

# ИННОВАЦИИ В МОЛОЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: ОБЗОР ТЕКУЩИХ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

ИНФОРМАЦИОННАЯ СТАТЬЯ



**Игорь Тимофеевич Смыков**, д-р техн. наук, главный научный сотрудник Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, г. Углич  
E-mail: i\_smykov@mail.ru

В ходе археологических исследований [1] обнаружены следы производства молочных продуктов в Месопотамии и других регионах юго-восточной Азии уже в пятом тысячелетии до нашей эры. За прошедшие семь тысяч лет проделана гигантская работа миллионов людей в этом направлении. Однако совершенствованию нет предела, и сегодня исследователи и производственники настойчиво ищут пути развития молочной промышленности, создания новых молочных продуктов и высокоэффективных методов их производства.

Результаты фундаментальных исследований в различных областях физики, химии и биологии неизбежно влияют на технический прогресс в производстве молочных продуктов. Множество специализированных журналов публикует результаты исследований, посвященные разработке новых и совершенствованию известных технологий переработки молока. Выявляются потенциальные возможности влияния молочных продуктов на здоровье человека и создание на их основе функциональных пищевых продуктов. Достижения в микробиологии открывают совершенно новые возможности как в области создания новых продуктов, так и в области борьбы с посторонней микробиотой. Совершенствуются методы управления качеством производства молочных продуктов и эффективные методы контроля готовой продукции.

Цель этого краткого обзора текущих публикаций – привлечь внимание исследователей и технологов к новым направлениям, достижениям и исследованиям в области молочной промышленности, результаты которых опубликованы в конце 2025 г. и начале 2026 г. в высокорейтинговых специализированных мировых журналах первого и второго квартала.

## Нетепловые методы обработки молочных продуктов.

Термическая (тепловая) обработка является основополагающей технологической операцией в молочном производстве, необходимой для обеспечения требований безопасности и срока годности выпускаемой продукции. Однако традиционные методы термической обработки могут негативно влиять на физико-химические и органолептические свойства молочных продуктов. В условиях растущего давления на отрасль с целью повышения экологичности, энергоэффективности и экономической эффективности растет интерес к альтернативным технологиям обработки, способным смягчить эти недостатки. В обзорной статье [2] критически рассматриваются новые нетрадиционные термические технологии как потенциальные альтернативы традиционным процессам в молочном производстве. Современные технологии, такие как микроволновая обработка и электронагрев прямого действия (*ohmic heating*), предлагают многообещающие преимущества, включая быстрый и равномерный нагрев, сокращение времени обработки и потенциальное улучшение качества продукции. Однако остаются проблемы, связанные с масштабируемостью, стоимостью оборудования и соответствием нормативным требованиям. Отмечается отсутствие стандартизированных методологий оценки этих технологий и ограниченность данных о долгосрочной эффективности эксплуатации. Кроме того, экономические анализы и оценки жизненного цикла встречаются редко, что указывает на пробел в понимании всех промышленных последствий внедрения таких технологий. В целом внедрение альтернативных термических технологий может значительно повысить устойчивость и эффективность переработки молочной продукции. Однако необходимы дальнейшие исследования для преодоления технических и экономических барьеров. Этот обзор подчеркивает важность междисциплинарного сотрудничества для оптимизации этих технологий в коммерческих целях.

Обработка ультразвуком и холодной плазмой также считаются перспективными нетепловыми технологиями в пищевой промышленности, выступая как эффективные, экологичные и сохраняющие качество альтернативы традиционным термическим методам. При интеграции в производство эти технологии демонстрируют синергетическое взаимодействие, позволяющее получать комплексные и эффективные результаты обработки. Работа [3] сопоставляет фундаментальные физико-химические принципы этих технологий с практическими результатами обработки молочных продуктов. В ней систематически рассматриваются современные области применения и основные механизмы комбинированной обработки ультразвуком и холодной плазмой с акцентом на ее роль в обеспечении безопасности пищевых продуктов (инактивация микроорганизмов, снижение содержания аллергенов, продление срока хранения) и повышении качества (эффективность сушки, экстракция биологически активных соединений, модификация структуры белков и сохранение питательных веществ).

Свой взгляд на проблемы нетепловых методов обработки представлен в работе [4], где критически оцениваются существующие нетепловые технологии обработки молока, включая ультрафиолетовое излучение типа С, холодную плазму, обработку высоким давлением, импульсное электрическое поле и микрофильтрацию, а также инновации, такие как фильтрация с использованием нанотехнологий, оптимизация на основе искусственного интеллекта и прослеживаемость с помощью блокчейна. В отличие от традиционной пастеризации, которая часто разрушает термолабильные питательные вещества и изменяет органолептические свойства, эти нетепловые подходы обеспечивают эффективную инактивацию патогенов с сохранением исходного качества. Последние разработки в многоступенчатых стратегиях, интегрирующих несколько нетепловых методов, демонстрируют значительные перспективы для повышения микробиологической безопасности и однородности продукта. В работе рассматриваются синергетические системы и их социально-экономические преимущества, включая премиальное позиционирование на рынке и создание рабочих мест, а также экологические преимущества, такие как снижение энергопотребления и уменьшение количества отходов.

Обработка импульсным электрическим полем (ИЭП) привлекает внимание многих исследовате-

лей как перспективная технология для дезинфекции жидких пищевых продуктов. В исследовании [5] представлена база данных, содержащая 569 экспериментов с ИЭП для инактивации *Escherichia coli*, *Listeria* spp., *Pseudomonas* spp., *Staphylococcus aureus*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Salmonella* spp. и молочнокислых бактерий (МКБ) в различных пищевых матрицах. Разработано дерево решений с восемью категориями матрицы для оценки объемных энергозатрат, необходимых для снижения концентрации различных целевых микробных видов на пять порядков в разных матрицах. Глобальные кинетические параметры, представленные в этом исследовании, обеспечивают количественный ориентир для операторов пищевого бизнеса и специалистов по оценке рисков и могут служить первым показателем эффективности обработки импульсным электрическим полем.

