

На правах рукописи

Рыскин Дмитрий Сергеевич

**СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЦИКЛИНГА
НЕРЕАЛИЗОВАННОЙ МОЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ**

4.3.3 – Пищевые системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном научном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности»

Научный руководитель: Семипятный Владислав Константинович
доктор технических наук

**Официальные
оппоненты:** Евдокимов Иван Алексеевич
доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий базовой кафедрой технологии молока и молочных продуктов, главный научный сотрудник НИЛ пищевой и промышленной биотехнологии ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»;

Логинова Ирина Вячеславовна
кандидат технических наук, руководитель отдела физико-химических и биохимических исследований ВНИИМС – филиала ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Защита состоится «4» июня 2026 г. в 14 часов 30 минут на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 24.1.515.01 при ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» по адресу 115093, г. Москва, ул. Люсиновская, д. 35, к.7, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности». Полный текст диссертации размещен в сети Интернет на официальном сайте ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» <http://www.vnimi.org>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Т.С. Бычкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Рост объемов нереализованной или просроченной пищевой продукции в торговых сетях и на этапах логистической цепи приводит к ежегодному образованию 17 млн. тонн пищевых отходов, что составляет порядка 30% от общего объема твердых коммунальных отходов. Согласно Федеральному закону от 24.06.1998 № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» приоритетной считается их предотвращение, повторное использование и утилизация, что делает разработку эффективных технологий рециклинга стратегически значимой. Наличие нормативно закрепленного вектора на внедрение технологий «замкнутого цикла» подтверждается и Стратегией развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года (распоряжение Правительства РФ от 25.01.2018 № 84-р), предусматривающей вовлечение пищевых отходов в хозяйственный оборот и создание высокотехнологичных мощностей по их переработке.

В контексте обеспечения продовольственной независимости страны Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации (Указ Президента РФ от 21.01.2020 № 20) подчеркивает необходимость сокращения потерь продовольствия и расширения сырьевой базы для производства безопасных пищевых ингредиентов. Одновременно Стратегия повышения качества пищевой продукции до 2030 года (распоряжение Правительства РФ от 29.06.2016 № 1364-р) включает внедрение инновационных технологий глубокой переработки сырья как одну из ключевых мер повышения конкурентоспособности отрасли.

Национальный проект «Экологическое благополучие» (Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309) формирует целевые показатели по снижению доли отходов, направляемых на захоронение, стимулирует создание цифровых систем управления потоками ресурсов, вовлекаемых во вторичный оборот. Реализация этих задач невозможна без интеллектуальных решений, интегрирующих методы машинного обучения для сортировки сложных потоков пищевых отходов, а также инновационных технологий рециклинга. В свою очередь, Указ Президента РФ от 01.12.2016 № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» относит развитие технологий переработки биологических отходов и цифровое моделирование логистических потоков пищевой продукции к приоритетным научно-технологическим направлениям.

Следовательно, данное исследование является актуальным с научной, технологической, экономической и нормативно-правовой точек зрения и отвечает приоритетам государственной политики Российской Федерации в области обращения с отходами, продовольственной безопасности и развития цифровых технологий.

Степень разработанности темы. Существенный вклад в развитие научных основ переработки пищевых отходов и разработки интеллектуальных систем для их рециклинга внесли как отечественные, так и зарубежные ученые: Батаева Р.А.,

Гусев А.А., Долгов А.В., Ефимов Д.С., Ильин И.В., Карпова Е.Н., Кузнецова И.П., Морозов В.И., Петров А.Н., Сидоров Д.П., Смирнов Н.В., Тихонов Е.И., Федоров Т.В., Хабаров В.Д., Шингисов А.У., Кобилова Г.И., Hill-Maini V., Barzee T., Cardoen D., Chiew Y.L., Ghosh S., Kiran E.U., Pleissner D., Rutten G., Stenmarck Å., Thyberg K.L., Urrutia C., Wong J.W.C. и другие.

Целью работы является разработка системы структурного рециклинга отходов молочных продуктов во вторичное сырье.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и последовательно реализованы следующие задачи:

1. Систематизировать научные знания в области рециклинга пищевых систем и провести мониторинг структуры и объемов нереализованной молочной продукции на перерабатывающих предприятиях.

2. Разработать критерии оценки рациональности и целесообразности рециклинга нереализованной молочной продукции с учетом ее физико-химических характеристик и остаточного срока годности.

3. Установить значимые факторы деградации молочных продуктов в процессе хранения и исследовать их влияние на физико-химические показатели качества рекондиционированной продукции.

4. Определить динамику деградации молочных продуктов с истекающим сроком годности и обосновать рациональные временные параметры рециклинга.

