

Кинетика деградации молочной продукции и выбор направлений переработки на основе критических биомаркеров

Д.С. Рыскин, В.К. Семипятный, Е.Е. Илларионова, Д.В. Климова, А.В. Косарева, К.Э. Ануфриев, А.Е. Рябова

Всероссийский
научно-исследовательский
институт молочной
промышленности, г. Москва.
Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение: Молочная продукция с предельным сроком годности формирует поток пищевых отходов, однако ее переработка затруднена вариабельностью состава и степени деградации. Существующие схемы валоризации (жироотделение, ферментация, анаэробное сбраживание, сушка) ориентированы на однородные потоки и недостаточно учитывают особенности смешанных молочных систем, что ограничивает возможность обоснованного выбора маршрута переработки.

Цель: Выявить критические параметры деградации смешанных молочных систем с предельным сроком годности и разработать на их основе алгоритмические принципы для интеллектуальной системы сортировки, обеспечивающей выбор оптимального направления переработки.

Материалы и методы: Объектами исследования являлись сливки, сметана, кефир и их бинарные смеси 50/50 жирностью 2,5–15 %, срок хранения 90–120 % от рекомендованного производителем. Проведен полнофакторный эксперимент ускоренного хранения при $(32 \pm 1)^\circ\text{C}$ с отбором проб через 0, 72 и 144 ч. Определяли pH, титруемую кислотность, условную вязкость, лактозу, показатели жировой фазы (перекисное и кислотное числа, жирнокислотный состав) и профиль органических кислот. Для экстраполяции на хранение при 5°C использовали модель Аррениуса, а для унификации потоков – регрессионный и кластерный анализ.

Результаты: Скорость деградации определялась исходной матрицей и долей ферментированных компонентов. Наиболее выраженные изменения выявлены в сливках и смесях со сливками: кислотность сливок выросла с 16 до 136°T , pH снизился на 2,9 единицы, а условная вязкость увеличилась более чем в 100 раз, что свидетельствует о развитии кислотной коагуляции и гелеобразования. Сметана характеризовалась наибольшей стабильностью, кефир — высокой начальной кислотностью и выраженным кислотонакоплением. В жировой фазе зафиксирован рост перекисного числа до 5,1–6,6 мэкв $\text{O}_2/\text{кг}$ и кислотного числа до 1,7–2,2 мг КОН/г. Регрессионные модели позволили прогнозировать изменения этих показателей по составу смеси и времени хранения. Накопление молочной кислоты при наличии остаточной лактозы указывает на потенциал кислотной валоризации, тогда как содержание летучих жирных кислот более 1000 мг/л может служить основанием для перенаправления сырья после жироотделения на анаэробное сбраживание. Кластеризация по жирнокислотному составу позволила выделить 4 устойчивые группы образцов, пригодные для унификации партий.

Выводы: Деградационные изменения молочной продукции с предельным сроком годности рассматриваются как совокупность критических биомаркеров, позволяющих соотносить состояние сырья с рациональным маршрутом переработки. Предложенный подход может быть использован для интеллектуальной сортировки, предварительной оценки и маршрутизации продукции, выведенной из стандартного оборота, на этапах хранения, логистики и переработки, создавая основу для обоснованной валоризации неоднородных молочных потоков и снижения потерь ценных компонентов.

Ключевые слова: молочная продукция с предельным сроком годности, критические биомаркеры, валоризация, ускоренное хранение, интеллектуальная сортировка, молочные отходы

Корреспонденция:

Климова Дарья Владимировна
E-mail: d_klimova@vniimi.org

Конфликт интересов:

авторы сообщают
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 14.01.2026

Принята: 15.06.2026

Опубликована: 30.06.2026

Финансирование:

Публикация подготовлена
в рамках государственного
задания FNSS-2025-0006.

Copyright: © 2026 Авторы



Для цитирования: Рыскин, Д.С., Семипятный, В.К., Илларионова, Е.Е., Климова, Д.В., Косарева, А.В., Ануфриев, К.Э., & Рябова, А.Е. (2026). Кинетика деградации молочной продукции и выбор направлений переработки на основе критических биомаркеров. *FOOD METAENGINEERING*, 4(2), 07–24.
<https://doi.org/10.37442/fme.2026.2.112>

Degradation Kinetics of Dairy Products and Selection of Processing Strategies Based on Critical Biomarkers

Dmitry S. Ryskin, Vladislav K. Semipyatniy, Elena E. Illarionova, Daria V. Klimova, Anastasia V. Kosareva,
Konstantin E. Anufriev, Anastasia E. Ryabova

All-Russian Dairy Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction: Dairy products near or beyond the end of their recommended shelf life form a stream of food waste, yet their processing is hampered by compositional variability and different degrees of degradation. Existing valorization schemes, including fat separation, fermentation, anaerobic digestion, and drying, are mainly designed for homogeneous streams and do not sufficiently account for the specific features of mixed dairy systems, which limits the evidence-based selection of an appropriate processing route.

Purpose: To identify critical degradation parameters of mixed dairy systems near or beyond the end of their recommended shelf life and to develop algorithmic principles for an intelligent sorting system that supports the selection of a rational processing route.

Materials and Methods: The study objects were cream, sour cream, kefir, and their 50:50 binary mixtures, with fat contents ranging from 2.5 to 15 % and stored for 90–120 % of the manufacturer-recommended shelf life. A full-factorial accelerated storage experiment was conducted at $(32 \pm 1)^\circ\text{C}$, with sampling after 0, 72, and 144 h. The following parameters were determined: pH, titratable acidity, apparent viscosity, lactose content, fat-phase characteristics (peroxide value, acid value, and fatty acid composition), and organic acid profile. The Arrhenius model was used to extrapolate the results to storage at 5°C , while regression and cluster analyses were applied to group and standardize raw material streams.

Results: The degradation rate was determined by the initial matrix and the proportion of fermented components. The most pronounced changes were observed in cream and cream-containing mixtures: the titratable acidity of cream increased from 16 to 136°T (degrees of titratable acidity used in Russian dairy practice), pH decreased by 2.9 units, and apparent viscosity increased more than 100-fold, indicating acid coagulation and gel formation. Sour cream showed the greatest stability, whereas kefir was characterized by high initial acidity and pronounced acid accumulation. In the fat phase, the peroxide value increased to 5.1–6.6 meq O_2/kg and the acid value to 1.7–2.2 mg KOH/g. The regression models made it possible to predict changes in these parameters as a function of mixture composition and storage time. Lactic acid accumulation in the presence of residual lactose indicates the potential for lactic acid valorization, whereas a volatile fatty acid content above 1000 mg/L may serve as a criterion for redirecting the raw material, after fat separation, to anaerobic digestion. Cluster analysis based on fatty acid composition identified four stable sample groups suitable for batch standardization.

Conclusion: Degradation changes in dairy products near or beyond the end of their recommended shelf life can be interpreted as a set of critical biomarkers that relate the condition of the raw material to a rational processing route. The proposed approach can be used for intelligent sorting, preliminary assessment, and routing of dairy products withdrawn from standard circulation at the stages of storage, logistics, and processing. This creates a basis for evidence-based valorization of heterogeneous dairy streams and for reducing losses of valuable components.

Keywords: dairy products at the end of their shelf life, critical biomarkers, valorization, accelerated storage, intelligent sorting, dairy waste

Correspondence:

Daria V. Klimova

E-mail: d_klimova@vnimi.org

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 14.01.2026

Accepted: 15.06.2026

Published: 30.06.2026

Funding:

The publication was prepared within the framework of state assignment FNSS-2025-0006.

Copyright: © 2026 The Authors



To cite: Ryskin, D.S., Semipyatny, V.K., Illarionova, E.E., Klimova, D.V., Kosareva, A.V., Anufriev, K.E., & Ryabova, A.E. (2026). Degradation kinetics of dairy products and selection of processing strategies based on critical biomarkers. *FOOD METAENGINEERING*, 4(2), 07–24. <https://doi.org/10.37442/fme.2026.2.112>

ВВЕДЕНИЕ

Потери и отходы пищевой продукции остаются одной из ключевых проблем современной продовольственной системы. По оценке продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО ООН), ежегодно в мире теряется или выбрасывается около трети произведенных пищевых продуктов, что эквивалентно примерно 1,3 млрд тонн в год (Цавкелова и др., 2012). Для молочной отрасли эта проблема имеет особую значимость в силу высокой скоропортимости продукции, ограниченного срока годности и высокой ресурсоемкости ее производства. При этом, в менее развитых странах основные потери формируются на стадиях сбора, хранения, переработки и транспортировки, тогда как в более развитых — на стадиях реализации и конечного потребления (Saini et al., 2021). Дополнительная актуальность проблемы обусловлена экологической нагрузкой молочной отрасли, поскольку молочное животноводство вносит заметный вклад в антропогенные выбросы метана (около 4%) (Wang and Zhao, 2022), а побочные продукты переработки молока и нереализованная продукция при нерациональном обращении могут вызывать неблагоприятные изменения водных экосистем вследствие высокой кислотности и высокой биохимической потребности в кислороде (Udourioh et al., 2025). В этих условиях молочная продукция с истекшим или близким к истечению сроком годности должна рассматриваться не только как отход, но и как неоднородный вторичный ресурс, требующий научно обоснованного выбора направления переработки (Балабанова и др., 2014).

