

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-4-543-550>

Поступила 15.08.2024

Поступила после рецензирования 13.11.2024

Принята в печать 18.11.2024

© Никитина М. А., Чернуха И. М., Артамонова М. П., Кусай А. Т., 2024

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Open access

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТАВА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПИЩЕВОГО ПРОДУКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИМУЛЯЦИИ

Никитина М. А.^{1,*}, Чернуха И. М.¹, Артамонова М. П.², Кусай А. Т.^{2,3}¹Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, Москва, Россия²Российский биотехнологический университет (Росбиотех), Москва, Россия³Университет Хамы, Хама, Сирия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

пищевой продукт,
цифровой
двойник, цифровая
модель, датчики,
жизненный цикл
продукта, ошибка,
прогнозирование

Одним из фронтиров науки является разработка цифрового двойника пищевого продукта для прогнозирования состава и свойств будущего продукта. Однако в настоящее время для прогнозирования состава пищевого продукта используют компьютерную симуляцию (моделирование). Цель нашего исследования сопоставить значения показателей пищевой ценности цифровой модели и реального пищевого продукта, и оценить адекватность полученных данных. Объектами исследования были эмульгированный мясорастительный продукт на основе традиционного блюда «Мухаммара» и цифровая модель (компьютерный симулятор) рецептуры эмульгированного мясорастительного продукта. На примере разработки эмульгированного мясорастительного продукта на основе традиционного блюда «Мухаммара» показаны этапы разработки цифрового двойника пищевого продукта. Показана некорректность использования цифровой модели без подкрепления ее данными (числовыми значениями), полученных с приборов, датчиков. В исследовании сравнили расчетные показатели с данными, полученными эмпирическим путем (в результате лабораторного эксперимента) в трех блоках: физико-химические показатели, витамины и минеральные вещества. Симуляцию и расчет абсолютной и относительной ошибки осуществляли в программной среде R Studio. Расхождение в данных расчетных и эмпирических, во-первых, можно объяснить средними значениями показателей, которые содержатся в базах данных пищевых продуктов. В базах данных на данный момент времени содержатся усредненные данные, не учитывающие индивидуальные характеристики сырья животного и растительного происхождения. Во-вторых, необходимо учитывать коэффициент потерь (или коэффициент сохранения) пищевых нутриентов при тепловой или термической обработке пищевого продукта. Установлено, что только разработка точного цифрового двойника с учетом всех параметров поможет отслеживать параметры качества на каждом этапе производства, что позволит оперативно реагировать на отклонения и улучшать качество конечного продукта.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию FGUS-2024-0003 ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН.

Received 15.08.2024

Accepted in revised 13.11.2024

Accepted for publication 18.11.2024

© Nikitina M. A., Chernukha I. M., Artamonova M. P., Qusay A. T., 2024

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

PREDICTING COMPOSITION OF A FUNCTIONAL FOOD PRODUCT USING COMPUTER SIMULATION

Marina A. Nikitina^{1,*}, Irina M. Chernukha¹, Marina P. Artamonova², Abu Trabi Qusay^{2,3}¹V.M. Gorbатов Federal Research Center for Foods Systems, Moscow, Russia²Russian Biotechnological University (Rosbiotech), Moscow, Russia³University of Hama, Hama, Syria

KEY WORDS:

food, digital twin,
digital model, sensor,
product lifecycle, error,
prediction

ABSTRACT

One of the frontiers of science is the development of a digital twin for a food product to predict composition and properties of a future product. Today, however, computer simulation (modeling) is used for predicting the composition of a food product. The aim of our research is to compare the levels of the nutritional value parameters from a digital model and a real food product and to assess adequacy of the obtained data. The objects of the research were the emulsified meat-and-plant product based on the traditional meal "Mukhammar" and a digital model (computer simulator) of the recipe of the emulsified meat-and-plant product. By the example of the development of the emulsified meat-and-plant product based on the traditional meal "Mukhammar", stages of the development of a digital twin of a food product are shown. It was demonstrated that it is incorrect to use a digital model without supporting it with data (numerical values) obtained from apparatus, sensors. The calculated parameters were compared with the data obtained empirically (as a result of the laboratory experiment) in three blocks: physico-chemical indicators, vitamins and minerals. Simulation and calculation of the absolute and relative errors were performed in the program environment R Studio. Differences between the calculated and empirical data can be explained, firstly, by the average values of parameters in food product databases. As for now, databases contain averaged data, which do not take into account individual characteristics of animal and plant raw materials. Secondly, it is necessary to take into consideration the coefficient of losses (or coefficient of preservation) of food nutrients during thermal treatment of food. It has been established that only the development of the precise digital twin with regard to all parameters will help to trace quality parameters at each stage of the production, which will allow reacting timely to deviations and improving quality of the final product.

FUNDING: The article was published as part of the research topic No. FGUS-2024-0003 of the state assignment of the V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of RAS.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Никитина, М. А., Чернуха, И. М., Артамонова, М. П., Кусай, А. Т. (2024). Прогнозирование состава функционального пищевого продукта с использованием компьютерной симуляции. *Пищевые системы*, 7(4), 543–550. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-4-543-550>

FOR CITATION: Nikitina, M. A., Chernukha, I. M., Artamonova, M. P., Qusay, A.T. (2024). Predicting composition of a functional food product using computer simulation. *Food Systems*, 7(4), 543–550. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-4-543-550>

1. Введение

«Мухаммара» (по-арабски “reddened” красный) — пряный густой соус из грецких орехов, красного болгарского перца и гранатовой патоки без добавления какого-либо мяса. Соус появился в Сирии и Ливане. Рецепт соуса различается в зависимости не только от региона, но и способа приготовления в ближневосточных семьях. В своем исследовании при конструировании эмульгированного мясорастительного продукта к ингредиентам традиционного блюда «Мухаммара» было добавлено 1) куриное филе (филе грудки); 2) филе мяса индейки для получения более высокой пищевой ценности.

Пищевой продукт богатый белком позволяет человеку чувствовать себя более сытым несмотря на небольшой объем порции, и тем самым помогает контролировать вес. Как известно [1,2,3] здоровый вес приводит к уменьшению факторов риска возникновения проблем с сердцем, таких как высокий уровень триглицеридов и высокое кровяное давление. Наряду с этим мясо птицы содержит триптофан, который связан с изменением концентрации серотонина в человеческом мозге [4,5]. В состав разработанного пищевого продукта также входят красный болгарский перец, грецкие орехи, оливковое масло, гранатовый соус и кунжутная паста. Грецкие орехи обладают повышенной антиоксидантной активностью, по сравнению с другими видами орехов. Данное свойство обусловлено наличием витаминов Е, мелатонина и полифенолов [6]. Красный болгарский перец способствует укреплению клеток, что является защитой от таких состояний, как ишемическая болезнь сердца и другие неинфекционные болезни. Кроме того, красный болгарский перец особенно богат питательными веществами, предотвращающими рак, включая витамины С, Е и бета-каротин, содержит большое количество полифенолов (защитные растительные соединения включают лютеин, кверцетин и капсантин). Гранатовый соус, также входящий в состав пищевого продукта, богат антиоксидантами и витамином С, позволяет увеличить выработку лейкоцитов, которые являются первой линией защиты иммунной системы и влияют на снижение уровня холестерина. Полифенольные соединения, содержащиеся в гранатовом соусе, также снижают уровень вредного холестерина в организме человека. В следствии чего снижается вероятность развития атеросклероза, инсультов и сердечных приступов. Уровень витамина В в гранатовом соусе высок, что улучшает метаболизм, а также способствует естественному росту и развитию [7]. Богатый витамином К кунжут обогащает продукт компонентом, участвующим в образовании белков, способствующих свертываемости крови, способствуя нормализации кровообращения и профилактике инсультов. Кофеин, по мнению австралийских ученых, положительно влияет на профилактику ожирения [8]. Наряду с этим в кофе содержатся такие природные антиоксиданты как хлорогеновая кислота — мощный ДНК протектор, а также тригонеллин — капилляропротектор. Это привносит в продукт функциональные свойства и усиливает его действие как кардиопротектор. По данным экспертов суточное рекомендуемое поступление антиоксидантов составляет 3000–5000 в единицах ORAC (Oxygen Radical Absorbance Capacity). Это количество антиоксидантов обеспечивает значительный антиоксидантный потенциал плазмы и тканей организма и способствует снижению воздействия окислительного стресса, провоцируемого свободными радикалами. По содержанию биоактивных веществ можно предположить, что в «Мухаммаре» заложен потенциал положительного воздействия на организм человека.