Молоко содержит широкий спектр биологически активных соединений, обуславливающих его высокую физиологическую ценность для организма человека. Поскольку сырое молоко подвергается обработке, влияние термической обработки на биологически активные вещества имеет решающее значение. В обзорной работе [6] описан ряд компонентов молока и их биологически активные функции, обобщены распространенные методы термической обработки молока, включая низкотемпературную, высокотемпературную кратковременную и ультравысокотемпературную пастеризацию. Кроме того, сравниваются изменения их активности при различных видах термической обработки. Это обеспечивает теоретическую основу для разработки функциональных молочных продуктов. Также представлены новые методы обработки молока, такие как микроволновая обработка, гомогенизация под сверхвысоким давлением и обработка ультрафиолетом в турбулентном потоке.

Сохранение жизнеспособности пробиотиков в молочных продуктах и их функциональной целостности в процессе обработки, хранения и прохождения через желудочно-кишечный тракт представляет собой сложную задачу, особенно при использовании традиционных термических методов обработки. Работа [7] представляет современные данные о влиянии обработки высоким давлением, гомогенизацией высоким давлением и импульсным электрическим полем на пробиотики и пробиотические продукты питания, с особым акцентом на функциональные свойства, выходящие за

рамки выживания клеток. Обсуждается влияние параметров обработки на жизнеспособность пробиотиков, адаптацию к стрессу, адгезию к эпителиальным клеткам кишечника, устойчивость к условиям желудочно-кишечного тракта, метаболическую активность, а также иммуномодулирующий и противомикробный потенциал. Отмечено, что синергетические стратегии обработки продуктов представляют собой многообещающие инструменты для разработки пробиотических продуктов питания следующего поколения, которые смогут обеспечить баланс между безопасностью, качеством и биологической эффективностью.

**Сенсорная оценка молочных продуктов.** Вкус молочных продуктов определяется сложными макромолекулярными взаимодействиями между белками, липидами и углеводами. Хотя традиционная термическая обработка часто ухудшает характеристики летучих соединений, нетермические технологии становятся устойчивыми альтернативами, которые лучше сохраняют целостность вкуса. В обзорном материале [8] объединены механистические представления о взаимодействии ароматических матриц с достижениями в области нетермической обработки (обработка высоким давлением, импульсные электрические поля, холодная плазма, ультразвук) и высокоразрешающей аналитики (ГХ-МС, ГХ × ГХ-ТОF-МС, ЯМР, SERS и ароматомика с использованием машинного обучения). Особое внимание уделяется молекулярному связыванию, структурным модификациям, вызванным обработкой, и прогностическому моделированию высвобождения аромата, а также роли этих инноваций в развитии устойчивого сохранения пищевых продуктов. Показано, что нетермические технологии значительно снижают термическую деградацию летучих веществ, одновременно изменяя конформацию белков и пути окисления липидов, тем самым повышая стабильность вкуса и привлекательность продуктов с «чистой этикеткой». Отмечено также, что модели машинного обучения позволяют точно прогнозировать сенсорные результаты на основе получаемых химических данных, продвигаясь к точному проектированию вкуса.

В исследовании [9] в сыр, созревающий при 30 °С в течение 7 дней, целенаправленно добавляли аминокислоты с разветвленной цепью и ароматические аминокислоты, которые являются предшественниками летучих соединений с приятным вкусом, чтобы оценить их влияние на ускорение созревания сыра.

Применение машинного обучения к данным ГХ-МС позволило провести всестороннюю и целостную оценку ускорения созревания, эффективно интегрируя множество летучих соединений для преодоления ограничений традиционных индексов зрелости, основанных на одном маркере. Этот анализ показал, что вкусовые компоненты сыров с изолейцином (Ile) и тирозином (Tyr) вероятно соответствуют 3 месяцам зрелости, а сыры с лейцином (Leu) и валином (Val) потенциально достигают 6 месяцев зрелости. Совокупные результаты по количеству лактококков, степени гидролиза и составу свободных аминокислот показали, что лейцин, тирозин и триптофан способствуют образованию соответствующих вкусовых веществ за счет увеличения содержания субстрата, а лейцин может повышать толерантность лактококков к сыру. Валин может использоваться лактококками в качестве питательного фактора для увеличения их численности и устойчивости, что, в свою очередь, влияет на производство некоторых летучих соединений. Это исследование показало, что добавление аминокислот при более высокой температуре созревания может ускорить локальное созревание сыра, и продемонстрировало возможный механизм этого процесса, что предлагает инновационную схему для обеспечения быстрого созревания сыра.

Изучение вкуса, как основной оценки свойств пищевых продуктов, переживает парадигматический сдвиг, выходя за рамки традиционных описательных подходов и переходя к прогностической и механистической науке. Вкусовое восприятие, которое часто считают простым сочетанием базового вкуса

Источник и изображение: freerik.com



и запаха, на самом деле является сложным мульти-сенсорным процессом, формируемым головным мозгом. Восприятие возникает в результате динамической интеграции обонятельных, вкусовых и хемостетических сигналов, где целое значительно превосходит сумму его частей. Этот перцептивный синтез начинается со связывания молекул вкуса со специфическими рецепторами, преобразуя химические структуры в нейронные коды, которые мозг интерпретирует как уникальные сенсорные качества и гедонистические значения. В работе [10] ставилась задача преодолеть традиционный подход к изучению отдельных технологий, предложив комплексную концепцию «от молекулы к мозгу». Эта концепция явно связывает компьютерное прогнозирование (например, машинное обучение, молекулярный докинг), биомиметическое распознавание (биосенсоры) и центральную обработку восприятия вкуса (ЭЭГ, фМРТ). Отмечено, что предложенная концепция «от молекулы к мозгу» может служить дорожной картой для будущего науки о вкусовых качествах и является единой концептуальной основой для этой области, подчеркивая решающую роль такого интегрированного подхода в рациональном проектировании пищевых продуктов и стимулировании инноваций в отрасли.