Начиная с 2015 года, исследования в области переработки молочных отходов смещаются от изолированных технологических решений к концепции интегрированных биоперерабатывающих комплексов, в которых один поток сырья последовательно используется для получения нескольких целевых продуктов (Mao et al., 2015; Wu et al., 2023). К числу наиболее изученных направлений валоризации относятся извлечение жировой фракции, в частности сепарация молочного жира с последующей трансэтерификацией для получения биодизельного топлива (Andrewes, 2022), получение органических кислот, включая производство оптически чистой молочной кислоты из обезжиренного остатка (Arise et al., 2022), анаэробный метаногенез, а также сушка с получением стабильных продуктов или полуфабрикатов (Волкова, 2002; Михеева и др., 2020). Такой

подход позволяет повысить полноту использования сырья и улучшить экономику переработки, однако эффективность конкретного маршрута существенно зависит от состава исходной молочной матрицы, степени ее микробиологической и биохимической деградации, а также соотношения компонентов в смешанных системах. Наиболее заметно эта зависимость проявляется при рассмотрении отдельных технологических направлений валоризации.

Одним из основных путей валоризации жидких молочных отходов является сушка, позволяющая перевести нестабильную высоковлажную систему в более устойчивую форму. Так, распылительная сушка может использоваться для получения стабильных и микробиологически безопасных кормовых концентратов, включая сухую пахту с содержанием белка около 32 % и жира около 6 % (Бабаев и др., 2011). Однако, данный путь остается высокоэнергоемким, что существенно ограничивает его экономическую эффективность (Kalibekkyzy et al., 2026). Современные исследования и обзоры показывают, что перспективным направлением является совершенствование сушильных технологий, в том числе с использованием энергоэффективных режимов и альтернативных теплоносителей (Волкова, 2002). Вместе с тем даже при технологической модернизации сушка требует достаточно однородного входного потока и не всегда оказывается рациональной для разнонаправленно деградированной молочной продукции. Кроме того, при использовании переработанных потоков в кормовых целях возникают дополнительные требования к стабильности состава и нормативному регулированию. На этом фоне особый интерес представляют технологии, позволяющие предварительно выделять наиболее ценные компоненты молочного сырья.

Другим значимым направлением валоризации является выделение жировой фракции. Молочные продукты некондиционные или с предельным сроком годности содержат значительное количество молочного жира, который при соответствующем состоянии может быть использован на пищевые или технические цели (Cai et al., 2010). При этом способ извлечения жира принципиально влияет на дальнейшую пригодность обезжиренного остатка к последующей переработке. Механические методы предпочтительны на ранних стадиях деградации, когда важно сохранить нативные свойства компонентов матрицы, тогда как более жесткие химические методы обеспечивают более полное извлечение, но сопровождаются более выраженной деструк-

цией сопутствующих веществ (Cai et al., 2010; Nayik and Ranade, 2025). В связи с этим оценка состояния сырья оказывается важной и для выбора последующих биотехнологических маршрутов.

Одним из наиболее исследованных способов утилизации пищевых отходов является анаэробный метаногенез. Высокая концентрация макронутриентов делает отходы молочной отрасли энергетически ценным субстратом для получения биогаза (Antonelli et al., 2016; Narisetty et al., 2022; Udourioh et al., 2025). Так, при анаэробной переработке 1 м³ подсырной сыворотки может образовываться до 20,5 м³ метана (Ergüder et al., 2001). В то же время молочное сырье характеризуется высокой биodeградируемостью, низкой буферной емкостью и склонностью к быстрому накоплению промежуточных продуктов ацидогенеза, прежде всего летучих жирных кислот, что повышает риск ингибирования метаногенеза (Панов и др., 2013; Al-Jumaily et al., 2023; Guzel-Seydim et al., 2011; Krause et al., 2008). Современные исследования подчеркивают, что устойчивость процесса определяется не только общим содержанием органики, но и составом субстрата, скоростью его предварительной деградации и накоплением ингибирующих метаболитов (Al-Jumaily et al., 2023; Krause et al., 2008). Эти же факторы имеют значение и для других вариантов биоконверсии молочного сырья.

Отдельный интерес представляет возможность направленной биоконверсии молочного сырья в молочную кислоту. В обзоре (Arise et al., 2022) показано, что сыворотка и пермеаты являются перспективными лактозосодержащими субстратами для ферментационного получения молочной кислоты с использованием молочнокислых бактерий. Для смешанных молочных систем значимость этого направления определяется тем, что состав и степень кислотонакопления в процессе хранения влияют как на возможность дальнейшей ферментационной переработки, так и на выбор иных маршрутов валоризации, включая анаэробное сбраживание.

Несмотря на заметный прогресс в разработке отдельных технологий валоризации, обзор 2025 г. подчеркивает, что масштабное внедрение таких решений по-прежнему сдерживается рядом взаимосвязанных ограничений (Guzel-Seydim et al., 2000). Одно из них связано с организацией сбора и логистики: фермы, перерабатывающие заводы и розничные точки географически рассредоточены, что повышает затраты на транспортировку сырьевых потоков к единому биоперерабатывающему центру.

Не менее важны ограничения научно-технологического характера. Сложный и вариабельный состав молочных отходов, особенно смесей продукции с предельным сроком годности, затрудняет прогнозирование эффективности различных методов биоконверсии, поскольку продукты деградации и потенциально ингибирующие компоненты могут по-разному влиять на процессы ферментации и анаэробного сбраживания (Михеева и др., 2020; Al-Jumaily et al., 2023; Krause et al., 2008). Дополнительные трудности связаны с тем, что подбор и адаптация микробных культур к таким субстратам остаются недостаточно отработанными (Михеева и др., 2020), а энергетическая и экономическая эффективность многих схем валоризации без применения инструментов моделирования и методов машинного обучения все еще не обеспечивает достаточной отдачи, что снижает их инвестиционную привлекательность по сравнению с более простыми способами утилизации.

В этом контексте особую значимость приобретают исследования, направленные на установление взаимосвязей между степенью деградации молочного сырья, его составом и оптимальным технологическим маршрутом переработки. Одним из возможных решений представляется интеллектуальная система сортировки, основанная на прогнозных моделях и позволяющая дифференцировать сырьевые потоки по их пригодности к жироотделению, ферментации, анаэробному сбраживанию или сушке. Для разработки такой системы необходимо изучение кинетики порчи смешанных молочных систем с использованием модели Аррениуса, выявление критических физико-химических и биохимических маркеров деградации (кислотность, вязкость, окислительные показатели, профиль органических и жирных кислот), а также применение многомерных статистических методов для классификации сырья и прогнозирования его поведения при переработке.

Целью настоящего исследования являлось определение критических параметров деградации смешанных молочных систем с предельным сроком годности и разработка на их основе алгоритмических принципов для интеллектуальной системы сортировки, обеспечивающей выбор оптимального направления переработки. Предполагалось, что скорость и характер деградации таких систем зависели от исходной матрицы и соотношения компонентов, а совокупность выбранных биомаркеров могла быть использована для прогнозирования технологически целесообразного маршрута валоризации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Исследование заключалось в проведении полнофакторного эксперимента ускоренного хранения молочных систем с целью оценки кинетики их деградации и выявления критических биомаркеров для последующей классификации сырья по направлениям переработки. Дизайн исследования включал два фактора: состав молочной системы с шестью уровнями — сливки, сметана, кефир и их бинарные смеси в массовом соотношении 50/50 (сливки со сметаной, сливки с кефиром и сметана с кефиром) — и продолжительность ускоренного хранения с тремя уровнями.

Отбор образцов для анализов производился в трех точках контроля: в начале эксперимента (0 ч), а также через 72 и 144 ч хранения при температуре $(32 \pm 1)^\circ\text{C}$. В каждой точке контроля определяли физико-химические и реологические показатели, характеристики жировой фазы и профиль органических кислот. Для экстраполяции полученных результатов на условия холодильного хранения использовали модель Аррениуса, для унификации сырьевых потоков и выбора направления переработки — регрессионный и кластерный анализ.

Объекты исследования

Объектами исследования являлись непереработанные молочные продукты с истекшим или близким к истечению сроком годности, потенциально пригодные для вторичной переработки: сливки, сметана и кефир, а также их бинарные смеси. Исходные продукты имели срок годности 90–120 % от рекомендованного производителем.

В соответствии с планом эксперимента были сформированы шесть модельных композиций, включающих индивидуальные продукты — сливки с массовой долей жира 10%, сметану с массовой долей жира 15% и кефир с массовой долей жира 2,5%, а также их бинарные смеси в массовом соотношении 50/50, которые моделируют состав сырьевых смесей, образующихся при переработке молочной продукции. Расчетная массовая доля жира в смесях составила: для сливок со сметаной — 12,5%, для сливок с кефиром — 6,25%, для сметаны с кефиром — 8,75%.

Масса каждого образца составляла 150 г. При наличии визуальной неоднородности образцы предварительно перемешивали при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ в течение 30 с с использованием цифровой магнитной мешалки

TP-350+ с подогревом (MIULab, Китай), после чего укупоривали в стерильные пластиковые контейнеры.

Процедура исследования

Условия ускоренного хранения

Для моделирования ускоренной деградации образцы хранили при температуре $(32 \pm 1)^\circ\text{C}$ в течение 144 ч. Указанный температурный режим выбран для интенсификации микробиологических и химических процессов при сохранении механизмов деградации, характерных для реальных условий хранения.

Хранение проводили в термостате суховоздушном тв-80–1–ПЗ-К» УХЛ4.2 (Касимовский приборный завод, Россия) в закрытых пластиковых контейнерах при отсутствии света без контроля влажности. Отбор проб осуществляли в начале эксперимента (фоновый образец) и через 72 и 144 ч хранения.

Аналитические методы

Физико-химические показатели

В процессе хранения определяли активную кислотность (pH), титруемую кислотность ($^\circ\text{T}$) и массовую долю лактозы.