Процесс разработки рецептов новых пищевых или функциональных продуктов и первичной апробации их соответствия задаваемым требованиям могут быть значительно ускорены и упрощены с помощью цифрового двойника.

Цифровой двойник пищевого продукта — виртуальная модель, которая отражает характеристики и жизненный цикл реального продукта. Поведение будущего продукта и определение его выходных показателей с использованием цифрового двойника является более наглядным и прозрачным способом оптимизации состава и свойств пищевого продукта с максимальным приближением к его назначению. Анализ научных исследований показал, что на данном этапе нет цифровых двойников пищевого продукта. Ученые исследователи используют, как правило цифровую модель или цифровую тень пищевого продукта.

Цифровые двойники открывают огромные возможности в прогнозировании и контроле характеристик качества пищевых продуктов, прослеживаемости. Особенно это значимо при разработке персонализированных продуктов питания. Как известно, на качество готового пищевого продукта влияют различные показатели (физико-химические, реологические и т. д.) входного сырья. Сезонные колебания показателей, в том числе связанных с сортавыми и по-

родными особенностями сельскохозяйственного сырья оказывают существенное влияние на его характеристики, таким образом, корректировка параметров в технологическом процессе имеет важное значение.

Kritzinger и др. [9] в своей работе на основании анализа литературных источников разделили понятие цифровых двойников на три основные категории: 1) цифровая модель; 2) цифровая тень; 3) цифровой двойник. Основное различие между этими тремя категориями заключается в потоке информации между цифровым объектом (процессом) и физическим объектом (процессом).

Самый низкий уровень цифрового двойника — цифровая модель, она не подключена ни к какому потоку информации, создается и работает на автономных данных.

Цифровая тень имеет односторонний поток информации от физического объекта к цифровому объекту, данные поступают в режиме реального времени. Эта информация используется ядром цифровой модели для прогнозирования эволюции единичной технологической операции.

Цифровой двойник требует двунаправленного потока информации, где действия по управлению технологическими операциями выполняются на основе прогнозов, сделанных цифровой моделью на основе текущей информации о процессе.

В настоящее время в публикациях чаще всего встречается низкий уровень цифрового двойника, либо цифровая модель, либо цифровая модель, реализованная на компьютере, — компьютерный симулятор [10]. Согласно ГОСТ Р 57700.21–2020, компьютерная симуляция (моделирование) — «моделирование, выполненное с использованием компьютерной (цифровой) модели... выполняют с целью получения данных, необходимых для принятия решений... в ходе жизненного цикла»¹.

Cabeza-Gil и соавторы [11] разработали цифровой двойник процесса приготовления французского блина. ЦД контролирует процесс приготовления с использованием обычной сковороды с датчиком температуры и весами. Используя данные с датчиков (температура сковороды и вес теста) ЦД в режиме реального времени рассчитывает несколько параметров, которые описывают состояние блина, включая его температуру, цвет и потерю веса. Это позволяет получить информацию о готовности пищи и оценивать, когда ее следует переворачивать или снимать со сковороды. ЦД французского блина разработан с использованием нейронной сети, обученной на более чем 400 000 точек данных моделирования. Средняя абсолютная погрешность составила менее 5%. Авторы предлагают технологию, позволяющую автоматизировать процесс приготовления пищи, и имеет потенциальное применение как на домашних, так и на профессиональных кухнях.

Инновационная концепция цифрового клонирования гастрономических устройств (eGastronomic things) для мониторинга их функций и моделирования их работы представлена в статье [12]. Автомат приготовления мороженого и его трехмерный цифровой двойник визуализирован в трехмерной виртуальной среде, которая обеспечивает взаимодействие посредством дополненной или виртуальной реальности. Однако, анализ информации о состоянии, анализ сенсорных данных и алгоритмы прогнозирования оставлены для дальнейшего изучения. Цифровой двойник автомата приготовления мороженого защищен электронным шлюзом Интернета вещей, встроенным в машину и объединенным с платой сбора данных. Таким образом, устройство защищено от несанкционированного использования за счет реализации безопасного механизма контроля доступа.

Kannarinn и соавторы [13] в своем исследовании разработали структуру цифрового двойника, обеспечивающую автономность термической обработки пищевых продуктов. Температурные датчики внутри микроволновой печи формируют граничные и начальные условия имитационной модели. Моделирование, выполняемое в режиме реального времени, возвращает несколько будущих сценариев в систему управления автономным процессом устройства. На основании этих данных планируется траектория температуры печи для удовлетворения требований пользователя к определенной прожарке, содержанию влаги, минимальной температуре внутри или дезактивации патогенов в конце процесса. Например, приготовить мясо средней прожарки, нежное, тщательно поджаренное и достичь температуры готовности к употреблению в конкретный момент времени. Наряду с этим, возможно изменение целей пользователя во время процесса приготовления. Средняя квадратическая ошибка со-

¹ ГОСТ Р 57700.21–2020 «Компьютерное моделирование в процессах разработки, производства и обеспечения эксплуатации изделий. Термины и определения». — М.: Стандартинформ, 2020. — 12 с.

ставила менее 1 °C (0,2% средней процентной ошибки) на репрезентативных тестовых данных. Ускорение моделирования $Sr \approx 1,8 \times 10^4$ позволяет осуществлять предиктивный контроль модели.

Цифровой двойник (Digital twin) способен имитировать параметры технологического процесса и использоваться в качестве базы знаний в самоадаптирующейся программной системе [14].

Defraeye и др. [15] отмечают, что цифровой двойник пищевого продукта имеет особые дополнительные требования. Основываясь на законах физики, цифровые двойники дают расширенное представление об основных физических, биохимических, микробиологических и физиологических процессах, позволяя объяснить, почему происходит потеря качества. Например, скоропортящийся вид свежей садовой продукции, которая хранится при низких скоростях воздуха, проходящего через вентилируемую упаковку.

Основными аспектами разработки Digital Twins являются сбор данных, моделирование данных и применение данных [16]. Для сбора и хранения данных в режиме реального времени, получения информации для предоставления ценной информации и создания цифрового представления физического объекта используют такие технологии как Интернет вещей (IoT) [17], искусственный интеллект (AI) [18], расширенная реальность (XR) и облачные вычисления (Cloud) [19].

Как отмечает в обзорной статье Henrichs и др. [20] пять компонентов обеспечивают создание цифровых двойников: датчики, возможности интеграции, агрегированные данные из реального мира, аналитические методы и исполнительные механизмы. Они необходимы для объединения данных, связанных с пищевым продуктом и технологическим процессом в цифровом двойнике, а также для прогнозирования или анализа ситуации с помощью цифрового двойника.

Таким образом, цифровые двойники являются неотъемлемой частью кибер-физической системы².

Передача данных между цифровым и реальным объектом должна осуществляться посредством датчиков.