В статье [11] сначала рассматриваются нейронные пути, лежащие в основе восприятия вкуса, фокусируясь на том, как вкусовые, обонятельные и оральные соматосенсорные сигналы взаимодействуют с сетями вознаграждения и гедонистическими сетями, формируя интегрированное вкусовое восприятие. Описаны новейшие стратегии разработки

ориентированных на вкус интерфейсов «мозг-компьютер» (Flavor-BCI), суммируются ключевые особенности различных методов нейровизуализации и связанных с ними технических рабочих процессов реализации. По сравнению с традиционными методами сенсорной оценки, этот подход позволяет в режиме реального времени точно количественно оценивать вкусовые ощущения. Таким образом, Flavor-BCI открывает возможности для интеллектуальной сенсорной оценки и новых взаимодействий «человек-машина».

**Биологически активные пептиды.** Биоактивные пептиды (БАП) из молочных продуктов привлекают все больше внимания как природные вещества, обладающие полезными для здоровья свойствами, включая антигипертензивное, антиоксидантное, противомикробное, иммуномодулирующее, опиоидное и противодиабетическое действие. Систематический обзор [12] обобщает результаты исследований, полученных из баз данных Scopus и PubMed, в которых сообщалось о более чем 3200 различных пептидах. Последние достижения в протеомике улучшили идентификацию пептидов и прогнозирование биологической активности, что позволило открыть новые последовательности. Результаты подчеркивают значительный потенциал биоактивных пептидов, полученных из молочных продуктов, в качестве функциональных пищевых компонентов и нутрицевтических ингредиентов.

Сегодня сердечно-сосудистые заболевания являются основной причиной смерти. Совершенствование свойств йогурта, продукта, потребляемого во всем мире, с помощью целевых биоактивных пептидов и пробиотиков является удобным подходом к функциональному питанию, позволяющему улучшить здоровье без изменения пищевых привычек. В исследовании [13] изучалось влияние добавления биоактивных пептидов к субстратам на основе молока и сыворотки на процесс ферментации и свойства продукта с целью создания функционального пищевого продукта. Исследование показывает, что добавление специфических биоактивных пептидов, полученных из сыворотки, в молоко и напитки на основе сыворотки может усилить их полезные свойства без изменения вкуса. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании функциональных молочных продуктов с заданными свойствами, сочетающих кардиопротекторный эффект с высокими потребительскими качествами.



Влияние генетических и экологических факторов на вероятность возникновения различных заболеваний человеческого организма при его старении очевидно, в то же время имеются данные, свидетельствующие о том, что диета, особенно потребление молочных продуктов, может сокращать риск развития нейродегенеративных заболеваний, таких как болезнь Альцгеймера. В обзорной работе [14] критически оцениваются эпидемиологические и клинические данные о нейропротекторном потенциале молочных продуктов. Отмечено, что биоактивные компоненты, включая пептиды, полученные из молока, мембраны жировых шариков молока и метаболиты, образующиеся в процессе ферментации, обладают антиоксидантными и нейротрофическими свойствами, которые поддерживают функцию митохондрий и синаптическую пластичность. Показано, что молочные продукты представляют собой доступный источник биологически активных соединений, потенциально способствующих повышению когнитивной устойчивости, хотя для установления причинно-следственной связи и разработки рекомендаций по питанию необходимы надежные лонгитудинальные и интервенционные исследования.

Биоактивные пептиды (БАП), полученные из молочных белков, являются перспективными компонентами для многогранного подхода к укреплению здоровья и профилактике заболеваний. Однако БАП обладают такими ограничениями, как плохие вкусовые качества и низкая биодоступность. В работе [15] критически анализируются традиционные и новые стратегии высвобождения БАП из молочных белков, включая ферментативный гидролиз, микробную ферментацию и их синергетическую комбинацию. Важно отметить, что эта работа выходит за рамки производственных процессов и рассматривает передовые решения проблем в разработке БАП, таких как самосборка пептидов и усовершенствованные системы доставки. Кроме того, работа подчеркивает преобразующую роль искусственного интеллекта в установлении связи между последовательностями пептидов и их биофункциями, а также в оптимизации параметров производства. В частности, отмечено, что интеграция ИИ произвела революцию в этой области, позволив прогнозировать взаимосвязь структуры и функции между последовательностями пептидов и их биологической активностью. ИИ также способствует оптимизации параметров производства, преодолевая неэффективность и ограничения традиционных методов скрининга.

### **Нейронные сети в молочной промышленности.**

Повышение энергоэффективности традиционных методов производства молочной продукции при сохранении их специфических свойств и экономической целесообразности является сложной задачей, соответствующей целям устойчивого развития. Охлаждение и поддержание необходимых температур и влажности во время созревания сыра особенно энергоемко, внося значительный вклад в выбросы парниковых газов и эксплуатационные расходы. В работе [16] был изучен подход к повышению устойчивости традиционного производства сыра путем разработки прототипа камеры созревания с системой охлаждения на основе природного хладагента, работающей на возобновляемой энергии и специализированной системой управления на основе архитектуры «Интернета вещей».

В последние годы интеграция искусственного интеллекта в пищевую промышленность показала большой потенциал для оптимизации всей цепочки производства сыра, от разработки рецептуры до обеспечения безопасности и контроля качества. В работе [17] описываются ключевые технологии искусственного интеллекта, включая сбор данных, предварительную обработку данных, машинное обучение, глубокое обучение, обработку естественного языка и большие языковые модели. Затем проводится систематический анализ текущих применений и проблем ИИ в цепочке производства сыра, охватывающий проверку сырья, оптимизацию рецептур, управление процессами, оценку качества и упаковку. Кроме того, обсуждаются пути трансформации производства и управления качеством сыра с помощью ИИ, а также перспективы на будущее. Полученные результаты показывают, что ИИ позволяет осуществлять мониторинг в реальном времени и интеллектуальное управление критически важными параметрами на протяжении всего производственного процесса. Основное достоинство ИИ заключается в его способности обрабатывать крупномасштабные, многомерные и нелинейные данные, извлекая при этом критически важные признаки для оптимизации процессов.

