S. Opinion: Nutrigenomics: goals and strategies // Nature Reviews Genetics. 2003. № 4. P. 315-322; Ivanova V.N., Nikitin I.A., Zhuchenko N.A., Nikitina M.A., Sidorenko Yu.I., Karpov V.I., Zavalishin I.V. Clustering of multidimensional objects in the formation of personalized diets // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2019. Vol. 10. № 2. P. 45-50.

В последнее десятилетие активно развиваются компании, производящие продукцию быстрого питания, которая зачастую характеризуется низкой пищевой ценностью, что определяет актуальность большого количества научных исследований, направленных на улучшение состава такой продукции. К числу продуктов быстрого питания относятся и порошкообразные или сухие пищевые смеси, которые перед употреблением необходимо разбавить водой, молоком или соком в соотношениях, рекомендуемых производителем. Стоит отметить, что при всей простоте приготовления разработчики рекомендуют употреблять подобную продукцию только в рационах питания людей, не имеющих проблем со здоровьем.

Поэтому разработка персонализированных пищевых продуктов в области быстрого питания для людей с различными видами генетических предрасположенностей является актуальной. При разработке таких продуктов, способствующих снижению или предупреждению заболеваний, связанных с нарушением МПКТ, необходимо следовать требованиям по соотношению характерных нутриентов в составе проектируемого продукта.

Для моделирования пищевой смеси в нашем исследовании применялись следующие виды сырья: мальтодекстрин, обогащающая добавка «Цегепал 03-С», изолированный соевый белок, концентрат молочного белка, порошкообразный инулин, комплексный жировой продукт «Бониграса», пшеничные отруби, лактат кальция, витаминно-минеральный комплекс, порошок из сублимированных ягод черной смородины.

Задача состояла, во-первых, в проектировании рецептуры персонализированной пищевой смеси, максимально приближенной к эталонному соотношению нутриентов, а во-вторых, в определении критерия оптимизации соотношения количества в рецептуре смеси основного и дополнительного сырья при условии их пропорционального состава 88:12 %.

Исходными данными для решения поставленной задачи являются: эталонный состав пищевой смеси, базирующийся на нормах физиологических потребностей в основных веществах и энергии; литературные данные российских и зарубежных ученых по профилактике остеопороза; вектор показателей качества смеси: i — соотношение основного сырья; j — количество нутриентов в 100 г сырья; k — соотношение дополнительного сырья; l — вариант купажа смеси и $ingr(i,j)$ — показатель качества ингредиента.

Оценка качества готовой пищевой смеси осуществлялась в соответствии с ГОСТ 33933-2016²⁹ по органолептическим и физико-химическим показателям.

²⁹ ГОСТ 33933-2016. Продукты диетического лечебного и диетического про-

Для решения поставленной задачи использовалось выражение, определяющее необходимый набор ингредиентов, исходя из наличия в них конкретных нутриентов, в составе смеси³⁰:

$$Ingr(i) = \langle ingr(i,j) \rangle, i = 1, N, j = 1, M \quad (1)$$

где $ingr(i,j)$ — показатель качества j ингредиента i ($j=1$ — количество белка на 100 г сырья, г; $j=2$ — количество жира на 100 г сырья, г; $j=3$ — количество витамина С на 100 г сырья, г; $j=4$ — количество витамина D3 на 100 г сырья, г; $j=5$ — количество кальция на 100 г сырья, г; $j=6$ — количество кремния на 100 г сырья, г; $j=7$ — количество магния на 100 г сырья, г; $j=8$ — количество фосфора на 100 г сырья, г; $j=9$ — количество цинка на 100 г сырья, г; $j=10$ — количество марганца на 100 г сырья, г; $j=11$ — количество меди на 100 г сырья, г; $j=12$ — количество селена на 100 г сырья, г; $j=13$ — количество калия на 100 г сырья, г; $j=14$ — количество железа на 100 г сырья, г; $j=15$ — количество витамина B6 на 100 г сырья, г; $j=16$ — количество витамина B12 на 100 г сырья, г).