В своей работе Rajak и др. [22] проводят обсуждение потенциального применения IoT (интернета вещей) и интеллектуальных датчиков для точного мониторинга физико-химических показателей (влажность, температура, содержание влаги, содержание азота, качество почвы, парниковые газы) сельскохозяйственных земель. Используя датчики для мониторинга факторов окружающей среды, таких как осадки, влажность и температура, для достижения максимальной урожайности. Датчики с поддержкой Интернета вещей помогают измерить содержание воды и азота в почве. Наряду с этим на основе уровня содержания углекислого газа (CO₂) в земле можно эффективно контролировать скорость эвапотранспирации (испарения влаги) для улучшения качества урожая. Кроме этого, можно сократить (уменьшить) нападение вредителей, контролируя популяцию вредителей с помощью ловушек с поддержкой Интернета вещей, оснащенных камерой высокого разрешения и другими аксессуарами.

Alfian G. и соавторы [23] в своем исследовании предложили систему прослеживаемости пищевых продуктов *e-pedigree* для контроля и поддержания качества корейской кимчи. Объединяя технологии RFID (Radio frequency identification) меток, WSN (wireless sensor network) и интеллектуального анализа данных, система прослеживаемости обеспечивает полную историю качества пищевых продуктов от фермы до розничного продавца с предоставлением данных о температуре и влажности пищевого продукта на всех этапах.

В обзорной статье Yu и др. [24] подводит итоги о 3D-реконструкции (создании виртуальной модели) в сельском хозяйстве, животноводстве и пищевой промышленности. Отмечает, что датчики играют решающую роль в технологии 3D-реконструкции, предоставляя необходимые данные для создания виртуальных моделей. В большинстве случаев для 3D-реконструкции используются оптические датчики, такие как монокулярные камеры, стереокамеры, камеры RGB-D, системы обнаружения и определения дальности объекта в окружающей среде, с использованием света, точнее лазерного луча (LiDAR, Light Detection and Ranging), лазерные сканеры и т. д.

Для оценки качества фруктов на основе 3D-реконструкции существенным препятствием является точное определение различных характеристик, включая форму, размер, а также дефекты кожицы. Mon и ZarAung [25] предложили способ для оценки объема и трех-

мерной формы плода манго. Ширина и длина плода манго были получены из двухмерного (2D) цветного изображения. Толщина плода оценивалась на основе распределения интенсивности света в 2D (вид сверху) плода манго и максимальной корреляции ширины и толщины. Затем реконструируется трехмерная форма плода манго. В исследовании использовали 150 образцов манго. Точность предложенного способа — 96,8%.

Некоторые виды сельскохозяйственной продукции (например, яблоко, гуава) требуют осмотра с нескольких углов (ракурсов) для оценки внешнего вида. Однако использование нескольких изображений может привести к избыточным данным. В своей работе Yimyan и Clark [26] представили методы реконструкции 3D-объекта, создания новых изображений без дублированных областей объекта и извлечения характеристик цвета и текстуры для оценки. Использование характеристик, извлеченных из изображений с несколькими ракурсами без дублирования областей объекта, обеспечивает значительно более высокую точность, чем использование исходных изображений с несколькими ракурсами для сортировки яблок.

В работах Guo и др. [27], Ahmad и др. [28], Скобелева и соавторов [29] применяют цифровые двойники для принятия управленческих решений в КФС.

В публикации [30] сказано, что потребители желают все больше и больше новых продуктов питания, изготовленных по индивидуальному заказу, и, по возможности, без дополнительных затрат. Например, это продукты здорового питания, продукты для этнических и религиозных групп и т. д. Быстро меняющиеся тенденции, растущая мобильность населения, а с другой стороны, строгие требования к безопасности пищевых продуктов, требование прослеживаемости отдельных этапов производства и сырья, а также меры, необходимые для предотвращения растраты ресурсов. Все эти проблемы (задачи) можно успешно преодолеть с помощью цифрового двойника и других решений цифрового предприятия.

Компания Mars совместно с Microsoft Azure использует цифровые двойники для оптимизации производства «шоколадных батончиков» для увеличения прибыли и сокращения отходов. ЦД даст возможность сотрудникам на местах принимать решения в режиме реального времени [31].

Цель нашего исследования спрогнозировать пищевую ценность будущего эмульгированного мясорастительного продукта на основе показателей, взятых из Базы данных химического состава пищевых продуктов и сырья животного и растительного происхождения. Сравнить экспериментальные и расчетные данные.

Исследование базируется на гипотезе о возможности виртуального проектирования пищевого продукта с заданным составом с минимальным отклонением от реального.

2. Объекты и методы

Объектами исследования были:

- 1) эмульгированный мясорастительный продукт на основе традиционного блюда «Мухаммара». В состав продукта входят:
 - охлажденное филе куриной грудки (Петелинская птицефабрика, Россия);
 - орехи грецкие очищенные отборные сырые сушеные («Орех-сити», Узбекистан);
 - кунжутная паста («Le Moulin», Тунис);
 - чеснок (ООО «Фермерский чеснок», Россия);
 - кофе черный молотый («Haseeb Serrado», Сирия);
 - перец чили острый стручковый («Prodigy Land», Таиланд);
 - паприка молотая («Индана», Россия);
 - гранатовый соус («Наршараб», Сирия);
 - оливковое нерафинированное масло первого холодного отжима («ALKHAIR», Сирия);
 - питьевая вода («Черноголовка», Россия);
 - соль пищевая («Руссоль», Россия).

Учитывая, что «блюдо» — это пищевой продукт или сочетание продуктов и полуфабрикатов, доведенных до кулинарной готовности, порционированное и оформленное (ГОСТ 31985–2013³), в своем исследовании мы оперировали термином «продукт» при разработке рецептуры и «блюдо» при оценке его органолептических характеристик и перспектив применения.

- 2) цифровая модель (компьютерный симулятор) рецептуры эмульгированного мясорастительного продукта.

Приготовление эмульгированного мясорастительного продукта на основе традиционного блюда «Мухаммара» предусматривало

² Кибер-физическая система (CPSs) — интеллектуальная система, которая включает в себя инженерные взаимодействующие сети физических и вычислительных компонентов. CPSs способны встраиваться в производственные процессы, улучшая обмен информацией между промышленным оборудованием, качественно преобразовывать производственные цепочки, эффективнее управлять бизнесом и клиентами. [21]

³ ГОСТ 31985–2013 «Услуги общественного питания. Термины и определения». — М. Стандартинформ, 2020. — 16 с.

варку мяса птицы — филе курицы (соотношение мясо:вода = 1:2, температура 95 °С, время 30 минут). Отваренное мясо курицы внесли в многофункциональную установку, сочетающую в себе функции перемешивания, гомогенизации и нагрева в условиях вакуума (FrymaKoruma MaxxD LAB, изготовитель Romaco FrymaKoruma, Германия) и добавляли сырые грецкие орехи, сырой очищенный чеснок, острый перец (промытый водой комнатной температуры), кунжутную пасту, гранатовый соус, тонкоизмолотый черный кофе, молотую паприку, оливковое масло, холодную воду (температура 5 °С), соль пищевую. Смесь гомогенизировали до получения однородной консистенции. В результате получили продукт мягкой гомогенной консистенции, желто-розового оттенка с легким привкусом пряностей, кунжута и мяса птицы.