Интеграция искусственного интеллекта и его способность обрабатывать огромные массивы данных значительно улучшили протоколы безопасности пищевых продуктов, и на стыке этих двух областей появилось значительное количество первичных и вторичных исследований. В статье [18] представлен обзор состояния применения ИИ в области безопасности пищевых продуктов посредством

систематического анализа вторичных исследований. Путем анализа вторичных исследований это исследование показало, что наибольшее внимание в исследованиях получили молочные продукты, при этом основным источником данных служили данные датчиков. Нейронные сети оказались преобладающим подходом в области ИИ. Кроме того, большинство приложений были сосредоточены на обнаружении химических опасностей для безопасности пищевых продуктов, а не на биологическом, физическом или общем прогностическом моделировании. Примечательно, что это исследование выявляет недостаток алгоритмов ИИ, использующих неструктурированные данные, несмотря на их растущую актуальность в эпоху генеративного ИИ. Соответственно, обсуждаются будущие направления исследований, в частности, трансформационный потенциал больших языковых моделей в мониторинге безопасности пищевых продуктов и соблюдении нормативных требований.

Масштабы мошенничества в сфере производства молочных продуктов значительны и весьма сложны, а его истинное влияние на общество наиболее очевидно только тогда, когда происходят конкретные инциденты. В сфере пищевой промышленности под мошенничеством [19] понимается «несоответствие между фактическими характеристиками пищевого продукта и соответствующим заявленным свойством пищевого продукта». В исследовании [20] представлен систематический обзор литературы, оценивающий текущее состояние применения искусственного интеллекта в борьбе с мошенничеством в пищевой промышленности. Цель исследования заключалась в изучении типов мошенничества, выявляемых ИИ, конкретных используемых методов ИИ и используемых показателей оценки эффективности. Большинство рассмотренных работ были сосредоточены на выявлении фальсификации и неправильной маркировки, в частности, неправильной маркировки происхождения и качества, при этом наиболее часто исследуемыми категориями были молочные продукты. Основными подходами были машинное обучение и глубокое обучение. Машинное обучение было наиболее распространенным, а машины опорных векторов и сверточные нейронные сети оказались наиболее часто применяемыми алгоритмами. Полученные результаты подчеркивают важность применения ИИ для выявления мошенничества в пищевой промышленности и необходимость изучения недостаточно представленных типов мошенничества и категорий продуктов питания.

В комплексном обзоре [21] критически рассматриваются последние достижения в пищевой биотехнологии, включая инженерию ферментов, метаболическую инженерию и создание синтетических микробных консорциумов с помощью алгоритмов моделирования и обучения на основе искусственного интеллекта. Показано, что практическое использование ИИ демонстрирует значительный потенциал для повышения предсказуемости процессов, производительности и эффективности использования ресурсов в пищевой биотехнологии, особенно в разработке ферментов, оптимизации процессов и обеспечении качества в режиме реального времени. Однако промышленное внедрение по-прежнему ограничено качеством данных, интерпретируемостью моделей и ответственностью за безопасность.

Обнаружение следовых количеств загрязняющих веществ в сложных пищевых матрицах сталкивается с рядом технических проблем. В работе [22] сначала представлен обзор конструкций и принципов работы платформ для анализа отдельных молекул на основе биологических нанопор, подробно описаны ключевые стратегии проектирования и инженерные подходы. Кроме того, работа освещает передовые разработки и тенденции в области электрохимического анализа с использованием нанопор с применением искусственного интеллекта, включая анализ сигналов с помощью глубокого обучения, проектирование на основе динамического моделирования и разработку новых канальных белков *de novo*, подчеркивая необходимость междисциплинарной интеграции.

**Микробиология молочных продуктов.** Быстрое обнаружение патогенов, передающихся через пищу, как основных возбудителей инцидентов, связанных с безопасностью молока, является критически важным для обеспечения качества и безопасности молочной продукции, что привлекает все большее внимание потребителей, государственных регулирующих органов и пищевой промышленности. В обзорной работе [23] всесторонне обобщены профили загрязнения молока распространенными патогенами, передающимися через пищу, описаны механизмы обнаружения с помощью четырех ключевых спектроскопических методов (инфракрасной спектроскопии, рамановской спектроскопии, флуоресцентной спектроскопии и гиперспектральной визуализации), а также подробно описаны их современные достижения в обнаружении типичных

патогенов (*Salmonella* spp., *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* и *Staphylococcus aureus* и т. д.). Также в этой работе определены присущие этим методам технические узкие места в обнаружении патогенов, передающихся через молоко и молочные продукты.

На молокоперерабатывающих предприятиях СІР-очистка, представляющая собой непрерывную многоступенчатую процедуру, сочетающую щелочную и кислотную обработку, имеет важнейшее значение для поддержания необходимой гигиенической среды во время производства молочных продуктов. В настоящее время все процедуры СІР разработаны и оценены на основе борьбы с монокультурными моделями биопленок. Однако все чаще определяется, что в реальных условиях биопленки преимущественно существуют в виде разнообразных микроорганизмов, и их состав варьируется в зависимости от среды, включая уникальные микробиомы и условия роста. Это указывает на то, что используемые в настоящее время протоколы СІР, а также методы их оценки, не были специально направлены на борьбу с поливидовыми биопленками в соответствующем контексте окружающей среды. В статье [24] обобщены системы СІР, используемые на молочных предприятиях и их эффективность

в борьбе с биопленками. Кроме того, обсуждаются потенциальные взаимодействия микроорганизмов внутри поливидовых биопленок, повышающие устойчивость к очистке, с целью разработки стратегий для более безопасного и устойчивого производства молочных продуктов и определения направлений будущих исследований по эффективному контролю биопленок.