Активную кислотность определяли по ГОСТ 32892–2014 посредством потенциометрического измерения активности ионов водорода с использованием pH-метра Aquasearcher TM AB33PH-B с электродом Starter ST230 (Ohaus Corporation, США).

Титруемую кислотность определяли по ГОСТ 3624–92.

Массовую долю лактозы определяли по ГОСТ Р 54667–2011 с использованием сахариметра СУ-4 (НПО «Аналитприбор», Украина).

Реологические показатели

Реологические свойства образцов оценивали ротационным методом с применением ротационного вискозиметра Brookfield DV-II+Pro (Brookfield Engineering Laboratories, Inc., USA) со шпинделем RV3 при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и частоте вращения 80 об/мин.

Показатели жировой фазы

и профиль органических кислот

Для оценки состояния липидной фазы определяли перекисное число (PV) (мэкв $\text{O}_2/\text{кг}$), кислотное число (AV) (мг KOH/г) и жирнокислотный состав.

Жировую фазу выделяли по ГОСТ 31933–2012, пункт 3 с применением газового хроматографа «Кристаллюкс 4000М» исполнение 2 (ООО НПФ «Мета-хром», Россия) с пламенно-ионизационным детектором и капиллярной колонкой.

Перекисное число определяли по ГОСТ Р 51487–99.

Кислотное число определяли по ГОСТ 31648–2022 посредством растворения выделенной из образцов жировой фракции в спиртохлороформной смеси с последующим титрованием свободных жирных кислот спиртовым раствором гидроокиси калия в присутствии индикатора фенолфталеина.

Содержание органических кислот (молочной, лимонной, муравьиной, янтарной и уксусной) определяли методом капиллярного электрофореза по методике М 04–47–2012 на системе «Капель-205» (ООО «Люмекс-Маркетинг», г. Санкт-Петербург, Россия, заводской № 3077) с электрофоретическим разделением в кварцевом капилляре и фотометрическим (косвенным) детектированием при 254 нм. Обработку данных проводили в программном обеспечении «Эльфوران» (ООО «Люмекс», Россия).

Жирнокислотный состав определяли по ГОСТ 32915–2014 с применением газового хроматографа «Кристаллюкс 4000М» исполнение 2 (ООО НПФ «Мета-хром», Россия).

Кинетическое моделирование и экстраполяция сроков хранения

Для экстраполяции результатов ускоренного хранения на условия холодильного хранения использовали классическую модель Аррениуса, согласно формуле (1):

$$k(T) = A \times \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (1)$$

где E_a — энергия активации, принятая равной 66,7 кДж·моль⁻¹ как верхняя граница диапазона процессов, лимитирующих качество питьевого и ферментированного молока и характерная для липидного окисления (Hassan and Nelson, 2012); R — универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж·моль⁻¹·К⁻¹; T — абсолютная температура хранения, К.

Соотношение констант скоростей деградации при температурах 32 и 5 °С рассчитывали по формуле (2):

$$\frac{k_{32}}{k_5} = \exp\left(-\frac{E_a}{R} \times \left(\frac{1}{T_{32}} - \frac{1}{T_5}\right)\right), \quad (2)$$

где k_{32} и k_5 — эффективные константы скорости деградации при 32 и 5 °С соответственно; $T_{32} = 305,15$ К, $T_5 = 278,15$ К.

При допущении линейного накопления дефектов степень деградации считали пропорциональной $k(T)$. Эквивалентное время хранения при 5 °С рассчитывали по формуле (3):

$$t_5 = t_{32} \frac{k_{32}}{k_5}. \quad (3)$$

Для промышленной интерпретации результатов в модели интеллектуальной сортировки был введен коэффициент запаса 1,2 (Lu et al., 2019), учитывающий вариабельность сырья и температурные колебания в логистической цепочке.

Статистический и кластерный анализ

Все измерения выполняли в трех повторностях. Результаты представляли как среднее значение ± стандартное отклонение. Статистическую значимость различий оценивали при уровне $p < 0,05$, с использованием однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA), а для многомерных данных — пермутационного дисперсионного анализа PERMANOVA (на базе 999 пермутаций). Для детализации парных различий между группами применялся post-hoc тест Тьюки (HSD). Статистическую обработку проводили в Python 3.11 (библиотеки pandas, matplotlib, scipy, scikit-learn; разработчик — Python Software Foundation, США), а также использовали Microsoft Excel (Microsoft, США), Wolfram Mathematica (Wolfram Research, США) и ObservableHQ (Observable, Inc., США).

Перед кластерным анализом данные по жирнокислотному составу подвергали Z-нормализации. Иерархическую кластеризацию выполняли по методу Уорда с использованием евклидовой метрики. В качестве алгоритма агломеративной кластеризации выбран метод Уорда (минимальной дисперсии), целью которого является минимизация общего внутрикластерного разброса (суммы квадратов отклонений) на каждом шаге объединения. Математически расстояние (меру связи) между двумя кластерами A и B определяют как увеличение суммы квадратов ошибок после их слияния:

$$D(A, B) = \frac{n_A n_B}{n_A + n_B} \times \|\mu_A - \mu_B\|^2, \quad (4)$$

где n_A и n_B — количество объектов в кластерах A и B ; μ_A и μ_B — векторы средних значений (центроиды) кластеров.

На каждом шаге алгоритма объединяются те два кластера, для которых значение $D(A, B)$ минимально, что обеспечивает формирование компактных и однородных групп объектов. Визуализация результатов проводилась в виде дендрограммы.

Анализ применяли для унификации входного сырья и формирования сценариев технологического рециклинга в рамках интеллектуальной системы сортировки. Для показателей жировой фазы строили регрессионные модели зависимости PV и AV от состава смеси и времени хранения. Использовали Python 3.11 с библиотеками scikit-learn и pandas, а также Wolfram Mathematica для аналитического описания регрессионных и кинетических уравнений. Тип модели — множественная полиномиальная регрессия (включающая линейные члены, квадратичные члены и члены взаимодействия).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Кинетика физико-химической деградации молочных систем

В ходе ускоренного хранения при $32 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 144 ч зафиксирована выраженная деградация большинства исследованных систем (Таблица 1). Наиболее интенсивные изменения наблюдались в образцах с высокой массовой долей лактозы и низкой начальной кислотностью — прежде всего в сливках и в смесях сливки-кефир. Так, за 144 ч титруемая кислотность сливок возросла с 16 до 136°T , то есть в 8,5 раза, $p < 0,05$, pH снизился на 2,9 единицы, а условная вязкость увеличилась более чем в 100 раз (с 6,08 до 790 с).

Напротив, сметана демонстрировала наибольшую коллоидную стабильность: изменения pH и титруемой кислотности были статистически менее выраженными, а значит, допустимый интервал ее технологическо-

Таблица 1

Физико-химические показатели образцов в динамике ускоренного хранения

Table 1

Physicochemical Parameters of Samples During Accelerated Storage

Образец	Время хранения, ч	Условная вязкость, с	pH	Титруемая кислотность, °T	Массовая доля лактозы, %
Сл	0	$6,08 \pm 0,91^a$	$6,50 \pm 0,97^a$	$16 \pm 2,40^a$	$4,49 \pm 0,67^a$
	72	$560,00 \pm 84,00^b$	$4,11 \pm 0,62^b$	$96 \pm 14,40^b$	$3,80 \pm 0,57^b$
	144	$790,00 \pm 118,50^b$	$3,60 \pm 0,54^c$	$136 \pm 20,40^c$	$3,45 \pm 0,52^b$
См	0	Высокая	$4,39 \pm 0,66^a$	$78 \pm 11,70^a$	$4,08 \pm 0,61^a$
	72	Высокая	$4,18 \pm 0,63^{ab}$	$85 \pm 12,75^{ab}$	$3,86 \pm 0,58^{ab}$
	144	Гелеобразование	$4,07 \pm 0,61^b$	$89 \pm 13,35^b$	$3,75 \pm 0,56^b$
К	0	$47,00 \pm 7,05^a$	$4,20 \pm 0,63^a$	$96 \pm 14,40^a$	н/д
	72	$39,00 \pm 5,85^{ab}$	$4,06 \pm 0,61^a$	$131 \pm 19,65^b$	н/д
	144	$35,00 \pm 5,25^b$	$3,99 \pm 0,60^a$	$149 \pm 22,35^b$	н/д
СлСм	0	$8,34 \pm 1,25$	$5,28 \pm 0,79^a$	$50 \pm 7,50^a$	$3,91 \pm 0,59^a$
	72	Высокая	$4,35 \pm 0,65^b$	$74 \pm 11,10^{ab}$	$3,81 \pm 0,57^a$
	144	Гелеобразование	$3,88 \pm 0,58^c$	$86 \pm 12,90^b$	$3,76 \pm 0,56^a$
СлК	0	$7,12 \pm 1,07^a$	$5,27 \pm 0,79^a$	$55 \pm 8,25^a$	$5,05 \pm 0,76^a$
	72	$68,00 \pm 10,20^b$	$3,85 \pm 0,58^b$	$150 \pm 22,50^b$	$3,99 \pm 0,60^b$
	144	$96,00 \pm 14,40^c$	$3,50 \pm 0,53^b$	$198 \pm 29,70^b$	$3,46 \pm 0,52^b$
СмК	0	$290,00 \pm 43,50^a$	$4,30 \pm 0,64^a$	$94 \pm 14,10^a$	$4,41 \pm 0,66^a$
	72	$210,00 \pm 31,50^b$	$3,91 \pm 0,59^b$	$138 \pm 20,70^b$	$3,34 \pm 0,50^b$
	144	$213,00 \pm 25,50^b$	$3,71 \pm 0,56^b$	$160 \pm 24,00^b$	$2,80 \pm 0,42^c$

Примечание. Сл — сливки, См — сметана, К — кефир.