Физико-химические показатели в сырье и готовом продукте определяли, используя следующие методы:

- массовую долю влаги — методом, основанным на высушивании анализируемой пробы с песком до постоянной массы при температуре $103 \pm 2^\circ\text{C}^4$;
- массовую долю белка — методом, основанным на минерализации органических веществ пробы с последующим определением азота по количеству образовавшегося аммиака (метод Кьельдаля)⁵;
- массовую долю жира — путем экстракции жира растворителем из высушенной анализируемой пробы в экстракционном аппарате Сокслета с последующим удалением растворителя и высушиванием выделенного жира до постоянной массы (метод Сокслета)⁶;
- массовую долю общей золы — озолением при температуре $550 \pm 25^\circ\text{C}$ пробы⁷;
- содержание углеводов — расчетным методом;
- содержание водорастворимых витаминов — методом высокоэффективной жидкостной хроматографии в ультрафиолетовой области спектра с заданной длиной волны. Полученные результаты в виде пиков на хроматограмме сопоставляют с пиками стандартных образцов с заведомо известными концентрациями⁸;
- содержание жирорастворимых витаминов — методом высокоэффективной жидкостной хроматографии в ультрафиолетовой области спектра с заданной длиной волны. Полученные результаты в виде пиков на хроматограмме сопоставляют с пиками стандартных растворов образцов витаминов известных массовых концентраций⁹;
- содержание калия, натрия, магния — методом пламенной атомной абсорбции¹⁰;
- содержание кальция — атомно-абсорбционным методом¹¹;
- содержание цинка и меди — инверсионно-вольтамперометрическим методом¹²;
- содержание минеральных веществ (железа, селена) по методическим указаниям¹³.

Расчетные значения пищевых нутриентов получали с использованием формулы:

$$z_j = k \cdot \frac{\sum_{i=1}^n b_{ij} x_i}{\sum_{i=1}^n x_i}, \quad j = \overline{1, m} \quad (1)$$

где b_{ij} — содержание j -го элемента химического состава (белка, жира, влаги и т. д.) в i -м рецептурном ингредиенте пищевого продукта;

⁴ ГОСТ 33319–2015 «Мясо и мясные продукты. Метод определения массовой доли влаги». — М. Стандартинформ, 2019. — 8 с.

⁵ ГОСТ 25011–2017 «Мясо и мясные продукты. Методы определения белка». — М. Стандартинформ, 2018. — 24 с.

⁶ ГОСТ 23042–2015 «Мясо и мясные продукты. Методы определения жира». — М. Стандартинформ, 2019. — 16 с.

⁷ ГОСТ 31727–2012 (ISO 936:1998) «Мясо и мясные продукты. Метод определения массовой доли общей золы». — М. Стандартинформ, 2019. — 13 с.

⁸ ГОСТ Р 55482–2013 «Мясо и мясные продукты. Метод определения содержания водорастворимых витаминов». — М. Стандартинформ, 2019. — 12 с.

⁹ ГОСТ 32307–2013 «Мясо и мясные продукты. Определение содержания жирорастворимых витаминов методом высокоэффективной жидкостной хроматографии».

¹⁰ ГОСТ Р 55482–2013 «Мясо и мясные продукты. Определение содержания натрия, калия, магния и марганца методом пламенной атомной абсорбции».

¹¹ ГОСТ Р 55573–2013 «Мясо и мясные продукты. Определение кальция атомно-абсорбционным и титриметрическим методами».

¹² ГОСТ 33824–2016 «Продукты пищевые и продовольственное сырье. Инверсионно-вольтамперометрический метод определения содержания токсичных элементов (кадмия, свинца, меди и цинка)».

¹³ МР 2.3.7.0168–20 Оценка качества пищевой продукции и оценка доступа населения к качественной пищевой продукции, способствующей устранению дефицита макро- и микронутриентов. Методические рекомендации».

x_i — массовая доля i -го ингредиентов рецептуры; n — количество ингредиентов рецептуры; m — количество пищевых нутриентов значения которых рассчитываем.

Информацию о химическом составе сырья животного и растительного происхождения брали из базы данных «Пищевые продукты» [32].

В качестве целевой функции (критерия оптимизации) использовали квадратичный критерий минимального отклонения от заданной структуры пищевой ценности:

$$P(z) = \sum_{j=1}^m (z_j^0 - z_j^{calculation})^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

$$z_j^{calculation} = \sum_{i=1}^n b_{ji} x_i,$$

где z_j^0 — эталонное (или нормативное) содержание j -го нутриента пищевой ценности; b_{ji} — удельное содержание j -го элемента химического состава (белка, жира, влаги и т. д.) в i -м рецептурном ингредиенте продукта; x_i — массовая доля i -го ингредиента рецептуры.

В связи с тем, что критерий оптимизации нелинейный, использовали метод нелинейной оптимизации — метод градиентного спуска [33,34,35]. Метод градиентного спуска — это итеративный алгоритм оптимизации, используемый для нахождения локального минимума функции. Основная идея которого заключается в последовательном улучшении оценки *argmin* функции $P(z)$ за счет движения в направлении противоположном направлению градиента. Алгоритм вычисляет градиент функции на каждой итерации. В R Studio используется библиотека *nlopt* [36].

Симуляцию (моделирование) проводили в среде R Studio по критерию пищевой ценности [37]. Программное обеспечение R представляет собой свободно распространяемый кроссплатформенный программный инструмент, используемый для статистических расчетов и визуализации данных. Дистрибутивы R доступны на веб-сайте The Comprehensive R Archive Network.

Сопоставление и анализ данных, полученных в результате математических расчетов с использованием цифровой модели эмульгированного мясорастительного пищевого продукта и данных, полученных в ходе лабораторных исследований, проводили с использованием абсолютной и относительной ошибки.

Абсолютная ошибка (AE) — это величина разницы между расчетным и измеренным значением.

$$AE = |y - y^{calculation}| \quad (3)$$

Относительная ошибка (RE) показывает размер ошибки относительно измеренного значения. Показывает размер ошибки в процентах.

$$RE = \frac{AE}{y} \cdot 100\% \quad (4)$$

Статистическую обработку полученных результатов проводили в табличном процессоре MS Excel при уровне значимости 0,05. Данные представлены в виде среднего значения и стандартного отклонения («Mean \pm SD»). Эксперименты проведены с 5-ти кратной повторностью.

3. Результаты и обсуждение

Согласно ГОСТ Р 57700.37–2021¹⁴ цифровой двойник изделия «разрабатывается и применяется на всех стадиях жизненного цикла изделия, изменяясь на каждой стадии». Поэтому для разработки цифрового двойника эмульгированного мясорастительного пищевого продукта необходимо описать его жизненный цикл вначале крупноблочно. На Рисунке 1 представлены три основных блока (этапа), которые необходимо разработать для получения цифрового двойника пищевого продукта. Первый этап включает формирование будущего пищевого продукта. Разработчик описывает вид продукта, его тип, назначение, диапазон основных показателей. Выбирается критерий оптимизации, с использованием кластеризации подбираются основные ингредиенты будущего продукта, устанавливаются диапазоны варьирования рецептурных ингредиентов. Таким образом формируется область допустимых решений. Подробно этот этап описан в нашей предыдущей работе [38]. Второй этап жизненного

¹⁴ ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения». — М.: Российский институт стандартизации, 2021. — 15 с.

цикла продукта связан с технологическим процессом и заключается в приготовлении кулинарного изделия, готового к употреблению в пищу, разделенного на порции. На этом этапе учитываются значения входных переменных (например, физико-химические показатели), контролируемые параметры (температура приготовления, время приготовления), регулируемые параметры и выходные переменные (физико-химические показатели, функционально-технологические свойства и т. д.). Таким образом, необходимо технологический процесс представить в виде технологических операций с описанием входных, выходных, контролируемых и регулируемых параметров. Выходные переменные на *i*-ой технологической операции являются входными переменными для *i*+1-й технологической операции. Далее необходимо каждую технологическую операцию описать с помощью уравнений математической физики. Этот этап представлен в работе [39]. Третий этап связан с оценкой того, как нутриенты смоделированного пищевого продукта будут перевариваться и усваиваться стенками желудка и кишечника. Желудочно-кишечный тракт человека в концепции имитационного моделирования рассматривается, как естественный биохимический реактор, обеспечивающий гидролиз пищевых веществ (белков, жиров, углеводов) их транспортировку и всасывание продуктов гидролиза через стенки кишечника в кровь. При моделировании должно учитываться множество переменных состояния человека, его пищеварительной системы и пищевого продукта. Поэтому для детального представления знаний в структурно-параметрической модели необходима коллаборация медиков, технологов, математиков. Разработка третьего этапа очень сложный и длительный процесс.