Бактериофаги являются перспективными агентами биологического контроля благодаря своей целенаправленной антимикробной активности, безопасности и минимальному влиянию на органолептические свойства пищевых продуктов. Однако их стабильность в условиях пищевой обработки остается узким местом для практического применения. В работе [25] использован протокол исследования последовательного воздействия стрессовых факторов, на основе которого выделены три стрессоустойчивых бактериофага, нацеленных на патоген *Pseudomonas aeruginosa*, передающийся через пищу. Эти бактериофаги смогли снизить рост *P. aeruginosa* на пять порядков в искусственно загрязненном сыре, используемом в качестве модельной пищевой матрицы. Исследование показало потенциал использования стрессоустойчивых бактериофагов для повышения безопасности пищевых продуктов.

Для борьбы с устойчивыми к антибиотикам патогенными бактериями необходимы альтернативные методы противомикробной терапии, такие как пероральная фаготерапия. Однако бактериофаги чувствительны к агрессивным условиям желудочно-кишечного тракта. Микрокапсулирование фагов и использование защитных пищевых матриц, таких как йогурт, может защитить эти фаги и способствовать их успешной доставке в целевой желудочно-кишечный тракт. Целью исследования [26] являлась оценка влияния добавления в йогурт микрокапсулированного фага Felix O1 на физико-химические и микробиологические свойства йогурта и потенциал йогурта в качестве средства доставки микрокапсулированного фага Felix O1 в кишечник, а также кинетику высвобождения бактериофага из микрокапсул в условиях, имитирующих условия желудочно-кишечного тракта *in vitro*.

В исследовании [27] представлен подход к разработке антимикробной упаковки, функционализированной фагами, путем электропрядения нановолокон, нагруженных фагом Felix O1, состоящих из двойной гидрофильной полимерной смеси альги-



Источник изображения: Freerik.com

ната натрия и гидроксипропилметилцеллюлозы, непосредственно на пищевых подложках (пергаментная бумага и полистирол). Антибактериальные испытания против *Salmonella enteritidis* продемонстрировали эффективность, зависящую от субстрата. Электроформованные пленки показали наилучшие антимикробные свойства по уменьшению количества бактерий, за ними следовали покрытия пергаментной бумагой, тогда как полистироловые покрытия показали еще меньшее действие. Эта работа является первой, в которой бактериофаги интегрированы в двухполимерную матрицу из электроформованных нановолокон, непосредственно применяемую в реальной пищевой упаковке, что обеспечивает практичную и масштабируемую стратегию для активной антимикробной упаковки.

В качестве антимикробных агентов в упаковке пищевых продуктов в работе [28] была исследована эффективность использования бактериофагов благодаря их специфичности и способности сохранять активность в течение длительного времени при внедрении в биополимерные матрицы, которые могут обеспечивать постепенный и устойчивый антимикробный эффект. Фаговый коктейль, нацеленный на *Escherichia coli* и *Pseudomonas fluorescens*, был включен в растворы на основе альгината натрия для создания антимикробных пленок и покрытий. Фаг FSB24, нацеленный на *P. fluorescens*, принадлежит к подсемейству *Studiervirinae* и роду *Pifdecavirus*, тогда как фаг North, нацеленный на *E. coli*, относится к семейству *Straboviridae* и роду *Krischvirus*. Это исследование продемонстрировало возможности использования пленок и покрытий на основе альгината натрия, содержащих бактериофаги в качестве эффективных, масштабируемых решений для антимикробной упаковки пищевых продуктов.

*Klebsiella pneumoniae* – представитель семейства *Enterobacteriaceae*, условно патогенный организм широко распространенный в естественной среде, в т. ч. и в пищевых продуктах. В исследовании [29] выделен литический бактериофаг (*vB\_KpP\_HS37*), нацеленный на *K. pneumoniae*. Фаг продемонстрировал высокую активность в диапазоне температур от 4 до 50 °C и значений pH от 5,0 до 10,0, что может обеспечить эффективные подходы к профилактике и контролю инфекций, вызванных *K. pneumoniae*.

В исследовании [30] был успешно выделен и охарактеризован новый фаг патогена *Y. enterocolitica*, названный WW2, который продемонстрировал

высокую способность ингибировать рост бактерий, а анализ всего генома показал его безопасность для использования. Высокая стабильность в широком диапазоне pH и температур указала на перспективность его применения в пищевой промышленности. По сравнению с ранее описанными фагами *Y. enterocolitica*, WW2 продемонстрировал более короткий латентный период и более сильное профилактическое действие как против *Y. enterocolitica*, так и против ее биопленок.

*Cronobacter sakazakii* – значимый пищевой патоген, содержащийся в сухих детских смесях, он образует устойчивые биопленки, которые обеспечивают устойчивость к дезинфицирующим средствам, антибиотикам и стрессовым факторам окружающей среды. Фаги представляют собой многообещающую альтернативу для контроля бактериального загрязнения пищевых продуктов.

В исследовании [31] сообщается об изоляции и характеристике нового фага семейства *Straboviridae*, *vB\_CsaM\_2375H2*, а также оценивается его эффективность в снижении биопленки *C. sakazakii* и его бактерицидная активность против патогена. Этот фаг обеспечил уничтожение более 60 % уже сформированных биопленок *C. sakazakii* и элиминировал 99 % патогенов. Эти результаты подтверждают перспективность фага *vB\_CsaM\_2375H2* в качестве агента биологического контроля против загрязнения пищевых продуктов патогеном *C. sakazakii*.