Тогда набор дополнительных ингредиентов будет рассчитываться согласно выражению:

$$Dob(k) = \langle dob(k,j) \rangle, k = 1, K, j = 1, M \quad (2)$$

где $dob(k,j)$ — показатель качества j добавки k .

Вектор эталона показателей качества смеси (ингредиентов и добавок) определяли согласно выражению:

$$Et = \langle et(j) \rangle, j = 1, M \quad (3)$$

где $et(j)$ — показатель качества j эталонного купажа.

Необходимым будет определение двух векторов

$$Vingr = \langle vingr(i) \rangle \text{ и } Vdob = \langle vdob(k) \rangle$$

где $vingr(i)$ — содержание i -го ингредиента в купаже смеси, %, $vdob(k)$ — содержание k -й добавки в купаже смеси, %.

Тогда показатели качества l -й смеси ($Kkup(l) = \langle kkup(l,j) \rangle$) будут определяться согласно условию:

$$kkup(l,j) = \sum_{i=1}^N vingr(l,i) * ingr(i,j)/100 + \sum_{k=1}^K vdob(l,k) * dob(k,j)/100 \quad (4)$$

где $kkup(l,j)$ — показатель качества j купажа l , $vingr(li,i)$ — содержание i -го ингредиента в l -ном варианте купажа, $ingr(i,j)$ — значение

филактического питания. Смеси белковые композитные сухие. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2016. 11 с.

³⁰ Карпов В.И., Портнов Н.М. Оптимизация рецептурного состава пищевого продукта // Системный анализ в проектировании и управлении: Материалы XXIV Международной научной и учебно-практической конференции, Санкт-Петербург, 13-14 октября 2020 г. СПб.: «Политех-Пресс», 2020. С.169-182.

j -го показателя качества i -го ингредиента, $v_{dob}(l,k)$ — содержание k -ой добавки в l -м варианте купажа, $dob(k,j)$ — значение j -го показателя качества k -ой добавки.

Допустимым решением задачи обозначили векторы $Vingr$ и $Vdob$, которые удовлетворяют ограничениям (5)—(8).

Ограничения:

$$\forall l \sum_{i=1}^N vingr(l, i) = s1 \quad (5)$$

$$\forall l \sum_{k=1}^K dob(l, k) = s2 \quad (6)$$

$$s1 + s2 = 100 \quad (7)$$

$$\forall l \forall i (vingr(l, i) \in mN) \quad (8)$$

$$\forall l \forall k (dob(l, k) \in mN)$$

где $s1, s2$ — заданные проценты содержания основных ингредиентов и добавок соответственно; mN — множество натуральных чисел.

Оптимальным решением задачи будем называть допустимое решение, минимизирующее критерий Q , представленный ниже.

Критерий оптимизации:

$$Q(l) = \sum_{j \in J(l)} ((et(l, j) - kкуп(l, j)) / et(l, j))^2 \quad (9)$$

где $J(l) = E\{j | et(l, j) - kкуп(l, j) > 0\}$

Оптимальное значение критерия Q_{opt} определяется таким l , для которого Q минимально:

$$Q_{opt} = \min Q(l) \quad (10)$$

Разработанный алгоритм приводит к получению решения и обеспечению наиболее оптимальных значений нутриентов в рецептуре пищевой смеси согласно заданному эталону. Химический состав разработанного образца в сравнении с эталоном приведен в Таблице 1, где микронутриенты расположены в порядке своей значимости в процессе ремоделирования костной ткани.

Данные Таблицы 1 позволили подобрать соотношение компонентов спроектированной пищевой смеси, максимально удовлетворяющее требованиям, которые следует применять при разработке продуктов питания для людей с генетической предрасположенностью к заболеваниям, связанным с нарушением метаболизма костной ткани.

