

Предложены конструктивные решения кавитационных смесителей для суспензий и эмульсий. Кавитационный метод позволяет получать продукт (молоко) с высоким содержанием мелкодисперсной фазы (до 65%), где размер жировых шариков не превышает 1 мкм. При этом энергозатраты на кавитационный смеситель составляют всего 1,2 кВт·ч/т, что в два и более раза меньше, чем у традиционных гомогенизаторов.

Список использованной литературы

1. Радзюк А.Ю. Современное состояние использования кавитационных технологий (краткий обзор) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 9. С. 209–218.
2. Ярмаркин Д.А. Кавитационные технологии в пищевой промышленности // Молодой ученый. 2014. № 8 (67). С. 312–315.
3. Кондратьева А.В. Новые технологии обработки молочной продукции (на примере молока коровьего) // Молодой ученый. 2013. № 10. С. 146–149.
4. Патент на полезную модель UA. Кавитационный смеситель. Гвоздев А.В., Гвоздев В.А., Мазурик Л.И. №31086. От 25.03.2008. Бюл. № 6.
5. Патент на полезную модель UA. Кавитационный смеситель. Гвоздев А.В., Гвоздев В.А., Ялпачик Е.В., Попытайленко Е.В. – №41126. От 12.05.2009. Бюл. № 9.
6. Патент на полезную модель UA. Кавитационный смеситель. Гвоздев А.В., Гвоздев В.А., Ковалева М.В. №70660. От 25.06.2012. Бюл. № 12.
7. Клевцова Т.А. Использование кавитационных технологий в перерабатывающей отрасли АПК // В сборнике: Материалы пула научно- практических конференций. Керчь. 2026. С. 378–382.

УДК 664.023:681.518.5

А.В. Анисимов, канд. техн. наук, доцент

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Саратовский государственный университет
генетики, биотехнологии и инженерии
имени Н.И. Вавилова», г. Саратов
anisimovaleksan@mail.ru*

ИНТЕГРАЦИЯ ПИЩЕВОЙ 3D-ПЕЧАТИ С СИСТЕМАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫХ РАЦИОНОВ

Ключевые слова: пищевая 3D-печать, искусственный интеллект, персонализированное питание, нутрициология, аддитивные технологии.

Key words: 3D food printing, artificial intelligence, personalized nutrition, nutrition science, additive manufacturing.

Аннотация: В статье проводится комплексный научно-технический анализ перспектив соединения технологий аддитивного производства в пищевой индустрии (F3DP) и систем искусственного интеллекта (ИИ) для создания полностью автоматизированных платформ персонализированного питания. Описывается архитектура интегрированной киберфизической системы, включающая модуль сбора биометрических данных, вычислительное ядро на базе алгоритмов машинного обучения и исполнительный механизм 3D-принтера. Выявлены ключевые технологические, гигиенические, психологические и регуляторные барьеры внедрения данной технологии.

Summary: This article provides a comprehensive scientific and technical analysis of the potential for combining additive manufacturing technologies in the food industry (F3DP) with artificial intelligence (AI) systems to create fully automated personalized nutrition platforms. It describes the architecture of an integrated cyber-physical system, including a biometric data collection module, a computing core powered by machine learning algorithms, and a 3D printer actuator. Key technological, hygienic, psychological, and regulatory barriers to implementing this technology are identified.

Современная парадигма глобального здравоохранения претерпевает фундаментальные изменения, смещая стратегический фокус с реактивного лечения уже возникших заболеваний на их превентивную профилактику и управление здоровьем на протяжении всей жизни. Ключевым элементом этой новой стратегии становится нутрициология, основанная на глубоком понимании индивидуальных потребностей организма, генетических предрасположенностей и метаболического статуса. Современные потребители все чаще требуют продукты, адаптированные под их уникальные физиологические параметры, возраст, уровень физической активности и наличие хронических заболеваний.

В контексте концепции Индустрии 4.0 стремительное развитие аддитивных технологий предоставило инженерам и технологам новые инструменты для децентрализации и кастомизации производства. Пищевая 3D-печать как перспективная технология, позволяющая создавать продукты сложной геометрии с прецизионным контролем состава на микроуровне. Как отмечается в фундаментальных обзорах отрасли, данная технология позволяет манипулировать текстурой, формой и нутриентным составом продукта на уровне, недоступном для традиционных методов экструзии или литья [1]. Тем не менее, без интеллектуального управления процессом формирования рецептуры потенциал 3D печати остается нераскрытым.

Интеграция систем искусственного интеллекта (ИИ) в контур управления пищевыми 3D-принтерами открывает возможность создания замкнутых адаптивных циклов «диагностика - планирование - производство

- мониторинг». ИИ способен анализировать большие массивы медицинских данных (Big Data) и в реальном времени корректировать параметры экструзии, обеспечивая точное дозирование микронутриентов, витаминов и лекарственных субстанций [5].

Целью данной работы является комплексный анализ технологических возможностей, архитектурных решений и проблем интеграции ИИ с пищевыми аддитивными системами для автоматической генерации персонализированных рационов.

Ключевым фактором успеха печати являются реологические свойства «чернил». Материалы должны обладать достаточной вязкостью для удержания формы после экструзии (высокий предел текучести), но при этом быть достаточно текучими для прохождения через сопло под давлением (псевдопластичность). Исследования показывают, что успешность печати напрямую зависит от соотношения твердой и жидкой фаз, температуры материала и скорости сдвига в сопле [3,4].

Однако традиционный подход к настройке параметров печати требует длительного эмпирического подбора, что неэффективно для персонализированного производства, где состав «чернил» меняется для каждого пользователя. Здесь на первый план выходит необходимость автоматизации принятия решений, что невозможно без использования алгоритмов машинного обучения, способных предсказывать поведение смеси до начала печати на основе данных о ее составе.