На Рисунке 1 красным квадратом выделены два этапа жизненного цикла пищевого продукта цифровые модели или цифровые тени, которых в настоящее время наиболее изучены и представлены в научных публикациях [11,12,13]. В работе [39] описано изменение химического состава и качественных показателей белка в зависимости от основного мясного сырья (филе грудки курицы, филе грудки индейки, бескостная говядина от тазобедренного отруба, бескостная баранина). Анализ показал, что несмотря на то, что мясо индейки диетическое, пищевой продукт с филе грудки индейки по показателям аминокислотной сбалансированности уступает продукту с мясом баранины.

В работе [40] с использованием компьютерного проектирования осуществили подбор соотношений мясного сырья (говядины и мяса птицы) с учетом следующих ограничений: сумма ненасыщенных жирных кислот и трансжиров должна быть не более 1,5 г/100 г и не более 10% от энергетической ценности.

В статье [41] представлена цифровая модель аналога мясного продукта из соевого фарша. В качестве функции цели ученые использовали стоимостной критерий. Основными ограничениями на 100 г пищевой ценности были: 1) массовая доля белка должна составлять 17,0%; 2) массовая доля жира должна быть не более 2,0%; 3) массовая доля углеводов должна быть не менее 6,5%; 4) массовая доля сухих веществ должна составлять не менее 27%.

На Рисунке 2 представлена пошаговая схема моделирования (моделирования) любого пищевого продукта. Как видно из схемы для получения достоверной цифровой модели необходимо учитывать поправочные весовые коэффициенты, чтобы учесть потери на протяжении всего технологического процесса. Весовые коэффициенты в нашей модели были установлены путем опроса квалифицированных экспертов-технологов с помощью методики экспертных оценок.

При тепловой обработке происходит уменьшение содержания некоторых витаминов из-за химических изменений и в результате потерь их во внешнюю среду. Степень разрушения зависит от приро-



Рисунок 1. Цифровой двойник жизненного цикла пищевого продукта

Figure 1. Digital twin of the life cycle of a food product

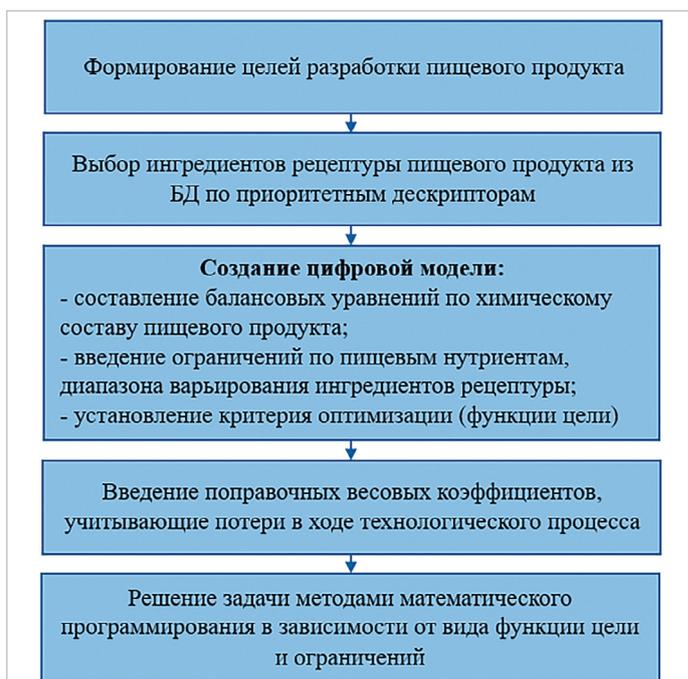


Рисунок 2. Схема моделирования (моделирования) пищевого продукта

Figure 2. Scheme of simulation (modeling) of a food product

ды витаминов (водорастворимые или жирорастворимые), температуры и продолжительности нагревания. Процент потерь витамина В₁ (тиамина) находится в диапазоне от 30 до 60%, витамина В₂ (рибофлавина) — 10–40%, витамина В₅ (пантотеновая кислота) — 15–30%, витамина В₃ (PP) (никотиновая кислота) — 10–35%, витамин В₆ (пиридоксин) — 30–60% [42,43].

При составлении цифровой модели эмульгированного мясорастительного продукта на основе традиционного блюда «Мухаммара» учтены потери основного мясного ингредиента (куриной грудки) при термической обработке. Используя уравнение (1) и данные о химическом составе пищевых ингредиентов, взятые из базы данных «Пищевые продукты» [39], получили систему балансовых уравнений по химическому составу пищевого продукта:

$$\begin{cases} Protein = (20.85 \cdot x_1 + 6.5 \cdot x_2 + 13.9 \cdot x_3 + 1.3 \cdot x_4 + 14.14 \cdot x_5 + 16.2 \cdot x_6 + 0.5 \cdot x_7 + 18.08 \cdot x_8) \cdot 0.99 \\ Fat = (9.25 \cdot x_1 + 0.5 \cdot x_2 + 14.4 \cdot x_3 + 0.44 \cdot x_4 + 12.89 \cdot x_5 + 60.8 \cdot x_6 + 50.87 \cdot x_7 + 99.8 \cdot x_8) \cdot 0.99 \\ \dots \\ Vitamin_{B1} = (0.1 \cdot x_1 + 0.08 \cdot x_2 + 0.07 \cdot x_3 + 0.07 \cdot x_4 + 0.1 \cdot x_5 + 0.39 \cdot x_6 + 0.04 \cdot x_7 + 0.24 \cdot x_8) \cdot 0.7 \end{cases}$$

где $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{11}$ — соответственно массовая доля компонентов в рецептуре, т. е. куриная грудка, чеснок, кофе черный молотый, перец острый (стручковый), паприка, грецкий орех, гранатовый соус, кунжутная паста, оливковое масло, вода и соль; 0,99... 0,7 — весовые коэффициенты, характеризующие сохранность пищевого нутриента при тепловой обработке.

В результате обработки данных расчетных и экспериментальных были получены следующие значения:

А) — в блоке физико-химических показателей (Таблица 1).

Как видно из Таблицы 1 значения в блоке физико-химических показателей очень сильно различаются. Расхождения 1) по массовой доле белка являются наименьшими (относительная ошибка равна 0,17%); 2) по массовой доле жира и массовой доле влаги относительная ошибка составляет 1% и 7,87%, соответственно, что также является приемлемым. Однако, наибольшее расхождение в значениях было получено по показателю массовой доли углеводов и массовой доли золы. Данная несогласованность может быть объяснена многими факторами: а) состав пищевого сырья имеет вероятностный разброс

Таблица 1. Расчетные и экспериментальные значения физико-химических показателей эмульгированного мясорастительного продукта на основе традиционного блюда «Мухаммара»

Table 1. Calculated and experimental values of the physico-chemical parameters of the emulsified meat-and-plant product based on the traditional meal "Mukhamar"

Показатель	Результат, г/100 г продукта	Расчетные значения, г/100 г продукта	Абсолютная ошибка, г/100 г продукта	Относительная ошибка, %
Массовая доля влаги	55,25 ± 0,15	59,6	4,35	7,87
Массовая доля жира	15,85 ± 0,25	16,01	0,16	1,00
Массовая доля белка	17,7 ± 0,10	17,67	0,03	0,17
Массовая доля углеводов	9,07*	6,33	2,74	30,00
Массовая доля золы	2,13 ± 0,02	0,39**	1,74	81,60

* Значение получено в ходе вычисления {100 — сумма (массовой доли влаги; массовой доли жира; массовой доли белка; массовой доли золы)}.

** Значение получено в ходе вычисления {100 — сумма (массовой доли влаги; массовой доли жира; массовой доли белка; массовой доли углеводов)}.