Note. Cr — cream, Sm — sour cream, K — kefir.

го использования оставался более широким. Кефир характеризовался высокой начальной кислотностью и меньшей динамикой pH, но значительным ростом титруемой кислотности. Выявленная динамика согласуется с современными представлениями о кислотном гелеобразовании молочных систем. По мере снижения pH уменьшается устойчивость казеиновых мицелл, усиливается их агрегирование и формируется более плотная пространственная структура, что сопровождается ростом вязкости и плотности геля. Для модельных кислотных гелей и сливочно-сырных систем показано, что условия подкисления и состав матрицы существенно влияют на реологические свойства формирующейся структуры (Guzel-Seydim et al., 2000). В этом контексте высокая чувствительность сливок и смесей, содержащих сливки, к кислотонакоплению закономерно указывает на необходимость их более раннего направления на переработку по сравнению с более устойчивыми матрицами.

Для экстраполяции ускоренных испытаний на условия холодильного хранения была использована модель Аррениуса. Для линейного накопления дефектов степень деградации пропорциональна $k(T)$, поэтому:

$$t_5 = t_{32} \frac{k_{32}}{k_5} = 144 \text{ ч} \times 12,8 \approx 18,4 \times 10^2 \text{ ч (77 сут.)}. \quad (5)$$

Таким образом, 144 ч хранения при 32 °C соответствовали приблизительно 77 сут. хранения при 5 °C. С учётом введённого коэффициента запаса 1,2 расчётный безопасный горизонт для промышленной интерпретации составляет около 64 сут.

Изменения жировой фазы и прогноз ее пригодности

Все исследованные продукты относились к высоковлажным системам ($a_w > 0,97$), что создавало условия для ускоренного развития гидролитических и окислительных изменений при нарушении холодильной цепи. В условиях ускоренного хранения перекисное число (PV) увеличивалось с 0,7–0,9 до 5,1–6,6 мэкв O_2 /кг, а кислотное число (AV) — с 0,6–0,8 до 1,7–2,2 мг KOH/г за 144 ч.

На основе полнофакторного эксперимента были получены регрессионные модели для прогнозирования PV и AV в зависимости от состава смеси и времени хранения. При этом x — массовая доля сметаны в смеси, y — массовая доля кефира, t — время хранения, ч, а массовая доля сливок задавалась как зависимый

параметр ($1 - x - y$). Для перекисного числа получено уравнение (6):

$$PV(x, y, t) = 0,71 + 0,052t + 0,34x - 0,008tx - 0,4x^2 + 0,18y - 0,006ty + 1,2xy \quad (6)$$

для кислотного числа — уравнение (7):

$$AV(x, y, t) = 0,54 + 0,012t - 0,2x + 0,4x^2 + 0,28y - 0,001ty + 0,4xy + 0,2y^2. \quad (7)$$

Высокие значения коэффициента детерминации ($R^2 = 0,898$ для PV и $0,905$ для AV) и низкие значения MAE подтвердили адекватность моделей в пределах изученного диапазона факторов. Поверхности отклика (Рисунок 1) показывают, что критический выход за пределы кормовой пригодности ($PV > 5$ мэкв O_2 /кг) наступал уже после 72 ч при 32 °C, тогда как по кислотному числу, нормируемому для технического животного жира первого сорта, все образцы сохраняли соответствие требованиям ГОСТ 1045–73 в течение всего исследуемого периода.

Профиль органических кислот как биомаркер направления утилизации

Анализ органических кислот (Таблица 2) показал интенсивное накопление молочной кислоты во всех исследованных смесях, особенно в комбинациях с кефиром. Содержание летучих жирных кислот (ЛЖК) более 1000 мг/л было характерно прежде всего для кефира и кефиросодержащих смесей.

Динамика жирнокислотного состава и кластеризация сырья

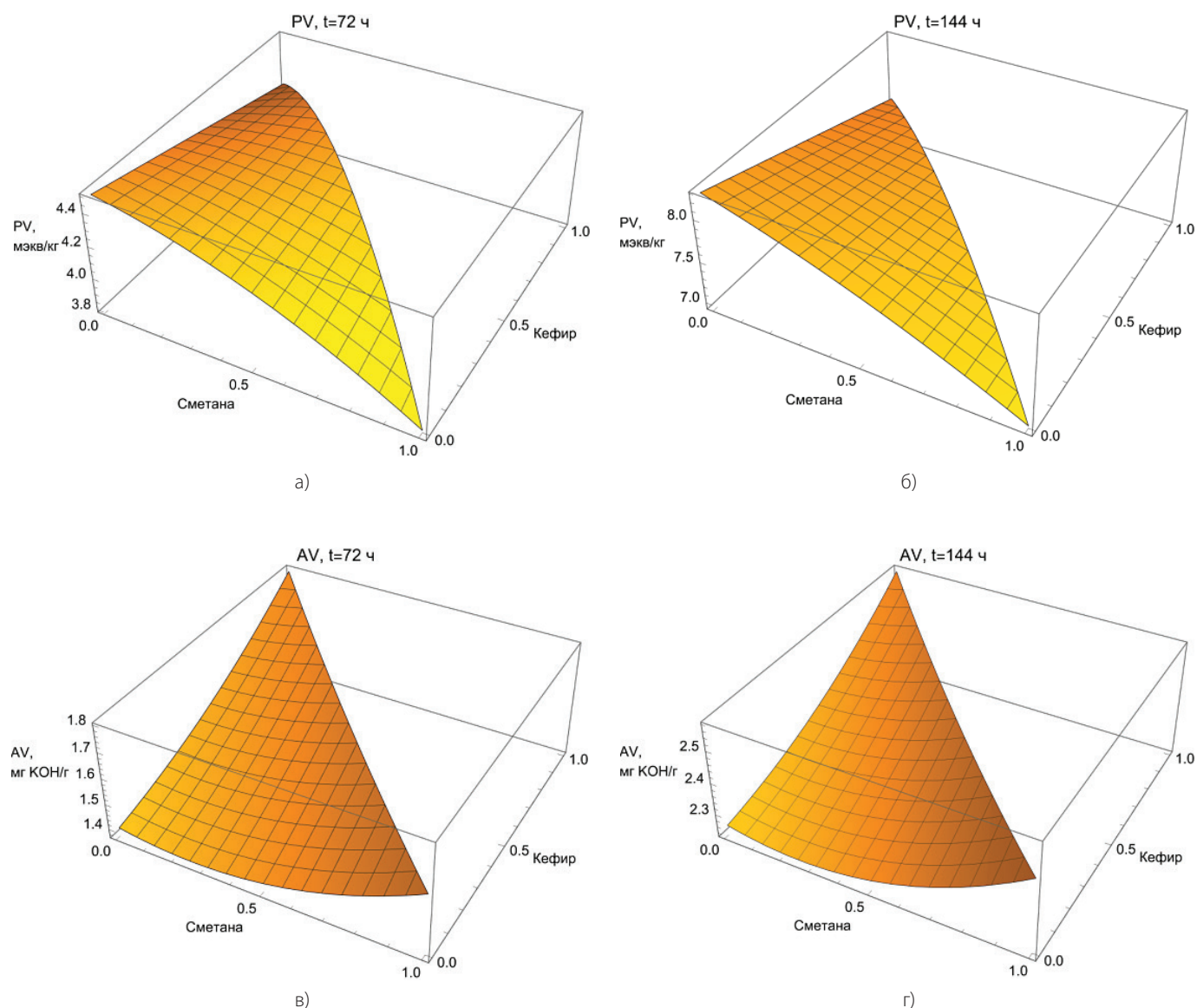
Изменения жирнокислотного состава (Рисунок 2) указывали на умеренную липолитическую активность в процессе хранения. В сметане и сметаносодержащих смесях содержание каприловой (C8:0) и каприновой (C10:0) кислот увеличивалось к 72 ч, после чего стабилизировалось. Во всех образцах к 144 ч было зафиксировано достоверное ($p < 0,05$) увеличение долей пальмитиновой (C16:0) и пальмитолеиновой (C16:1 cis-9) кислот приблизительно на 4 %, что свидетельствует о частичной деградации длинноцепочечных триглицеридов (Kong et al., 2019). Отношение C18:1 cis-9/C16:0 снижалось с $0,75 \pm 0,02$ до $0,69 \pm 0,02$, оставаясь в диапазоне, характерном для молочного жира. Одновременно

Рисунок 1

Поверхности отклика модели прогнозирования изменения перекисного числа (PV) и кислотного числа (AV) в зависимости от состава смеси и времени хранения

Figure 1

Response Surfaces of The Model for Predicting Changes in Peroxide Value (PV) And Acid Value (AV) Depending on The Mixture Composition and Storage Time



Примечание. (а) PV через 72 ч, (б) PV через 144 ч, (в) AV через 72 ч, (г) AV через 144 ч. Сметана и кефир указаны в долях, остаточная доля приходится на сливки.