Искусственный интеллект, в частности методы машинного обучения (Machine Learning) и глубокого обучения (Deep Learning), уже доказал свою эффективность в обработке сложных биомедицинских данных. В обзоре применений машинного обучения в пищевой переработке указывается, что алгоритмы способны оптимизировать технологические процессы, снижать производственные отходы и улучшать контроль качества продукции [5]. Системы на базе ИИ могут интегрировать данные из носимых устройств (фитнес-трекеры, непрерывные мониторы глюкозы), электронных медицинских карт и результатов генетических тестов.

На основе этих данных нейронная сеть формирует целевой нутриентный профиль. Основная сложность заключается в трансляции этого абстрактного нутриентного профиля в конкретные физические параметры для 3D-принтера: объем каждого ингредиента, температура экструдера, скорость печати.

Кроме того, ИИ играет критическую роль в контроле качества процесса печати. Использование компьютерного зрения позволяет анализировать каждый слой в процессе формирования объекта. Если алгоритм обнаруживает отклонение геометрии (например, из-за изменения вязкости ингредиента вследствие температурных колебаний), система может автоматически скорректировать скорость подачи материала или температуру сопла. Это реализует принцип адаптивного производства [2].

Интеграция F3DP и ИИ предполагает создание многоуровневой архитектуры, состоящей из трех основных модулей: модуля сбора данных, вычислительного ядра и исполнительного механизма.

Модуль сбора данных. Осуществляет первичный ввод информации о пользователе. Это может быть, к примеру, анкетирование через мобильное приложение.

Вычислительное ядро (AI Core). Здесь происходит обработка данных. Алгоритмы оптимизации подбирают комбинацию доступных пищевых картриджей таким образом, чтобы суммарный нутриентный состав соответствовал целевому профилю с минимальной погрешностью.

Исполнительный механизм. 3D-принтер, оснащенный системой компьютерного зрения и датчиками давления.

Такая система реализует принцип «цифрового двойника» пищевого продукта. Перед физической печатью создается виртуальная модель, которая симулирует поведение материала. Это снижает количество брака и пищевых отходов.

Несмотря на очевидные преимущества, интеграция ИИ и пищевой 3D-печати сталкивается с рядом серьезных вызовов, требующих научного и инженерного решения: 1) Скорость печати остается низкой по сравнению с традиционными линиями производства; 2) Пищевые 3D-принтеры должны соответствовать строгим санитарным нормам. Сложная геометрия печатающих головок затрудняет очистку, что создает риск бактериального загрязнения; 3) Требуется разработка этических кодексов и стандартов валидации медицинских алгоритмов в пищевой промышленности.

Заключение

Интеграция пищевой 3D-печати с системами искусственного интеллекта представляет собой закономерный этап эволюции пищевых технологий в эпоху цифровой трансформации. Синергия этих технологий позволяет перейти от стандартизированного питания к истинно персонализированному, где каждый продукт создается под уникальные физиологические потребности человека.

Проведенный анализ показывает, что технологическая база для создания таких систем уже существует, а аппаратная часть 3D-принтеров становится доступнее. Однако для коммерциализации необходимо решить проблемы скорости печати, гигиенической безопасности и нормативного регулирования.

Список использованной литературы

1. Abedini A., Sohrabvandi S., Sadighara P., Hosseini H., Farhoodi M., Assadpour E., Alizadeh Sani M., Zhang F., Seyyedi-Mansour S., Jafari S.M. Personalized nutrition with 3D-printed foods: A systematic review on the impact of different additives // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2024. Vol. 328. P. 103181. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103181>.

2. Gholamipour-Shirazi A., Norton I.T., Mills T. Designing hydrocolloid based food-ink formulations for extrusion 3D printing // Food Hydrocolloids. 2019. Vol. 95. P. 161–167. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.04.011>

3. Dick A., Dong X., Bhandari B., Prakash S. The role of hydrocolloids on the 3D printability of meat products // Food Hydrocolloids. 2021. Vol. 119. P. 106879. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106879>

4. Sun J., Zhou W., Yan L., Huang D., Lin L. Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control // Journal of Food Engineering. 2018. Vol. 220. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.028>

5. Michel M., Burbidge A. Nutrition in the digital age – How digital tools can help to solve the personalized nutrition conundrum // Trends in Food Science & Technology. 2019. Vol. 90. P. 194–200. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.018>

УДК 004:664-021.66

А.Н. Ольшевская, аспирант

*Государственное предприятие «Институт системных исследований
в АПК НАН Беларуси», г. Минск
anka.olsh@gmail.com*

ЦИФРОВАЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ

Ключевые слова: цифровая прослеживаемость, блокчейн, качество, риски, пищевая продукция.

Keywords: digital traceability, blockchain, quality, risks, food.

Аннотация: В статье рассматривается сущность прослеживаемости продукции. Анализируется опыт стран по внедрению национальных и корпоративных систем прослеживаемости. Выделяются основные технологии и отличительные особенности цифровой прослеживаемости агропродовольственной продукции.

Summary: The article discusses the essence of product traceability. It analyzes the experiences of various countries in implementing national and corporate traceability systems. It highlights the key technologies and distinctive features of digital traceability for agri-food products.

Внедрение систем цифровой прослеживаемости в агропродовольственном секторе представляет собой одну из ключевых тенденций современного управления цепочками поставок, обусловленную необходимостью обеспечения качества и безопасности продовольственной продукции, ее прозрачности движения и оперативного реагирования на возникающие вызовы.