показателей, это связано и с регионом выращивания культуры или сельскохозяйственной птицы, животного; и б) видом растения, породой животного и т. д.; в) коэффициентом термопотерь, который имеет не конкретное значение, а диапазон варьирования.

Такой разброс между табличными и реальными значениями приемлем и описан исследователями. Например, по данным [44,45] диапазон варьирования белка в свинине нежирной от 18,8 ± 3,8 до 21,4 ± 3,0; в свинине полужирной от 15,1 ± 3,0 до 16,3 ± 3,3; в свинине жирной от 8,7 ± 1,7 до 14,6 ± 2,9; в говядине высшего сорта от 21,0 ± 2,9 до 23,1 ± 3,2; в говядине 1-го сорта от 18,8 ± 3,8 до 20,9 ± 2,9. В базе данных «Химический состав пищевых продуктов, используемых в Российской Федерации», размещенной на сайте ФИЦ питания, биотехнологии и безопасности пищи (<https://ion.ru/>) представлены следующие данные по белку: свинина полужирная — 17, свинина

жирная — 11,7, свинина нежирная — 14,3. Поэтому для устранения несовпадений в данных необходимо использовать «умные датчики» для определения контролируемых переменных входного сырья (первая задача). Значения, от которых поступают в цифровую модель или компьютерный симулятор будущего продукта.

Вторая более труднорешаемая задача, это установление конкретных значений потерь, которые происходят в результате термической обработки.

Б) — в блоке «Витамины» (Таблица 2).

В Таблице 2 в столбце «Расчетные значения» содержатся два показателя. Первый — значение без учета потерь при термообработке. Второй — значение с учетом выбранного коэффициента потерь при термообработке. От правильности выбранного коэффициента зависит «сходимость» расчетных и экспериментальных значений.

Например, диапазон варьирования потерь при термообработке витамина В₁ (тиамина), как было отмечено выше находится в пределах от 30 до 60%. Из данного диапазона при составлении цифровой модели пищевой системы можно взять любое значение, нами выбрано минимальное значение из этого диапазона — 30%. Таким образом, коэффициент сохранности витамина В₁ (тиамина) равен 0,7 (100% — 30% = 70%). Диапазон для витамина В₂ (рибофлавина) — 10–40%. В цифровой модели учитывается коэффициент 0,9, что соответствует 10% потерь при термообработке. Диапазон для витамина А — 15–50%. В цифровой модели учитывается коэффициент 0,5 (50% потерь при термообработке).

С учетом выбранных коэффициентов потерь при термообработке в цифровой модели эмульгированного мясорастительного продукта на основе традиционного блюда «Мухаммара» результаты по «сходимости» значений витаминов в модельной системе и эксперименте следующие: 1) наименьший процент в относительной погрешности показали витамин В₅ (пантотеновая кислота) и витамин С (аскорбиновая кислота) — 2,78 и 5,40, соответственно; 2) наибольший процент — витамин В₁ (тиамин) и витамин А — 14,71 и 14,74, соответственно.

С) — в блоке «Минеральные вещества» (Таблица 3).

В Таблице 3, аналогично Таблице 2 в столбце «Расчетные значения» содержатся два показателя без и с учетом коэффициента термопотерь. Наибольший дисбаланс между расчетными и эксперимен-

Таблица 2. Расчетные и экспериментальные значения витаминов эмульгированного мясорастительного продукта на основе традиционного блюда «Мухаммара»

Table 2. Calculated and experimental values of vitamins of the emulsified meat-and-plant product based on the traditional meal "Mukhamar"

Показатель	Результат, мг / 100 г продукта	Расчетные значения, мг / 100 г продукта		Абсолютная ошибка, мг / 100 г продукта	Относительная ошибка, %
		без учета потерь при термообработке	с учетом потерь при термообработке		
В ₁ (тиамин)	0,68 ± 0,12	0,82	0,58	0,10	14,71
В ₂ (рибофлавин)	Менее 0,05	0,09	0,08	Расчет ошибки не проводили, нет точного экспериментального значения	
В ₃ (РР) (никотиновая кислота)	2,72 ± 0,54	2,82	2,68	0,04	11,47
В ₅ (пантотеновая кислота)	0,72 ± 0,14	1,39	0,70	0,02	2,78
В ₆	0,38 ± 0,10	0,42	0,34	0,04	10,53
В ₉ (фолиевая кислота)	Менее 0,01	0,0098	0,002	Расчет ошибки не проводили, нет точного экспериментального значения	
С (аскорбиновая кислота)	50,72 ± 11,67	95,96	47,98	2,74	5,40
А	0,019 ± 0,01	0,033	0,016	2,84	14,74
Е	0,89 ± 0,13	1,00	1,00	0,11	12,36

Таблица 3. Расчетные и экспериментальные значения минеральных веществ эмульгированного мясорастительного продукта на основе традиционного блюда «Мухаммара»

Table 3. Calculated and experimental values of minerals of the emulsified meat-and-plant product based on the traditional meal "Mukhamar"

Показатель	Результат, мг / 100 г продукта	Расчетные значения, мг. / 100 г продукта		Абсолютная ошибка, мг / 100 г продукта	Относительная ошибка, %
		без учета потерь при термообработке	с учетом потерь при термообработке		
Кальций	145,67 ± 24,76	169,2	169,2	23,53	16,15
Калий	2008,58 ± 301,29	2744,2	2058,15	49,57	2,47
Натрий	3221,10 ± 515,38	4327,9	3245,93	24,83	0,78
Магний	711,88 ± 142,36	1038,4	726,9	15,02	2,11
Цинк	20,63 ± 4,31		НЕ РАССЧИТЫВАЛИ		
Железо	43,51 ± 8,41	56,14	39,3	4,21	9,68
Медь	6,19 ± 0,57		НЕ РАССЧИТЫВАЛИ		
Селен	0,04 ± 0,01	0,066	0,05	0,01	25

тальными данными в минеральных веществах эмульгированного мясорастительного продукта на основе традиционного блюда «Мухаммара» наблюдается у селена (Se) и кальция (Ca) — 25% и 16,15%, соответственно.

Мы рассмотрели каждый блок по отдельности, если рассматривать блоки в совокупности, то наихудший вариант получился по определению массовой доли золы (относительная погрешность 81,60%), наилучший вариант — массовой доли белка (относительная погрешность 0,17%). Оба эти показателя из блока «Физико-химических показатели».

4. Выводы

Промоделирована рецептура эмульгированного мясорастительного продукта на основе традиционного блюда «Мухаммара» с целью оптимизации его состава и усиления функциональных/антиоксидантных свойств за счет внесения природных ингредиентов-антиоксидантов —

гранатового соуса, кунжутной пасты и черного молотого кофе. Изготовлен продукт и проведено сравнение показателей с цифровой моделью. Исходные данные ингредиентов для модели взяты из общедоступных БД.

Расхождение данных 0,17% для белка, 81,6% для показателя содержания золы, а также по витаминам и минеральным веществам объясняются тем, что в базах данных содержатся усредненные физико-химические показатели сырья. Во-вторых, даже с учетом коэффициентов потерь при тепловой или термической обработке пищевого продукта возможны большие погрешности, это связано с особенностями сорта, условиями выращивания, сбора и хранения сырья и др.