Note. (A) PV At 72 H, (B) PV At 144 H, (C) AV At 72 H, (D) AV At 144 H. Sour Cream and Kefir Are Given in Fractions; The Remaining Fraction Corresponds to Cream

Д.С. Рыскин, В.К. Семипятный, Е.Е. Илларионова, Д.В. Климова, А.В. Косарева, К.Э. Ануфриев, А.Е. Рябова

Таблица 2

Органические кислоты смесей молочных продуктов в процессе хранения

Table 2

Organic Acids of Dairy Product Mixtures During Storage

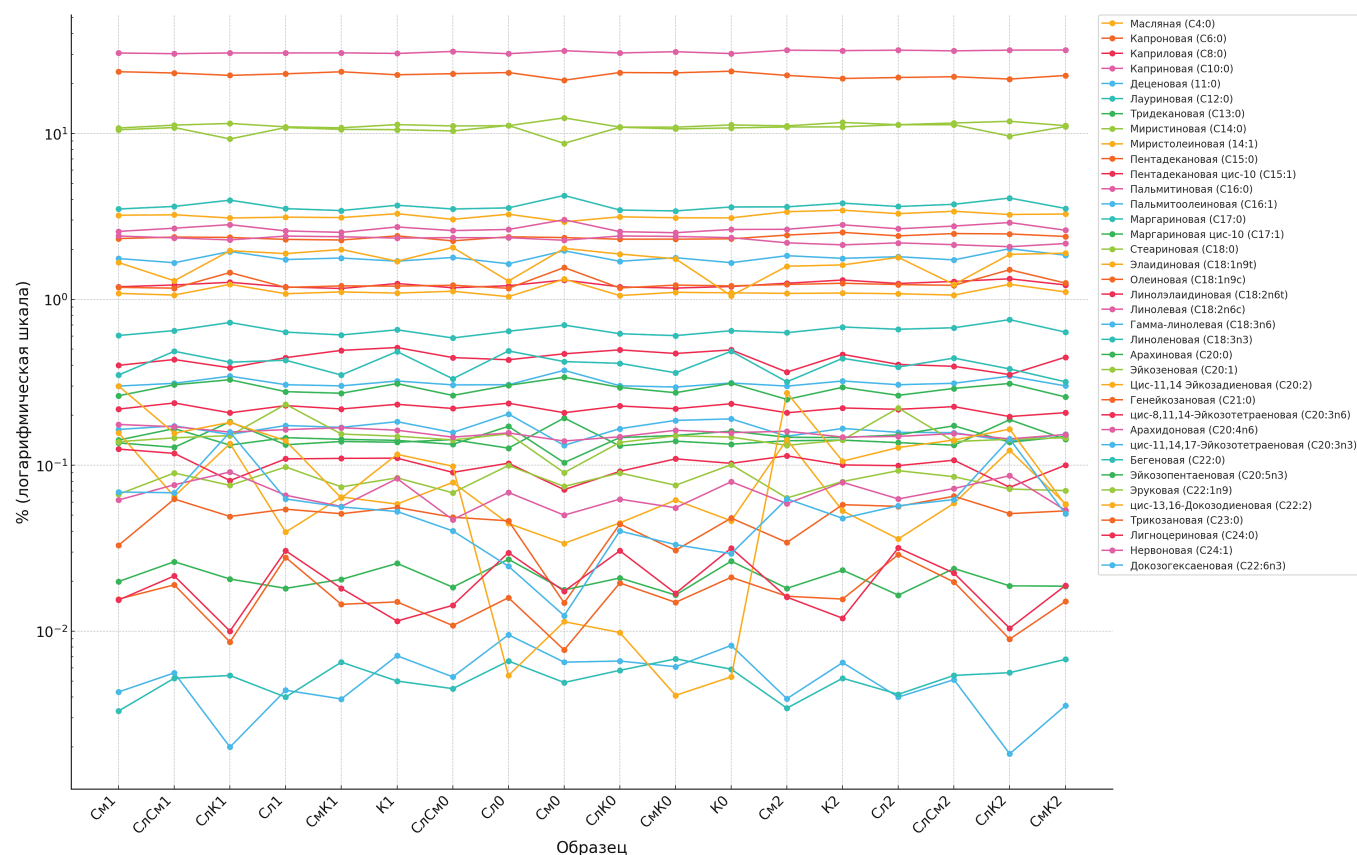
Кислота (мг/л)	Молочная		Лимонная		Муравьиная		Янтарная	Уксусная
	0 ч	72 ч	0 ч	72 ч	0 ч	72 ч	72 ч	72 ч
Сл	1913,3 ^a	5270 ^b	2561,7 ^a	1066,2 ^b	132,3 ^a	58,9 ^b	0	0
СлК	8347,7 ^a	13616 ^b	1537,0 ^a	1120,0 ^b	37,6 ^a	44,0 ^a	180	0
К	7448,9 ^a	14188 ^b	<1	<1	76,4 ^a	66,6 ^a	153	1007
СлСм	4738,2 ^a	5384 ^a	1701,5 ^a	1138,2 ^b	145,4 ^a	64,9 ^b	141	0
См	3640,5 ^a	4566 ^a	630,0	<1	34,9 ^a	42,6 ^a	484	0
СмК	6254,1 ^a	17550 ^b	829,4	<1	23,8 ^a	40,1 ^a	0	676

Рисунок 2

Динамика жирнокислотного состава образцов в хранении

Figure 2

Dynamics Of Fatty Acid Composition of Samples During Storage



Примечание. Обозначения: 0 — контроль, 1–72 ч хранения, 2–144 ч хранения.

Note. Designations: 0 — Control, 1–72 H Of Storage, 2–144 H Of Storage.

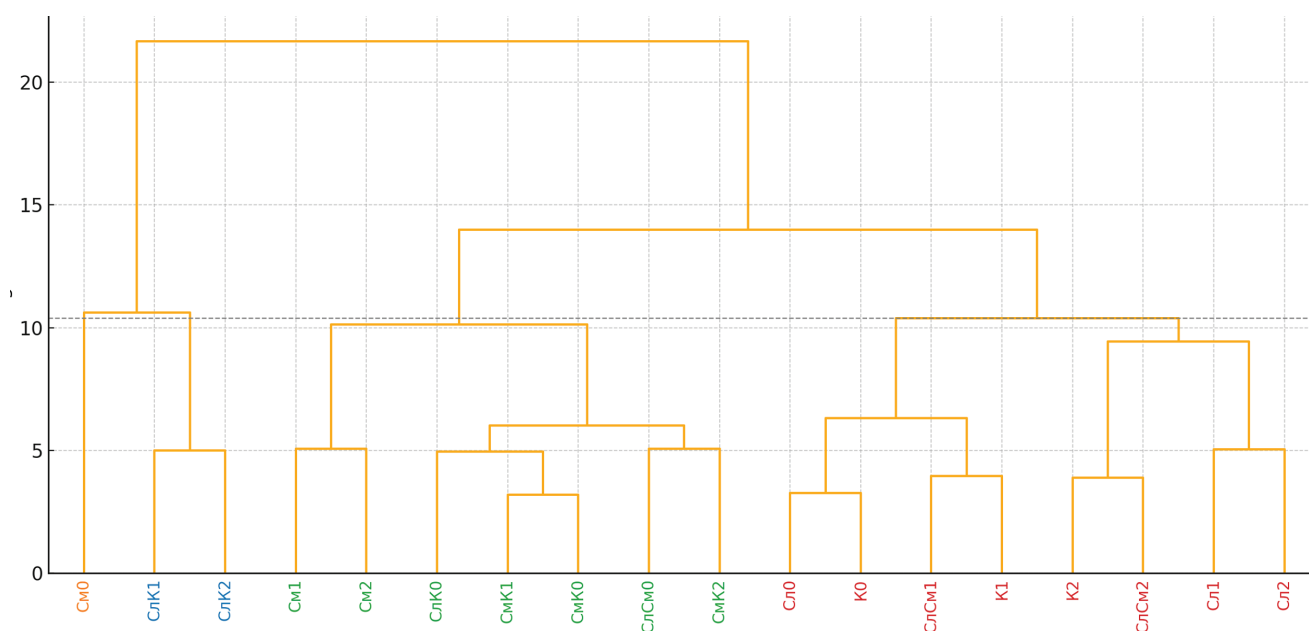
Д.С. Рыскин, В.К. Семипятный, Е.Е. Илларионова, Д.В. Климова, А.В. Косарева, К.Э. Ануфриев, А.Е. Рябова

Рисунок 3

Кластерный иерархический анализ деградационных изменений образцов смесей молочной продукции в процессе хранения

Figure 3

Cluster Hierarchical Analysis of Degradation Changes in Dairy Product Mixture Samples During Storage



наблюдалось увеличение доли насыщенных жирных кислот и снижение доли полиненасыщенных жирных кислот, что соответствует ранним стадиям окислительных изменений.

По результатам иерархического кластерного анализа Уорда (Рисунок 3) выделены четыре устойчивых кластера. Вклад исходной матрицы в объясненную дисперсию составил 35 %, времени хранения — 28 %. Для всех продуктов образцы 144 ч формировали отдельные подкластеры, оставаясь ближе к исходной матрице, чем к другим продуктам. Сметана и сметаносодержащие смеси формировали устойчивую отдельную ветвь, тогда как кефир оказался наиболее дистанцированным по жирнокислотному профилю.

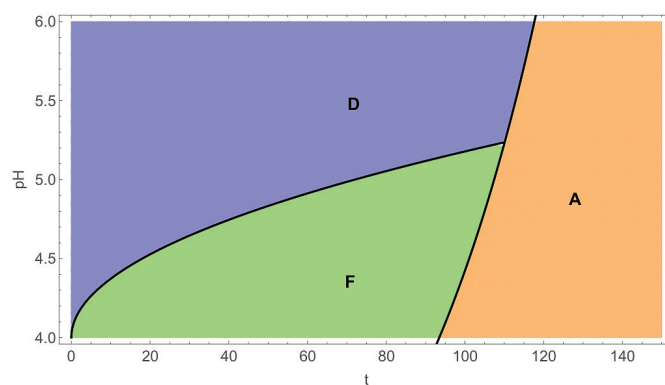
Результаты кластеризации были интегрированы в алгоритм сортировки, поскольку смешивание сырья внутри одного кластера обеспечивало более надежное прогнозирование деградационных изменений и более устойчивый выбор сценария переработки (Рисунок 4).