Грибковые загрязнения являются серьезной проблемой из-за порчи, экономических потерь и образования микотоксинов в пищевых продуктах, поэтому использование биозащитных свойств микробных культур представляет собой перспективную альтернативу в борьбе с такими загрязнениями. Целью исследования [32] являлось изучение противогрибкового потенциала пяти штаммов *Lactiplantibacillus plantarum* против *Aspergillus niger* и *Penicillium chrysogenum*. Показано, что все штаммы значительно подавляли рост грибов, что было продемонстрировано в экспериментах *in vitro* и снижением грибковой биомассы. Метаболомный анализ выявил образование органических кислот, включая молочную, уксусную, янтарную, яблочную, пропионовую, масляную и муравьиную кислоты, а также 35 дополнительных метаболитов, в основном аминокислот, жирных кислот, циклических дипептидов, фенольных соединений и эфиров, что указывает на синергический и многофакторный противогрибковый механизм. Эти

результаты демонстрируют сильную противогрибковую активность штаммов *L. plantarum* и подтверждают возможность их применения в качестве биозащитных культур в молочных продуктах.

*Penicillium roqueforti*, ключевой гриб в производстве сыров с голубой плесенью, способен продуцировать микотоксины, такие как рокфортин С и микофеноловая кислота. Продуцирование этих метаболитов в значительной степени зависит от штамма. В промышленных производствах гипотоксигенные штаммы *P. roqueforti* обычно используются в качестве контролируемых дополнительных заквасок в стандартизированных условиях, что приводит к минимальному накоплению микотоксинов. В то же время в сырах, созревающих естественным путем, или в фермерских сырах наблюдается более вариабельный состав штаммов, что может повысить риск появления микотоксинов. В работе [33] сообщается о создании штаммов *P. roqueforti*, неспособных синтезировать рокфортин С и микофеноловую кислоту. С использованием CRISPR/Cas9 были получены одиночные и двойные мутанты, дефицитные по одному или обоим микотоксинам. В лабораторных условиях при производстве сыров с использованием этих генетически модифицированных штаммов, в отличие от сыров, изготовленных с использованием штамма дикого типа, не было обнаружено определяемых уровней целевых микотоксинов. В совокупности полученные результаты закладывают основу для разработки сыров без микотоксинов с использованием генетически модифицированных нетоксигенных штаммов *P. roqueforti*.

**Молочные продукты.** Сливочное масло – традиционный молочный продукт, востребованность которого обусловлена уникальными сенсорными и технологическими свойствами. В пищевой индустрии оно широко применяется в качестве ингредиента, улучшающего вкус, аромат и текстуру готовых изделий. В исследовании [34] изучалось влияние совместного культивирования региональных штаммов лактобацилл (*L. casei*, *L. paracasei* и *L. rhamnosus*) с обычной закваской на технико-функциональные свойства сливочного масла во время хранения, зависящее от штамма. Данное исследование показало, что использование специфических для региона штаммов лактобацилл в производстве сливочного масла оказывает существенное влияние на качество продукта.

Молочный жир, важный компонент молочных продуктов, ценится за свой вкус, текстуру и питательную ценность. Однако он содержит большое количество насыщенных жирных кислот, что вызывает опасения по поводу его воздействия на здоровье и ограничивает его пригодность для рецептов, ориентированных на здоровое питание. Целью исследования [35] являлась разработка и оценка свойств аналогов сливочного масла путем интеграции фракционирования молочного жира с матрицей олеогеля на основе пчелиного воска. Предложенный подход позволил снизить содержание насыщенных жиров и холестерина, сохраняя при этом желаемые сенсорные и функциональные качества.

Концентрат молочного белка является идеальным ингредиентом в пищевых продуктах и продуктах питания благодаря своей усвояемости. Однако он склонен к ухудшению растворимости при хранении. Целью исследования [36] являлось изучение влияния различных методов ультразвуковой обработки на физико-химические и функциональные свойства нерастворимых концентратов молочного белка (КМБ). Результаты показали, что ультразвуковая обработка улучшает растворимость КМБ. Однако отмечена существенная разница между эффектами обработки в водяной бане и ультразвуковой обработки зондом. Ультразвуковая обработка в водяной бане оказалась особенно эффективной. Эти результаты обеспечивают теоретическую основу для эффективного улучшения функциональных свойств КМБ и расширения его применения в пищевой промышленности.

**Качество молочных продуктов.** В молочной промышленности для анализа состава ряда молочных продуктов используется спектроскопия ближнего инфракрасного диапазона. Ее преимущества – низкая стоимость, минимальная подготовка образцов, простота приборов и возможность проведения измерений в режиме реального времени. Однако достоверность измерения состава сырого молока с помощью ИК-спектроскопии по-прежнему остается серьезной проблемой. В обзоре [37] рассматриваются принципы измерения, преимущества и ограничения спектроскопии ближнего инфракрасного диапазона для анализа состава сырого молока. Также освещаются проблемы и потенциальные ограничения этого метода в различных условиях измерения, включая офлайн, онлайн, в режиме реального времени и в полевых условиях. Показано, что анализ состава сырого молока с использо-

ванием ИК-спектроскопии может преобразовать молочную промышленность, обеспечивая оценку качества сырого молока в режиме реального времени, что способствует улучшению понимания и оптимизации производственных процессов.

Анализ качества молока имеет решающее значение для обеспечения высокого качества молочной продукции и повышения производительности и эффективности молокоперерабатывающих предприятий. Интеграция Интернета вещей и искусственного интеллекта может произвести революцию в анализе качества, обеспечив автоматическое обнаружение и мониторинг ключевых параметров (например, состава, примесей, показателей микробиологического качества) в режиме реального времени, что позволит снизить количество человеческих ошибок и улучшить процесс принятия решений в цепочке поставок молочной продукции. Целью систематического обзора [38] была оценка использования Интернета вещей и искусственного интеллекта в контроле качества молочных продуктов за последнее десятилетие, с акцентом на три критически важные области: мониторинг состава, выявление фальсификаций и микробиологических показателей. Отмечено, что спектроскопия стала ведущим методом анализа состава и фальсификации (62 %), в то время как газовые датчики были предпочтительны для обнаружения микроб-

ной порчи. Периферийные вычисления были ведущей стратегией обработки данных (64 %), обеспечивая анализ в реальном времени, хотя гибридные периферийно-облачные платформы продемонстрировали хороший потенциал масштабируемости. Модели машинного обучения достигли высокой точности при прогнозировании, в то время как глубокое обучение преуспело в задачах классификации, особенно для обнаружения фальсификации.