В дальнейшем предполагается уточнить справочные данные, сформировать собственную базу данных показателей состава и качества мясного сырья с учетом генетических и фенотипических факторов, а также технологических аспектов (например, величин термопотерь).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК/REFERENCES

- Palatini, P., Saladini, F., Mos, L., Vriz, O., Ermolao, A., Battista, F. et al. (2024). Healthy overweight and obesity in the young: Prevalence and risk of major adverse cardiovascular events. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 34(3), 783–791. <https://doi.org/10.1016/j.numecd.2023.11.013>
- Kivimäki, M., Kuosma, E., Ferrie, J. E., Luukkonen, R., Nyberg, S. T., Alfredsson, L. et al. (2017). Overweight, obesity, and risk of cardiometabolic multimorbidity: Pooled analysis of individual-level data for 120813 adults from 16 cohort studies from the USA and Europe. *The Lancet Public Health*, 2(6), e277–e285. [http://doi.org/10.1016/S2468-2667\(17\)30074-9](http://doi.org/10.1016/S2468-2667(17)30074-9)
- Eckel, N., Meidtner, K., Kalle-Uhlmann, T., Stefan, N., Schulze, M.B. (2016). Metabolically healthy obesity and cardiovascular events: A Systematic review and meta-analysis. *European Journal of Preventive Cardiology*, 23(9), 956–966. <http://doi.org/10.1177/2047487315623884>
- Nayak, B.N., Singh, R.B., Buttar, H.S. (2022). Biochemical and dietary functions of tryptophan and its metabolites in human health. Chapter in a book: *Functional Foods and Nutraceuticals in Metabolic and Non-Communicable Diseases*. Academic Press, 2022. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819815-5.00003-3>
- Gupta, S.K., Vyavahare, S., Blanes, I.L.D., Berger, F., Isales, C., Fulzele, S. (2023). Microbiota-derived tryptophan metabolism: Impacts on health, aging, and disease. *Experimental Gerontology*, 183, Article 112319. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2023.112319>
- Wang, J., Liu, J., John, A., Jiang, Y., Zhu, H., Yang, B. et al. (2022). Structure identification of walnut peptides and evaluation of cellular antioxidant activity (2022). *Food Chemistry*, 388, Article 132943. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132943>
- Kalaycioglu, Z., Erim, F.B. (2017). Total phenolic contents, antioxidant activities, and bioactive ingredients of juices from pomegranate cultivars worldwide. *Food Chemistry*, 221, 496–507. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.084>
- Larsson, S.C., Woolf, B., Gill, D. (2023). Appraisal of the causal effect of plasma caffeine on adiposity, type 2 diabetes, and cardiovascular disease: Two sample mendelian randomisation study. *BMJ Medicine*, 2, Article e000335. <https://doi.org/10.1136/bmjmed-2022-000335>
- Kritzing, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sih, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Santner, T.J., Williams, B.J., Notz, W.I. (2018). *The Design and Analysis of Computer Experiments*. New York: Springer, 2018. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8847-1>
- Cabeza-Gil, I., Ríos-Ruiz, I., Martínez, M.A., Calvo, B., Grasa, J. (2023). Digital twins for monitoring and predicting the cooking of food products: A case study for a French crêpe. *Journal of Food Engineering*, 359, Article 111697. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111697>
- Karadeniz, A.M., Arif, İ., Kanak A., Ergün S. (May 26–29, 2019). *Digital Twin of eGastronomic Things: A Case Study for Ice Cream Machines*. In Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Sapporo, Japan, 2019. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2019.8702679>
- Kannapinn, M., Pham, M.K., Schäfer, M. (2022). Physics-based digital twins for autonomous thermal food processing: Efficient, non-intrusive reduced-order modeling. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 81, Article 103143. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103143>
- Krupitzer, C., Roth, F.M., VanSyckel, S., Schiele, G., Becker, C. (2015). A survey on engineering approaches for self-adaptive systems. *Pervasive and Mobile Computing*, 17(Part B), 184–206. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2014.09.009>
- Defraeye, T., Shrivastava, C., Berry, T., Verboven, P., Onwude, D., Schudel, S. et al. (2021). Digital twins are coming: Will we need them in supply chains of fresh horticultural produce? *Trends in Food Science and Technology*, 109, 245–258. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.025>
- Lv, Z., Xie, S. (2021). Artificial intelligence in the digital twins: State of the art, challenges, and future research topics. *Digital Twin*, 1–12. <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17524.1>
- Attaran, M. (2017). The Internet of Things: Limitless opportunities for business and society. *Journal of Strategic Innovation and Sustainability*, 12(1), 10–29.
- Hou, L., Wu, S., Zhang, G., Tan, Y., Wang, X. (2020). Literature review of digital twins applications in construction workforce safety. *Applied Sciences*, 11(1), Article 359. <https://doi.org/10.3390/app11010359>
- Shu, Z., Wan, J., Zhang, D. (2016). Cloud-integrated cyber-physical systems for complex industrial applications. *Mobile Networks and Applications*, 21, 865–878. <https://doi.org/10.1007/s11036-015-0664-6>
- Henrichs, E., Noack, T., Pinzon Piedrahita, A.M., Salem, M.A., Stolz, J., Krupitzer, C. (2022). Can a byte improve our bite? An analysis of digital twins in the food industry. *Sensors*, 22(1), Article 115. <https://doi.org/10.3390/s22010115>
- Lisitsyn, A.B., Chernukha, I.M., Nikitina, M.A. (2023). Cyber-physical systems in food production chain. *Theory and Practice of Meat Processing*, 8(4), 316–325. <https://doi.org/10.21323/2414-458X-2023-8-4-316-325>
- Rajak, P., Ganguly, A., Adhikary, S., Bhattacharya, S. (2023). Internet of Things and smart sensors in agriculture: Scopes and challenges. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, Article 100776. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100776>
- Alfian, G., Rhee, J., Ahn, H., Lee, J., Farooq, U., Ijaz, M.F., Syaekhoni, M.A. (2017). Integration of RFID, wireless sensor networks, and data mining in an e-pedigree food traceability system. *Journal of Food Engineering*, 212, 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.05.008>
- Yu, S., Liu, X., Tan, Q., Wang, Z., Zhang, B. (2024). Sensors, systems and algorithms of 3D reconstruction for smart agriculture and precision farming: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 224(9), Article 109229. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109229>
- Mon, T., ZarAung, N. (2020). Vision based volume estimation method for automatic mango grading system. *Biosystems Engineering*, 198(10), 338–349. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.08.021>
- Yimyam, P., Clark, A.F. (February 5–6, 2016). *3D reconstruction and feature extraction for agricultural produce grading*. In Proceedings of the 8th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST), Chiang Mai, Thailand, 2016. <https://doi.org/10.1109/KST.2016.7440482>
- Guo, P., Dusadeerungsikul, P.O., Nof, S.Y. (2018). Agricultural cyber physical system collaboration for greenhouse stress management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 150, 439–454. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.022>
- Ahmad, I., Pothuganti, K. (September 10–12, 2020). *Smart field monitoring using ToxTrac: A cyber-physical system approach in agriculture*. In Proceedings of the 2020 International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC), Trichy, India, 2020. <https://doi.org/10.1109/ICOSEC49089.2020.9215282>
- Skobelev, P., Laryukhin, V., Simonova, E., Goryanin, O., Yalovenko, V., Yalovenko, O. (July 27–28, 2020). *Developing a smart cyber-physical system based on digital twins of plants*. In Proceedings of the 2020 Fourth World Conference on Smart Trends in Systems, Security and Sustainability (WorldS4), London, UK, 2020. <https://doi.org/10.1109/WorldS450073.2020.9210359>
- Siemens AG. (2018). *Customization in the Food and Beverage Industry. Spotlight on the Digital Twin*. White Paper. 2018. Retrieved from https://www.foodengineeringmag.com/ext/resources/WhitePapers/FE_Whitepaper_Customization-Food-and-Beverage.pdf Accessed June 20, 2024.
- McLean, V., Redmond, W. (2021). Mars and Microsoft Work together to Accelerate Mars' Digital Transformation and Reimagine Business Operations, Associate Experience and Consumer Engagement. Press Release. 2021. Retrieved from <https://news.microsoft.com/2021/05/13/mars-and-microsoft-work-together-to-accelerate-mars-digital-transformation-and-reimagine-business-operations-associate-experience-and-consumer-engagement/> Accessed June 20, 2024.
- Патент № 2015620557. Пищевые продукты. Никитина М. А., Лисицын А. Б., Захаров А. Н., Сусь Е. Б., Пилюгина С. А., Дыдыкин А. С., Устинова Оубл. 12.02.2015. [A. B. Nikitina, M.A., Lisitsyn, A.B., Zakharov, A.N., Sus, E.B., Pilugina, S.A., Dydykin, A.S., Ustinova, A.V. (2015). Food products. Patent RF no. 2015620557, 2013 (In Russian)]
- Cauchy, A.-L. (1847). Méthode générale pour la résolution des systèmes d'équations simultanées. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, XXV, 536–538. [Cauchy, A.-L. (1847). General method for solving systems of simultaneous equations. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, XXV, 536–538. (In French)] <https://doi.org/10.1017/CBO9780511702396.063>
- Поляк, Б.Т. (1963). Градиентные методы минимизации функционалов, решения уравнений и неравенств. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук М.: МГУ. — 9 с. [Polyak, B. T. Gradient methods for the minimization of functionals, solving equations and inequalities Author's abstract of the dissertation for the scientific degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Moscow: MSU, — P. 9. (In Russian)]
- Канторович, Л.В., Акилов, Г.П. (2004). *Функциональный анализ*. СПб.: Невский диалект, 2004. [Kantorovich, L.V., Akilov, G.P. (2004). *Functional analysis*. Saint-Petersburg: Nevsky dialect, 2004. (In Russian)]
- Bhadani, R. (2021). Nonlinear Optimization in R using nlopt. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.02912>