Рисунок 4

Фазовая диаграмма технологической целесообразности переработки смесей молочной продукции в зависимости от кислотности и времени хранения

Figure 4

Phase Diagram of the Technological Feasibility of Dairy Product Mixture Processing Depending on Acidity and Storage Time



Примечания. D — область целесообразности сушки, F — область отделения жировой фазы, A — область целесообразности анаэробного метаногенеза. «Тройная точка» технологической целесообразности: (109, 5.27).

Note. D — Region of Drying Feasibility, F — Region of Fat Phase Separation, A — Region of Anaerobic Methanogenesis Efficiency. "Triple Point" of Technological Feasibility: (109, 5.27).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Целью данного исследования являлось выявление критических параметров деградации смешанных молочных систем с предельным сроком годности и разработка на их основе алгоритмических принципов для интеллектуальной системы сортировки, обеспечивающей выбор оптимального направления переработки (жироотделение, сушка, анаэробное сбраживание). Дизайн эксперимента включал полнофакторное ускоренное хранение (32 °C, 144 ч) сливок, сметаны, кефира и их бинарных смесей, поэтому в обсуждении последовательно интерпретируются изменения кислотонакопления и реологических свойств, состояние жировой фазы, профиль органических кислот и жирнокислотный состав, а также рассматриваются ограничения полученных результатов.

Последовательность, в которой представлены результаты, отражает реальную цепочку принятия решений при маршрутизации молочного сырья с предельным сроком годности: от оценки скорости кислотонакопления — к пригодности жировой фазы, затем к профилю органических кислот как индикатору стадии ацидогенеза и, наконец, к унификации сырьевых потоков по жирнокислотному составу. Ключевым параметром, определяющим возможность механической переработки, выступает скорость кислотонакопления и сопутствующие реологические изменения. Резкое сгущение сливок (увеличение вязкости в 100 раз за 144 ч) отражает их высокую склонность к кислотной коагуляции и гелеобразованию, что существенно ограничивает технологическую перерабатываемость (Wang and Zhao, 2022; Wu et al., 2023; Yao et al., 2024). Добавление ферментированных компонентов (кефир, сметана) к сливкам ускоряет коагуляционные процессы и приводит к раннему гелеобразованию, потенциально повышая энергетические затраты при механической сепарации. Выявленная динамика согласуется с современными представлениями о кислотном гелеобразовании: по мере снижения pH уменьшается устойчивость казеиновых мицелл, усиливается их агрегирование и формируется более плотная пространственная структура (Wu et al., 2023). Высокая чувствительность сливок и сливоксодержащих смесей к кислотонакоплению указывает на необходимость их более раннего направления на переработку по сравнению со сметаной, которая демонстрирует более широкий допустимый интервал технологического использования. Модель Аррениуса здесь применяется

как инструмент сравнительной оценки направления и скорости изменений в соответствии с современной практикой исследований хранимоустойчивости молочной продукции (Andrewes, 2022).

Наряду с изменениями в белково-углеводной матрице, значимую информацию о пригодности сырья к переработке несет состояние жировой фазы. Эксперимент проводили в закрытой таре, что минимизировало фотоиндуцированное окисление. В таком случае наблюдаемые изменения перекисного числа (PV) и кислотного числа (AV) следует рассматривать преимущественно как результат внутренних гидролитических и окислительных процессов (Балабанова и др., 2014; Arise et al., 2022). Совместный рост обоих показателей указывает на одновременное развитие окислительных и гидролитических изменений — аналогично тому, что описано для сливочного масла (Krause et al., 2008) и ультрапастеризованного молока (Lu et al., 2019), где повышение температуры и продолжительности хранения сопровождается усилением липолиза, окисления и уменьшением доли ненасыщенных жирных кислот. В этом контексте предварительное жироотделение из более деградированных систем можно рассматривать как технологически обоснованный этап: он позволяет выделить липидную фракцию до достижения уровней порчи, ограничивающих дальнейшие варианты ее использования.

Особого внимания заслуживает профиль органических кислот, который позволяет дифференцировать сырье для разных биотехнологических маршрутов. Высокая концентрация молочной кислоты при наличии остаточной лактозы делает большинство систем потенциально пригодным субстратом для получения технической молочной кислоты. Накопление молочной кислоты в кефирных и кефирсодержащих системах согласуется с данными по постацидификации кефира при хранении: установлено, что ее содержание продолжает расти даже при незначительной динамике pH (Guzel-Seydim et al., 2000). Вместе с тем в условиях спонтанного брожения вероятно формирование рацемической (DL) смеси, менее ценной технологически по сравнению с оптически чистым L-лактатом (Волкова, 2002; Cai et al., 2010; Kong et al., 2019), что ограничивает привлекательность этого маршрута без дополнительной стабилизации процесса. Порог летучих жирных кислот (ЛЖК) > 1000 мг/л предложен как дополнительный критерий для перенаправления субстрата после жироотделения на анаэробное

сбраживание (Михеева и др., 2020; Панов и др., 2013; Kuczman et al., 2018; Mao et al., 2015). Для молочных стоков и сыворотки высокая биodeградируемость, кислая среда и низкая щелочность создают риск закисления анаэробного процесса, особенно при повышенной нагрузке (Hassan and Nelson, 2012; Prazeres et al., 2012), а накопление ЛЖК отражает нарушение равновесия между ацидогенезом и метаногенезом (Casallas-Ojeda et al., 2024; Hassan and Nelson, 2012). Этот порог следует рассматривать как практический критерий для исследованных молочных систем, а не как универсальную величину для всех видов анаэробной переработки.

Завершающим звеном в интерпретации деградационных изменений выступает жирнокислотный профиль, который, помимо самостоятельного значения, позволяет унифицировать сырьевые потоки. Наблюдаемый сдвиг жирнокислотного состава — рост доли насыщенных кислот и снижение доли полиненасыщенных — соответствует ранним стадиям окислительных изменений и согласуется с закономерностью, согласно которой ненасыщенные компоненты вовлекаются в окислительные процессы в первую очередь (Lu et al., 2019). Принципиально важно, что кластерный анализ выявил устойчивое доминирование фактора исходной матрицы над фактором времени хранения (35 % против 28 % объясненной дисперсии): это означает, что состав сырья сильнее определяет траекторию деградации, чем длительность хранения как таковая. Обособленное положение кефира в дендрограмме указывает на необходимость для него отдельного сценария технологического рециклинга; смешивание сырья внутри одного кластера обеспечивает более надежное прогнозирование деградационных изменений и более устойчивый выбор маршрута переработки.

Ограничения исследования

Настоящее исследование было ограничено анализом деградационных изменений в пределах трёх видов молочной продукции (сливки, сметана, кефир) и их бинарных смесей в условиях модельного ускоренного хранения при фиксированной температуре. Полученные данные могут не полностью отражать вариабельность состава и кинетику порчи реальных смешанных молочных отходов, образующихся в логистических цепях с колебаниями температур. Кроме того, предложенный пороговый критерий летучих жирных кислот (>1000 мг/л) обоснован только для изученных систем, а отсутствие разделе-

ния оптических изомеров молочной кислоты ограничивает оценку маршрута кислотной валоризации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило, что молочная продукция с предельным сроком годности представляет собой неоднородное сырье, в котором направленность дальнейшей переработки определяется не формальным сроком хранения, а совокупностью деградационных изменений, формирующихся в конкретной молочной системе. В наибольшей степени технологическое поведение таких систем связано с изменением физико-химических и реологических показателей, состоянием жировой фазы и профилем органических кислот. В этой связи предложенный подход позволяет рассматривать выявленные показатели не только как характеристики порчи, но и как критические биомаркеры, пригодные для интеллектуальной сортировки сырья и выбора рационального направления переработки. Такое представление переводит оценку молочной продукции с предельным сроком годности из описательной плоскости в технологическую, где степень деградации соотносится с возможностью жиροотделения, дальнейшей ферментации, анаэробного сбраживания или других вариантов валоризации.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные положения могут быть использованы при организации предварительной оценки, сортировки и маршрутизации молочной продукции, выведенной из стандартного оборота, на этапах хранения, логистики и переработки. Их применение создает предпосылки для более полного использования ресурсного потенциала молочного сырья, снижения потерь ценных компонентов и повышения обоснованности технологических решений.

Дальнейшее развитие данного направления целесообразно связывать с расширением круга исследуемых молочных систем, проверкой установленных закономерностей в производственных условиях и совершенствованием прогностических моделей, учитывающих специфику состава сырья, глубину деградационных изменений и условия последующей переработки. Перспективным представляется и развитие алгоритмов интеллектуальной сортировки как основы для комплексных систем валоризации молочной продукции с предельным сроком годности.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Дмитрий Сергеевич Рыскин: концептуализация; методология; проведение исследования; подготовка рукописи.

Владислав Константинович Семипятный: эмпирические исследования; верификация данных.

Елена Евгеньевна Илларионова: проведение исследования; эмпирические исследования; валидация результатов.

Дарья Владимировна Климова: проведение исследования; эмпирические исследования; верификация данных; написание рукописи.

Анастасия Валерьевна Косарева: валидация результатов; визуализация данных; верификация данных.

Константин Эдуардович Ануфриев: эмпирические исследования; верификация данных.

Анастасия Евгеньевна Рябова: валидация результатов; верификация данных.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Dmitry S. Ryskin: conceptualization; methodology; investigation; manuscript preparation.

Vladislav K. Semipyatnyi: empirical research; data verification.

Elena E. Illarionova: investigation; empirical research; validation of results.