Основной целью исследования [39] являлась разработка индекса качества молока (ИКМ) и создание на основе этого индекса прогностической модели для оценки качества молока. Для прогнозирования качества молока в работе были разработаны модели множественной линейной регрессии и искусственных нейронных сетей, связывающие физико-химический и микробиологический анализ с ИКМ. Это исследование дает представление о разработке моделей ИКМ для прогнозирования порчи молока в режиме реального времени и принятия решений в молочной промышленности.

Здесь приведен далеко не полный обзор публикаций о результатах исследований, проведенных в последнее время в области производства молочных продуктов. Вместе с тем обзор сосредоточен на тех основных направлениях, которые в большей мере привлекают внимание исследователей. ■

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. **Suryanarayan, A.** Identifying pastoral and plant products in local and imported pottery in Early Bronze Age southeastern Arabia / A. Suryanarayan [et al.] // *PLoS One*. 2025. Vol. 20(6). Art. no. e0324661. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0324661>
2. **Buchanan, D.** Utilisation of microwave and ohmic heating technologies in the dairy industry: Equipment, costs, energy efficiency and a review of modern applications / D. Buchanan [et al.] // *International Journal of Dairy Technology*. 2025. Vol. 78. Art. no. e70082. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.70082>
3. **Chen, W.** From synergy to superiority: Harnessing ultrasound and cold plasma for next-generation food safety and quality enhancement / W. Chen [et al.] // *Trends in Food Science & Technology*. 2026. Vol. 172. Art. no. 105664. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2026.105664>
4. **Khan, M. U.** Advancing Raw Milk Safety and Quality: A Critical Review of Existing and Emerging Nonthermal Technologies / M. U. Khan [et al.] // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2026. Vol. 25(2). Art. no. e70430. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70430>
5. **Pampoukis, G.** The decontamination efficacy of pulsed electric field in food: Establishing global kinetic parameters / G. Pampoukis [et al.] // *International Journal of Food Microbiology*. 2026. Vol. 447. Art. no. 111547. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2025.111547>
6. **Chen, X.** Effect of milk heat treatment on bioactive components of dairy milk / X. Chen [et al.] // *International Dairy Journal*. 2026. Vol. 172. Art. no. 106455. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2025.106455>
7. **Oner, M. E.** Impacts of high-pressure technology and pulsed electric field on functional properties of probiotics and probiotic foods / M. E. Oner [et al.] // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2026. P. 1–21. <https://doi.org/10.1080/10408398.2026.2654671>
8. **Mueed, A.** Protein-lipid-carbohydrate interactions in flavor retention: Emerging insight from nonthermal technologies to advanced analytics / A. Mueed [et al.] // *Trends in Food Science & Technology*. 2026. Vol. 172. Art. no. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2026.105713>
9. **Hao, X.** Machine learning-driven GC–MS analysis for assessing the contribution of amino acids in the flavor of cheese maturing at high temperature / X. Hao [et al.] // *International Journal of Food Microbiology*. 2026. Vol. 448. Art. no. 111581. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2025.111581>
10. **Wang, J.** From machine learning to neuroimaging: A comprehensive review of flavor prediction and recognition techniques / J. Wang [et al.] // *Food Research International*. 2026. Vol. 223(1). Art. no. 117933. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.117933>
11. **Yang, T.** Flavor-oriented brain–computer interface (Flavor-BCI): Neural decoding of eating and sensory perception with emerging applications in food evaluation / T. Yang [et al.] // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2026. Vol. 25(2). Art. no. e70442. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70442>
12. **Meleti, E.** Bioactive peptides from dairy products: A systematic review of advances, mechanisms, benefits, and functional potential / E. Meleti [et al.] // *Dairy*. 2025. Vol. 6(6). Art. no. 65. <https://doi.org/10.3390/dairy6060065>