37. Лисицын, А.Б., Чернуха, И.М., Никитина, М.А. (2021). Конструирование многокомпонентных продуктов питания. Москва: Издательство «МГУПП», 2021. [Lisitsyn, A.B., Chernukha, I.M., Nikitina, M.A. (2021). Construction of multi-component food products. Moscow: MGUPP, 2021. (In Russian)]
38. Chernukha, I.M., Nikitina, M.A., Aslanova, M.A., Qusay, A.T. (2022). Systemic approach in the development of functional foods for various noncommunicable diseases. *Theory and Practice of Meat Processing*, 7(3), 164–176. <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2022-7-3-164-176>
39. Никитина, М.А., Чернуха, И.М., Кусай, А.Т. (2022). Мониторинг жизненного цикла пищевого продукта, созданного на основе цифрового двойника. *Всё о мясе*, 4, 22–26. [Nikitina, M.A., Chernukha, I.M., Qusay, A.T. (2022). Monitoring the life cycle of a food product created on the basis of the digital twin. *Vsyo o Myase*, 4, 22–26. (In Russian)] <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2022-4-22-26>
40. Асланова, М.А., Деревицкая, О.К., Дыдыкин, А.С., Боро, А.Л., Солдатова, Н.Е. (2024). Разработка технологии функциональных мясных кулинарных изделий с использованием кардионутрициологических принципов. *Всё о мясе*, 1, 36–39. [Aslanova, M.A., Derevitskaya, O.K., Dydykin, A.S., Bero, A.L., Soldatova, N. E. Development of the technology for functional meat culinary products using cardionutrient principles. *Vsyo o myase*, № 1, 36–39. (In Russian)] <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2024-1-36-39>
41. Макарова, А.А., Лисин, П.А., Паско, О.В. (2021). Проектирование аналоговых мясных полуфабрикатов с применением симплекс-метода. *Индустрия питания*, 6(2), 50–58. [Makarova, A.A., Lisin, P.A., Pasko, O.V. (2021). Design of analog meat semi-finished products using the simplex method. *Food Industry*, 6(2), 50–58. (In Russian)] <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2021-6-2-6>
42. Скурихин, И.М., Нечаев, А.П. (1991). Все о пище с точки зрения химика. Москва: Высшая школа, 1991. [Skurikhin, I.M., Nechaev, A.P. (1991). All about food from the point of view of a chemist. Moscow: Higher education, 1991. (In Russian)]
43. Рогов, И.А., Жаринов, А.И., Воякин, М.П. (2008). Химия пищи. Принципы формирования качества мясopодуKтов. Санкт-Петербург: Издательство РАПП, 2008. [Rogov, I.A., Zharinov, A.I., Voyakin, M.P. (2008). Chemistry of food. Principles of formation of meat product quality. Saint-Petersburg: RAPP, 2008. (In Russian)]
44. Оганян, Н.Г., Добровольский, В.И., Семенова, А.А., Васильева, Т.В. (2023). Метрологические аспекты при оценке соответствия мясной продукции установленным требованиям. *Контроль качества продукции*, 3, 38–43. [Oganyan, N.G., Dobrovol'skiy, V.I., Semenova, A.A., Vasilyeva, T.V. (2023). Metrological aspects in conformity assessment of meat products with the established requirements. *Production Quality Control*, 3, 38–43. (In Russian)]
45. Oganyan, N.G., Semenova, A.A., Dobrovol'skiy, V.I. (September 14–16, 2021). Metrological aspects of the safety and quality of meat products. *Journal of Physics: Conference Series*, 2192, Article 012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2192/1/012022>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
<p>Никитина Марина Александровна — доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, руководитель направления Информационные технологии Центра «Экономико-аналитических исследований и информационных технологий», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 Тел.: +7-495-676-95-11 доб. 297 E-mail: m.nikitina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8313-4105 * автор для контактов</p>	<p>Marina A. Nikitina, Doctor of Technical Sciences, Docent, Leading Scientific Worker, Head of the Direction of Information Technologies of the Center of Economic and Analytical Research and Information Technologies, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia Tel: +7-495-676-95-11 (297) E-mail: m.nikitina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8313-4105 * corresponding author</p>
<p>Чернуха Ирина Михайловна — доктор технических наук, профессор, академик РАН, Руководитель Отдела координации инициативных и международных проектов, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 Тел.: +7-495-676-95-11 доб. 109 E-mail: imcher@inbox.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4298-0927</p>	<p>Irina M. Chernukha, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department for Coordination of Initiative and International Projects, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str, 109316, Moscow, Russia Tel: +7-495-676-95-11 (109) E-mail: imcher@inbox.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4298-0927</p>
<p>Артамонова Марина Петровна — кандидат технических наук, профессор, кафедра конструирования функциональных продуктов питания и нутрициологии, Российский биотехнологический университет (Росбиотех) 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11 Тел: +7-499-750-01-11(6015) E-mail: ya.artmarina@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8372-3594</p>	<p>Marina P. Artamonova, Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Design of Functional Food Products and Nutrition, Russian Biotechnological University (Rosbiotech) 11, Volokolamsk highway, 125080, Moscow, Russia Tel: +7-499-750-01-11(6015) E-mail: ya.artmarina@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8372-3594</p>
<p>Кусай Абу Траби — аспирант, Кафедра конструирования функциональных продуктов питания и нутрициологии, Российский биотехнологический университет (Росбиотех) 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11 Технический институт ветеринарной медицины, Университет Хамы Площадь Асси, Хама, Сирия. Tel: +7-499-750-01-11(6015) E-mail: qusay2077@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2193-0624</p>	<p>Abu T. Qusay, Postgraduate Student, Department of Design of Functional Food Products and Nutrition, Russian Biotechnological University (Rosbiotech) 11, Volokolamsk highway, 125080, Moscow, Russia Technical Institute of Veterinary Medicine, University of Hama Assi Square, Hama, Syria Tel: +7-499-750-01-11(6015) E-mail: qusay2077@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2193-0624</p>
<p>Критерии авторства</p>	<p>Contribution</p>
<p>Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.</p>	<p>The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.</p>
<p>Конфликт интересов</p>	<p>Conflict of interest</p>
<p>Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.</p>	<p>The authors declare no conflict of interest.</p>