Daria V. Klimova: investigation; empirical research; data verification; manuscript writing.

Anastasia V. Kosareva: validation of results; data visualization; data verification.

Konstantin E. Anufriev: empirical research; data verification.

Anastasia E. Ryabova: validation of results; data verification.

ЛИТЕРАТУРА

- Бабаев, В. Н., Горох, Н. П., & Коринько, И. В. (2011). Энергетический потенциал метанообразования при мезофильном анаэробном разложении органической составляющей отходов. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*, 4(6), 59–65.
- Балабанова М. Ю., Складнев Е. В., Панов С. Ю. (2014). Математическое моделирование процесса химико-термической переработки целлюлозосодержащих отходов. *Химическая промышленность*, 91(1), 11–14.
- Волкова Г. С. (2002). *Исследование процессов ферментации отходов переработки сельскохозяйственного сырья с помощью кислотообразующих бактерий для получения молочной кислоты и ее производных* [Дис. канд. техн. наук]. Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии РАСХН.
- Михеева Э. Р., Катраева И. В., Ворожцов Д. Л., Литти Ю. В., & Ножевникова А. Н. (2020). Эффективность двухфазного анаэробного сбраживания и физико-химические свойства органической фракции твердых коммунальных отходов, предобработанных в аппарате вихревого слоя. *Прикладная биохимия и микробиология*, 56(6), 619–626. <https://doi.org/10.31857/S0555109920060112>.
- Панов С. Ю., Чернецкая А. А., Жучков А. В., & Рязанов А. В. (2013). Разработка научных основ технологии утилизации пищевых отходов методом анаэробного сбраживания. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 4(58), 200–204.
- Цавкелова, Е. А., Егорова М. А., Петрова Е. В., & Нетрусов А. И. (2012). Образование биогаза микробными сообществами при разложении целлюлозы и пищевых отходов. *Прикладная биохимия и микробиология*, 48(4), 417. <https://doi.org/10.1134/S0003683812040126>
- Al-Jumaily A. M., Meshkinzar A., Torres L. M. P. (2023). On the development of emulsion destabilization technologies for dairy industry. *Food Engineering Reviews*, 15(2), 215–229. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09336-4>
- Andrewes P. (2022). Predicting the shelf-life of microbially-stabilised dairy products: What are the roles of stability studies, storage trials, accelerated trials, and dairy science? *International Dairy Journal*, 125, 105239. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105239>
- Antonelli J., Lindino C. A., Azevedo J. C. R. de, Souza S. N. M. de, Cremonez P. A., & Rossi E. (2016). Biogas production by the anaerobic digestion of whey. *Revista de Ciências Agrárias*, 39(3), 463–467. <https://doi.org/10.19084/RCA15087>

Д.С. Рыскин, В.К. Семипятный, Е.Е. Илларионова, Д.В. Климова, А.В. Косарева, К.Э. Ануфриев, А.Е. Рябова

- Arise A. K., Malomo S. A., Cynthia C. I., Aliyu N. A., & Arise R. O. (2022). Influence of processing methods on the antinutrients, morphology and in-vitro protein digestibility of jack bean. *Food Chemistry Advances*, 1, 100078. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100078>
- Cai Y., Liang X., Liao X., Ding Y., Sun J., & Li X. (2010). High-yield hypocrellin A production in solid-state fermentation by *Shiraia* sp. SUPER-H168. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 160(8), 2275–2286. <https://doi.org/10.1007/s12010-009-8728-3>
- Casallas-Ojeda M. et al., Perez-Esteban N., Cabeza I., Cobo M., Olaya-Rincon M., Caicedo-Concha D. M., & Astals S. (2024). Understanding the acidification risk of cheese whey anaerobic digestion under psychrophilic and mesophilic conditions. *Heliyon*, 10(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26476>
- Ergüder T. H., Tezel U., Güven E., & Demirel G. N. (2001). Anaerobic biotransformation and methane generation potential of cheese whey in batch and UASB reactors. *Waste Management*, 21(7), 643–650. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00114-8](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00114-8)
- Guzel-Seydim Z., Seydim A. C., Greene A. K. (2000). Organic acids and volatile flavor components evolved during refrigerated storage of kefir. *Journal of Dairy Science*, 83(2), 275–277. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)74874-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74874-0)
- Guzel-Seydim Z., Seydim A. C., & Greene A. K. (2011). *Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention*. FAO.
- Hassan A. N., Nelson B. K. (2012). Invited review: Anaerobic fermentation of dairy food wastewater. *Journal of Dairy Science*, 95(11), 6188–6203. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5732>
- Kalibekkyzy Z., Zhakupbekova S., Rebezov M., Nurgazezova A., Nurymkhan G., Kassymov S., Baytukenova S., Mateyeva A., Maizhanova A., & Kapshakbayeva Z. (2026). Valorization of dairy and plant by-products as functional ingredients in Kurt (Dried fermented milk product): Effects on nutritional, physicochemical, and sensory properties. *Foods*, 15(2), 369. <https://doi.org/10.3390/foods15020369>
- Kong X., Zhang B., Hua Y., Zhu Y., Li W., Wang D., & Hong J. (2019). Efficient L-lactic acid production from corncob residue using metabolically engineered thermo-tolerant yeast. *Bioresource Technology*, 273, 220–230. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.018>
- Krause A. J., Miracle R. E., Sanders T. H., Dean L. L., & Drake M. A. (2008). The effect of refrigerated and frozen storage on butter flavor and texture. *Journal of Dairy Science*, 91(2), 455–465. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0717>
- Kuczman O., Gueri M. V. D., De Souza S. N. M., Schirmer W. N., Alves H. J., Secco D., Buratto W. G., Ribeiro C. B., & Fernandes F. B. (2018). Food waste anaerobic digestion of a popular restaurant in Southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 196, 382–389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.282>
- Lu J., Langton M., Sampels S., & Pickova J. (2019). Lipolysis and oxidation in ultra-high temperature milk depend on sampling month, storage duration, and temperature. *Journal of Food Science*, 84(5), 1045–1053. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14514>
- Mao C., Feng Y., Wang X., & Ren G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540–555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
- Narisetty V., Adlakha N., Singh N. K. (2022). Integrated biorefineries for repurposing of food wastes into value-added products. *Bioresource Technology*, 363(127856). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127856>
- Nayik J.K., Ranade V. V. (2025). Valorisation of digestate: Characteristics, products, processes and potential. *Chemical Engineering Journal Advances*, (100887). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.100887>
- Prazeres J. R., Carvalho F., Rivas J. (2012). Cheese whey management: A review. *Journal of Environmental Management*, 110, 48–68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.018>
- Saini R. K., Prasad P., Shang X., & Keum Y. S. (2021). Advances in lipid extraction methods — A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(24), 13643. <https://doi.org/10.3390/ijms22413643>
- Udourioh G. A., Solomon M. M., Okolie J. (2025). A review of the valorization of dairy industry wastes through thermochemical, biological, and integrated processes for value-added products. *Food Science of Animal Resources*, 45(2), 375–408. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2025.e2>
- Wang X., Zhao Z. (2022). Acid-induced gelation of milk: Formation mechanism, gel characterization, and influence of different techniques. *Current Issues and Advances in the Dairy Industry*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.107893>

Д.С. Рыскин, В.К. Семипятный, Е.Е. Илларионова, Д.В. Климова, А.В. Косарева, К.Э. Ануфриев, А.Е. Рябова

- Wu Q., Ong L., Yao S., Kentish S. E., & Gras S. L. (2023). Effect of ultrafiltered milk on the rheological and microstructure properties of cream cheese acid gels. *Food and Bioprocess Technology*, 16(8), 1728–1745. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02991-1>
- Yao D., Sun L. C., Zhang L. J., Chen Y. L., Miao S., Cao M. J., & Lin D. (2024). Emulsion structural remodeling in milk and its gelling products: A review. *Gels*, 10(10), 671. <https://doi.org/10.3390/gels10100671>