13. **Krunić, T. Ž.** Fortifying milk and whey-based probiotic beverages with bioactive peptides: Effects of concentration and molecular weight on fermentation, bioactivity and sensory properties / T. Ž. Krunić, M. B. Rakin // *International Journal of Dairy Technology*. 2026. Vol. 79(1). Art. no. e70094. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.70094>
14. **Basha, S.** Emerging insights into dairy products and Alzheimer's disease: exploring the potential neuroprotective effects / S. Basha [et al.] // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2025. Vol. 66(14). P. 2628–2655. <https://doi.org/10.1080/10408398.2025.2578711>
15. **Li, H.** Bioactive peptides from milk proteins: Current insights into novel preparation strategies and application prospects / H. Li [et al.] // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2025. Vol. 66(17). P. 3247–3265. <https://doi.org/10.1080/10408398.2025.2598810>
16. **Santos, J. M.** Energy sustainability in the ripening of traditional cheese: Renewable energy sources and internet of things based energy monitoring / J. M. Santos [et al.] // *Dairy*. 2025. Vol. 6(6). Art. no. 63. <https://doi.org/10.3390/dairy6060063>
17. **Xu, N.** AI in cheese manufacturing: A comprehensive review of technologies, applications, and future prospects / N. Xu [et al.] // *Trends in Food Science & Technology*. 2026. Vol. 172. Art. no. 105721. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2026.105721>
18. **Lopez, M. A.** Artificial intelligence in food safety: A tertiary study / M. A. Lopez, Y. Bouzembrak, B. Tekinerdogan // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2026. Vol. 25(2). Art. no. e70443. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70443>
19. **Standard EN 17972:2024.** Food authenticity - Food authenticity and fraud - Concepts, terms and definitions. – 2024. – 12 p.
20. **Fragkos, N.** The role of artificial intelligence in combating food fraud: a systematic literature review / N. Fragkos, Y. Bouzembrak, S. W. Erasmus // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2026. P. 1–19. <https://doi.org/10.1080/10408398.2026.2654710>
21. **Wang, Q.** AI-driven food bioprocessing: How far its integration with practice? / Q. Wang [et al.] // *Trends in Food Science & Technology*. 2026. Vol. 172. Art. no. 105662. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2026.105662>
22. **Yu, Y.** Transforming from 'natural tools' into 'custom sensors': combining directionally designed biological nanopore electrochemistry sensing lumens with AI-driven analytics to pioneer a new paradigm for food analysis / Y. Yu [et al.] // *Trends in Food Science & Technology*. 2026. Vol. 172. Art. no. 105684. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2026.105684>
23. **An, P.** Recent advances in spectroscopic techniques for detecting foodborne pathogens in milk: A review / P. An [et al.] // *International Dairy Journal*. 2026. Vol. 178. Art. no. 106618. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2026.106618>
24. **Li, B.** On farm cleaning-in-place (CIP) vs multi-species biofilm: Rethinking hygiene strategies in raw milk bulk tanks / B. Li [et al.] // *International Dairy Journal*. 2026. Vol. 176. Art. no. 106560. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2026.106560>
25. **Khan, A.** Isolation and characterization of stress-tolerant bacteriophages for effective biocontrol of foodborne pathogen / A. Khan, H. Joshi // *Food Bioprocess Technology*. 2025. Vol. 18. P. 7443–7457. <https://doi.org/10.1007/s11947-025-03885-8>
26. **Zeren, F. E.** The potential of using yoghurt as a delivery vehicle for microencapsulated Salmonella phage Felix O1 with alginate-caseinate formulation / F. E. Zeren, A. Kucukcetin // *International Journal of Dairy Technology*. 2026. Vol. 79(2). Art. no. e70117. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.70117>
27. **Coelho, F.** Advanced bacteriophage-loaded nanofiber coatings for active food packaging / F. Coelho [et al.] // *Food and Bioprocess Technology*. 2026. Vol. 19. Art. no. 220. <https://doi.org/10.1007/s11947-026-04310-4>
28. **Coelho, F.** Phage-enhanced materials: Antimicrobial films and coatings targeting *Pseudomonas fluorescens* and *Escherichia coli* / F. Coelho [et al.] // *Food and Bioprocess Technology*. 2025. Vol. 18. P. 9821–9837. <https://doi.org/10.1007/s11947-025-03996-2>
29. **Zhu, Y.** Characterization of a novel *Klebsiella pneumoniae* bacteriophage vB\_KpP\_HS37 and its endolysin applied in food / Y. Zhu [et al.] // *International Journal of Food Microbiology*. 2026. Vol. 445. Art. no. 111512. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2025.111512>
30. **Wang, Z.** Characterization of a novel phage vB\_YenP\_WW2 for the inhibition against *Yersinia enterocolitica* biofilm and application in raw meat and milk / Z. Wang [et al.] // *International Journal of Food Microbiology*. 2026. Vol. 444. Art. no. 111468. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2025.111468>
31. **Li, G.** Novel phage vB\_CsaM\_2375H2 effectively controls *Cronobacter sakazakii* biofilms and contamination in powdered infant formula / G. Li [et al.] // *International Journal of Dairy Technology*. 2026. Vol. 79(1). Art. no. e70095. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.70095>
32. **Souza, L. V.** Metabolic profiling of antifungal *Lactiplantibacillus plantarum* strains and their inhibition of *Aspergillus niger* and *Penicillium chrysogenum* in a cheese matrix / L.V. Souza [et al.] // *International Journal of Food Microbiology*. 2026. Vol. 450. Art. no. 111658. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2026.111658>
33. **Rodríguez-Estévez, D.** CRISPR/Cas9-mediated development of *Penicillium roqueforti* strains deficient in roquefortine C and mycophenolic acid enables toxin-free blue cheese production / D. Rodríguez-Estévez [et al.] // *International Journal of Food Microbiology*. 2026. Vol. 446. Art. no. 111535. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2025.111535>
34. **Ciniviz, M.** Comprehensive characterization of butter fermented with region-specific starter cultures / M. Ciniviz, L. Yilmaz-Ersan // *International Dairy Journal*. 2026. Vol. 172. Art. no. 106453. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2025.106453>
35. **Alim, T. S. A.** Structural and thermodynamic properties of a novel butter analogue via synergistic fractionation and oleogelation of milk fat / T. S. A. Alim [et al.] // *International Journal of Dairy Technology*. 2026. Vol. 79(1). Art. no. e70091. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.70091>
36. **Xiong, L.** Effects of different ultrasonic treatments on the physicochemical and solubility properties of milk protein concentrate aggregates / L. Xiong [et al.] // *International Journal of Dairy Technology*. 2026. Vol. 79. Art. no. e70102. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.70102>
37. **Khan, H. M. H.** Near-infrared spectroscopy for compositional analysis of raw milk: Challenges and opportunities / H. M. H. Khan [et al.] // *International Journal of Dairy Technology*. 2025. Vol. 78(4). Art. no. e70076. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.70076>
38. **Mhapsekar, R.** A systematic review of the internet of things and artificial intelligence applications in milk quality monitoring and analysis / R. Mhapsekar [et al.] // *International Journal of Dairy Technology*. 2025. Vol. 78(3). Art. no. e70049. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.70049>
39. **Chen, X.** Effect of milk heat treatment on bioactive components of dairy milk / X. Chen [et al.] // *International Dairy Journal*. 2026. Vol. 172. Art. no. 106455. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2025.106455>

**СЫРОДЕЛИЕ  
МАСЛОДЕЛИЕ**

**Подписка  
на журнал**

podpiska.kemsu@mail.ru