Согласно рекомендуемым нормам по нутриентному составу, при употреблении одной порции продукта человек сможет удовлетворить суточную потребность по кальцию на 110 %, селену на 194 %, кремнию на 251 %, фосфору на 117 %, марганцу на 149 % и витамину D_3 на 152 %³¹.

Табл. 1. Химический состав спроектированной пищевой смеси.

Пищевые компоненты	Эталон для 1 порции смеси	Опытный образец 1 порции пищевой смеси	Удовлетворение суточной потребности в нутриентах для людей с предрасположенностью к МПКТ (%)
<i>Макронутриенты</i>			
Белки, г	18,4	23,99	33,3
Жиры, г	21,4	15,93	19,2
Углеводы, г	94,5	37,91	10,4
<i>Микронутриенты</i>			
Кальций, мг	460,0	506,83	25,3
Холекальциферол (витамин D_3), мкг	11,5	17,5	35,0
Фосфор, мг	276,0	322,46	26,9
Железо, мг	5,85	27,43	117,2
Магний, мг	160,0	55,41	34,6
Калий, мг	575,0	519,87	20,8
Марганец, мг	0,892	1,33	33,3
Цинк, мг	3,8	26,02	154,9
Кремний, мг	14,5	36,50	57,9
Медь, мг	0,64	2,83	100,0
Селен, мкг	61,18	118,68	56,8
Аскорбиновая кислота (витамин С), мг	92,0	336,42	84,1

³¹ Клоконос М.В. Проектирование продуктов и рационов для людей с предрасположенностью к нарушению минеральной плотности костной ткани: Дисс. ... канд. техн. наук. М., 2021. 152 с.

Пищевые компоненты	Эталон для 1 порции смеси	Опытный образец 1 порции пищевой смеси	Удовлетворение суточной потребности в нутриентах для людей с предрасположенностью к МПКТ (%)
Пиридоксин (витамин В ₆), мг	0,46	4,53	120,8
Цианокобаламин (витамин В ₁₂), мкг	0,69	0,8	26,6

Количества вышеозначенных нутриентов превышают среднесуточные нормы потребления для здоровых людей, но с учетом ориентирования разработанной смеси на группу потребителей с предрасположенностью к нарушению МПКТ нормы по этим нутриентам были увеличены для достижения рационально-сбалансированного купажа пищевой смеси. Однако среднесуточные предельно-допустимые концентрации не превышают установленных норм по соответствующим нутриентам³².

На основании полученных данных разработанную с применением методов математического моделирования смесь можно рекомендовать людям, генетически предрасположенным к заболеваниям, связанным с нарушением МПКТ. Однако достаточно важным критерием в оценке качества смеси является не только сбалансированный нутриентный состав, но и сопоставление с контрольными значениями, предусмотренными в нормативных документах. Поэтому опытный образец подвергался проверке органолептических и физико-химических показателей качества³³, представленных в Таблице 2.

Показатели качества проверялись согласно ГОСТ 33933-2016. Проведенные исследования показали, что нутриентно адаптированная пищевая смесь не имеет существенных отклонений от предъявляемых требований. Это подтверждает возможность ее рекомендации к приме-

³² Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации. Методические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 36 с.

³³ ГОСТ 33933-2016. Продукты диетического лечебного и диетического профилактического питания. Смеси белковые композитные сухие. Общие технические условия.

нению в рационах питания людей, предрасположенных к нарушению МПКТ.

Вывод: разработанная программа проектирования состава пищевых смесей позволяет в рамках принятых ограничений по содержанию основного и дополнительного сырья в составе смеси получить рациональное соотношение по количеству витаминов и минеральных веществ согласно заданному эталону. В интерфейсе разработанной программы также выводятся данные по соотношению вносимых ингредиентов, учитывающих заданные параметры.