REFERENCES

- Al-Jumaily A. M., Meshkinzar A., Torres L. M. P. (2023). On the development of emulsion destabilization technologies for dairy industry. *Food Engineering Reviews*, 15(2), 215–229. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09336-4>
- Andrewes P. (2022). Predicting the shelf-life of microbially-stabilised dairy products: What are the roles of stability studies, storage trials, accelerated trials, and dairy science? *International Dairy Journal*, 125, 105239. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105239>
- Antonelli J., Lindino C. A., Azevedo J. C. R. de, Souza S. N. M. de, Cremonez P. A., & Rossi E. (2016). Biogas production by the anaerobic digestion of whey. *Revista de Ciências Agrárias*, 39(3), 463–467. <https://doi.org/10.19084/RCA15087>
- Arise A. K., Malomo S. A., Cynthia C. I., Aliyu N. A., & Arise R. O. (2022). Influence of processing methods on the antinutrients, morphology and in-vitro protein digestibility of jack bean. *Food Chemistry Advances*, 1, 100078. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100078>
- Babaev, V. N., Gorokh, N. P., & Korinko, I. V. (2011). Energy potential of methane formation during mesophilic anaerobic decomposition of organic waste component. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(6(52)), 59–65. (In Russ.).
- Balabanova, M. Yu., Sklyadnev, E. V., & Panov, S. Yu. (2014). Mathematical modeling of chemical-thermal processing of cellulose-containing waste. *Chemical Industry*, 91(1), 11–14. (In Russ.).
- Cai Y., Liang X., Liao X., Ding Y., Sun J., & Li X. (2010). High-yield hypocrellin A production in solid-state fermentation by *Shiraia* sp. SUPER-H168. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 160(8), 2275–2286. <https://doi.org/10.1007/s12010-009-8728-3>
- Casallas-Ojeda M. et al., Perez-Esteban N., Cabeza I., Coboa M., Olaya-Rincon M., Caicedo-Concha D. M., & Astals S. (2024). Understanding the acidification risk of cheese whey anaerobic digestion under psychrophilic and mesophilic conditions. *Heliyon*, 10(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26476>
- Ergüder T. H., Tezel U., Güven E., & Demirel G. N. (2001). Anaerobic biotransformation and methane generation potential of cheese whey in batch and UASB reactors. *Waste Management*, 21(7), 643–650. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00114-8](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00114-8)
- Guzel-Seydim Z., Seydim A. C., Greene A. K. (2000). Organic acids and volatile flavor components evolved during refrigerated storage of kefir. *Journal of Dairy Science*, 83(2), 275–277. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)74874-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74874-0)
- Guzel-Seydim Z., Seydim A. C., & Greene A. K. (2011). *Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention*. FAO.
- Hassan A. N., Nelson B. K. (2012). Invited review: Anaerobic fermentation of dairy food wastewater. *Journal of Dairy Science*, 95(11), 6188–6203. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5732>
- Kalibekkyzy Z., Zhakupbekova S., Rebezov M., Nurgazezova A., Nurymkhan G., Kassymov S., Baytukenova S., Mateyeva A., Maizhanova A., & Kapshakbayeva Z. (2026). Valorization of dairy and plant by-products as functional ingredients in Kurt (Dried fermented milk product): Effects on nutritional, physicochemical, and sensory properties. *Foods*, 15(2), 369. <https://doi.org/10.3390/foods15020369>
- Kong X., Zhang B., Hua Y., Zhu Y., Li W., Wang D., & Hong J. (2019). Efficient L-lactic acid production from corn cob residue using metabolically engineered thermo-tolerant yeast. *Bioresource Technology*, 273, 220–230. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.018>
- Krause A. J., Miracle R. E., Sanders T. H., Dean L. L., & Drake M. A. (2008). The effect of refrigerated and frozen storage on butter flavor and texture. *Journal of Dairy Science*, 91(2), 455–465. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0717>
- Kuczman O., Guerri M. V. D., De Souza S. N. M., Schirmer W. N., Alves H. J., Secco D., Buratto W. G., Ribeiro C. B., & Hernandez F. B. (2018). Food waste anaerobic digestion of a popular restaurant in Southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 196, 382–389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.282>

Д.С. Рыскин, В.К. Семипятный, Е.Е. Илларионова, Д.В. Климова, А.В. Косарева, К.Э. Ануфриев, А.Е. Рябова

- Lu J., Langton M., Sampels S., & Pickova J. (2019). Lipolysis and oxidation in ultra-high temperature milk depend on sampling month, storage duration, and temperature. *Journal of Food Science*, 84(5), 1045–1053. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14514>
- Mao C., Feng Y., Wang X., & Ren G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540–555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
- Mikheeva, E. R., Katraeva, I. V., Vorozhtsov, D. L., Litti, Yu. V., & Nozhevnikova, A. N. (2020). Efficiency of two-phase anaerobic digestion and physicochemical properties of the organic fraction of municipal solid waste pretreated in a vortex layer apparatus. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 56(6), 619–626. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0555109920060112>
- Narisetty V., Adlakha N., Singh N. K. (2022). Integrated biorefineries for repurposing of food wastes into value-added products. *Bioresource Technology*, 363(127856). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127856>
- Nayik J.K., Ranade V. V. (2025). Valorisation of digestate: Characteristics, products, processes and potential. *Chemical Engineering Journal Advances*, (100887). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.100887>
- Panov, S. Yu., Chernetskaya, A. A., Zhuchkov, A. V., & Ryazanov, A. V. (2013). Development of scientific foundations of food waste utilization technology by anaerobic digestion. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*, 4(58), 200–204. (In Russ.).
- Prazeres J. R., Carvalho F., Rivas J. (2012). Cheese whey management: A review. *Journal of Environmental Management*, 110, 48–68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.018>
- Saini R. K., Prasad P., Shang X., & Keum Y. S. (2021). Advances in lipid extraction methods — A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(24), 13643. <https://doi.org/10.3390/ijms222413643>
- Tsavelkova, E. A., Egorova, M. A., Petrova, E. V., & Netrusov, A. I. (2012). Biogas production by microbial communities during decomposition of cellulose and food waste. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 48(4), 417. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0003683812040126>
- Udourioh G. A., Solomon M. M., Okolie J., et al. (2025). A review of the valorization of dairy industry wastes through thermochemical, biological, and integrated processes for value-added products. *Food Science of Animal Resources*, 45(2), 375–408. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2025.e2>
- Volkova, G. S. (2002). Study of fermentation processes of agricultural waste using acid-forming bacteria for producing lactic acid and its derivatives [Unpublished candidate dissertation]. All-Russian Research Institute of Food Biotechnology, Russian Academy of Agricultural Sciences. (In Russ.).
- Wang X., Zhao Z. (2022). Acid-induced gelation of milk: Formation mechanism, gel characterization, and influence of different techniques. *Current Issues and Advances in the Dairy Industry*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.107893>
- Wu Q., Ong L., Yao S., Kentish S. E., & Gras S. L. (2023). Effect of ultrafiltered milk on the rheological and microstructure properties of cream cheese acid gels. *Food and Bioprocess Technology*, 16(8), 1728–1745. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02991-1>
- Yao D., Sun L. C., Zhang L. J., Chen Y. L., Miao S., Cao M. J., & Lin D. (2024). Emulsion structural remodeling in milk and its gelling products: A review. *Gels*, 10(10), 671. <https://doi.org/10.3390/gels10100671>

ОБ АВТОРАХ

Рыскин Дмитрий Сергеевич, аспирант лаборатории пищевой метаинженерии, ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, Люсиновская ул., 35), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9567-7414>, ryskin.dmitry@gmail.com

Семипятный Владислав Константинович, доктор технических наук, заведующий лабораторией пищевой метаинженерии, ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, Люсиновская ул., 35), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1241-0026>, Researcher ID: M-1915-2017, Scopus ID: 56497188700, SPIN-код: 4246-3862, e-mail: v_semipyatnyi@vnimi.org

Илларионова Елена Евгеньевна, научный сотрудник лаборатории технологий молочных продуктов, ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, Люсиновская ул., 35), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9390-0984>, Researcher ID: G-7862-2019, Scopus ID: 57208421852, SPIN-код: 2990-2390, e-mail: e_illarionova@vnimi.org

Климова Дарья Владимировна, инженер-исследователь лаборатории пищевой метаинженерии, ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, Люсиновская ул., 35), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1628-7681>, SPIN-код: 7842-0885, e-mail: d_klimova@vnimi.org

Косарева Анастасия Валерьевна, инженер-исследователь лаборатории пищевой метаинженерии, ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, Люсиновская ул., 35), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0551-8058>, SPIN-код: 7431-9795, e-mail: a_kosareva@vnimi.org

Ануфриев Константин Эдуардович, младший научный сотрудник лаборатории пищевой метаинженерии, ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, Люсиновская ул., 35), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6632-8004>, SPIN-код: 2159-2015, e-mail: k_anufriev@vnimi.org

Рябова Анастасия Евгеньевна, доктор технических наук, заместитель директора по образованию, старший научный сотрудник лаборатории технологий биотрансформации и консервирования ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, ул. Люсиновская, д. 35, корп. 7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5712-2020>, ResearcherID: R-8359-2018, Scopus ID: 56496797800, SPIN-код: 8425-8422, e-mail: a_ryabova@vnimi.org

ABOUT THE AUTHORS

Ryskin Dmitry Sergeevich, Postgraduate Student, Laboratory of Food Systems Meta-Engineering, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, Lyusinovskaya street, 35), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9567-7414>, e-mail: ryskin.dmitry@gmail.com

Semipyatniy Vladislav Konstantinovich, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Food Systems Meta-Engineering, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, ul. Lyusinovskaya, 35, korp. 7). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1241-0026>, Researcher ID: M-1915-2017, Scopus ID: 56497188700, SPIN-код: 4246-3862, e-mail: v_semipyatniy@vnimi.org

Illarionova Elena Evgenyevna, Researcher, Laboratory of Dairy Product Technology, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, ul. Lyusinovskaya, 35, korp. 7). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9390-0984>, Researcher ID: G-7862-2019, Scopus ID: 57208421852, SPIN-код: 2990-2390, e-mail: e_illarionova@vnimi.org

Klimova Daria Vladimirovna, Research Engineer, Laboratory of Food Systems Meta-Engineering, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, ul. Lyusinovskaya, 35, korp. 7). ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1628-7681>, SPIN-код: 7842-0885, e-mail: d_klimova@vnimi.org

Kosareva Anastasia Valeryevna, Research Engineer, Laboratory of Food Systems Meta-Engineering, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, ul. Lyusinovskaya, 35, korp. 7). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0551-8058>, SPIN-код: 7431-9795, e-mail: a_kosareva@vnimi.org

Anufriev Konstantin Eduardovich, Junior Researcher, Laboratory of Food Systems Meta-Engineering, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, ul. Lyusinovskaya, 35, korp. 7). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6632-8004>, SPIN-код: 2159-2015, e-mail: k_anufriev@vnimi.org

Ryabova Anastasia Evgenievna, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director for Education, Senior Research Scientist, Laboratory of Dairy Product Technology, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, ul. Lyusinovskaya, 35, korp. 7). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5712-2020>, Researcher ID: R-8359-2018, Scopus ID: 56496797800, SPIN-code: 8425-8422, e-mail: a_ryabova@vnimi.org