Таким образом, использование программы оптимизации нутриентного состава может позволить технологам-разработчикам более комплексно подходить к созданию новых видов пищевых продуктов и рациона в целом.

Табл. 2. Органолептические и физико-химические показатели качества пищевой смеси.

Наименование показателя	Значения по ГОСТ 33933-2016	Опытный образец
<i>Органолептические показатели</i>		
Внешний вид	Порошкообразный продукт, имеющий агломерированные частицы. Присутствует незначительное количество комочков, которые рассыпаются при легком механическом воздействии	Порошкообразный продукт, имеющий агломерированные частицы. Присутствует незначительное количество комочков, которые рассыпаются при легком механическом воздействии
Цвет	Кремовый	Изменение цвета от кремового до кремового с синеватым оттенком в связи с внесением в качестве дополнительного сырья порошка черной смородины
Запах	Свойственный основным ингредиентам данной смеси быстрого приготовления, без посторонних запахов	Свойственный основным ингредиентам смеси с сочетанием запаха черной смородины

Наименование показателя	Значения по ГОСТ 33933-2016	Опытный образец
<i>Физико-химические показатели</i>		
Массовая доля влаги, %	не более 8,0	0,5
Кислотность, град.	от 8,0 до 12,0 включ.	8,1

Список литературы

ГОСТ 33933-2016. Продукты диетического лечебного и диетического профилактического питания. Смеси белковые композитные сухие. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2016. 11 с.

Карпов В.И., Портнов Н.М. Оптимизация рецептурного состава пищевого продукта // Системный анализ в проектировании и управлении: Материалы XXIV Международной научной и учебно-практической конференции, Санкт-Петербург, 13-14 октября 2020 г. СПб.: «Политех-Пресс», 2020. С.169-182.

Клоконос М.В. Проектирование продуктов и рационов для людей с предрасположенностью к нарушению минеральной плотности костной ткани: Дисс. ... канд. техн. наук. М., 2021. 152 с.

Кунакова Р.В., Зайнуллин Р.А., Хуснутдинова Э.К., Ялаев Б.И. Здоровое питание XXI века: функциональные продукты питания и нутригеномика // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2016. Т. 21. № 8 (88). С. 5-14.

Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации. Методические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 36 с.

Сидоренко Ю.И., Никитин И.А., Хайрулин М.Ф., Сидоренко М.Ю. Тенденции трансформации технологий продовольственного обеспечения в условиях глобализации // Хлебопродукты. 2020. № 1. С. 44-48.

Ferguson L.R. Nutrigenomics approaches to functional foods // Journal of the American Dietetic Association. 2009. № 109. P. 452-458. (DOI: 10.1016/j.jada.2008.11.024).

Ivanova V.N., Nikitin I.A., Zhuchenko N.A., Nikitina M.A., Sidorenko Yu.I., Karpov V.I., Zavalishin I.V. Clustering of multidimensional objects in the formation of personalized diets // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2019. Vol. 10. № 2. P. 45-50.

Müller M., Kersten S. Opinion: Nutrigenomics: goals and strategies // Nature Reviews Genetics. 2003. № 4. P. 315-322.

Nikitina M.A., Nikitin I.A., Semenkina N.G., Zavalishin I.V., Goncharov A.V. Application of the hierarchy analysis method at the foodstuffs quality evaluation // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2018. Vol. 9. № 5. P. 51-59.

Сведения об авторах

Клоконос Мария Вячеславовна, кандидат технических наук, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского. E-mail: m.klokonos@mgutm.ru

Карпов Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского. E-mail: vikarp@mail.ru

Никитин Игорь Алексеевич, доктор технических наук, доцент, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского. E-mail: i.nikitin@mgutm.ru

Орловцева Ольга Александровна, кандидат технических наук, доцент, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского. E-mail: starosta1981@inbox.ru

Тефикова Светлана Николаевна, кандидат технических наук, доцент, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского. E-mail: teffikova@mail.ru