5. Разработать алгоритм и программное обеспечение для анализа и прогнозирования поступления нереализованной молочной продукции на перерабатывающее предприятие.

6. Разработать и апробировать в промышленных условиях технологическую схему переработки нереализованной молочной продукции, инвариантную относительно вариабельности входящего состава сырья.

Научная новизна работы:

- Сформирована многоуровневая система цифрового профилирования смесей молочных отходов с интегральным индексом приоритизации

- Разработан принципиально новый предиктивный подход к моделированию рециклинга непереработанной пищевой продукции, учитывающий децентрализованный логистический сбор и динамическое перераспределение потоков

- Установлены новые закономерности формирования качественных показателей субстанций повторного использования в процессе хранения

- Выявлены дополнительные биомаркеры маршрутизации переработки, позволяющие экономически эффективно дифференцировать поступающие субстраты между технологическими цепочками

Теоретическая и практическая значимость работы:

- Разработаны практические рекомендации по рекондации дифференцированных молочных отходов для целей извлечения полезных макронутриентов, расширения кормовой базы и выработки биотоплива

- Полученные в ходе исследования данные внесены в ПНСТ 870-2023 «Искусственный интеллект в переработке сельскохозяйственной продукции и

производстве пищевой продукции. Варианты использования для автоматизации управления процессами» в части использования ИИ для оптимизации процессов утилизации и переработки отходов.

- Разработан и внедрен на трех предприятиях молочной промышленности цифровой СТО 0023498–022–2025 «Технологическая схема утилизации варьiruемой по составу молочной продукции с предельным сроком годности»

Методология и методы исследования. Исследования проведены на базе ФГАНУ «ВНИМИ» в рамках выполнения государственного задания № 075-03-2022-573 за 2022 г. и № 075-03-2023-484 за 2023 г. по теме «Развитие научных принципов глубокой переработки и обеспечения длительного хранения молочного сырья и продукции с применением малоотходных ресурсосберегающих технологий» (шифр FNSS-2022-0005). В процессе проведения экспериментов использованы стандартизованные и оригинальные методы исследований физико-химических показателей смесей молочной продукции с предельным сроком годности.

Положения, выносимые на защиту:

- Подход к ранжированию нереализованной молочной продукции, основанный на каскадном принципе «признак – критерий – желательность» с расчетом интегрального индекса уровня целесообразности переработки

- Закономерности трансформации жирнокислотного состава смешанных молочных систем в хранении и критические точки биомаркеров маршрутизации рециклинга

- Научно и экономически обоснованная инвариантная технологическая схема сегментации поступающей на переработку молочной продукции с предельным сроком годности, интегрированная в облачное программное обеспечение для использования в АСУ ТП.

Степень достоверности и апробация результатов. Планирование исследования осуществлялось с применением комплексного научно-методологического подхода, включавшего формулирование и подробное описание задач, гипотез и разработку структурированного плана экспериментов. В работе использована современная материально-техническая база с привлечением стандартизованных методов, а также методик, адаптированных под конкретные задачи исследования, что обеспечило высокую точность и воспроизводимость данных. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена трехкратной повторностью каждого опыта с последующей статистической обработкой в программных пакетах. Корректность выводов подтверждалась применением дисперсионного анализа (ANOVA и PERMANOVA) с уровнем значимости 0,05 и пост-хок тестом Тьюки.

Основные результаты работы доложены и получили одобрение на конференциях, конкурсах и семинарах различного уровня, включая международный форум «Антиконтрафакт», агропромышленную выставку «Золотая осень» и международную научно-практическую конференцию «Окружающая среда, устойчивость природных экосистем и проблемы экологической инженерии».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 4 печатных работы, в том числе 3 статьи в журналах входящих в перечень ВАК

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, аналитического обзора, методической части, результатов собственных исследований и их анализа (3 главы), а также основных выводов, списка использованных источников литературы и приложений. Основной текст работы изложен на 129 стр. Диссертация содержит 18 таблиц, 13 рисунков и 2 приложения. Список литературы включает 156 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведенного исследования, сформулированы цель и задачи, показана научная новизна и практическая значимость работы, представлены результаты апробации и публикаций, а также приведены данные по структуре и объему диссертационной работы.

В главе 1 проведен анализ мирового опыта работы с пищевыми отходами, позволивший выявить иерархические подходы к их утилизации и оценить пост-потребительские свойства переработанной пищевой продукции. Рассмотрены современные подходы валоризации нереализованной пищевой продукции, в частности пути повышения ценности анаэробного дигестата, а также способы использования отходов как сырья для производства энергоносителей и материалов с высокой добавленной стоимостью. Обобщен практический опыт реализации рециклинговых технологий, включая индустриальное производство биоудобрений и внедрение интеллектуальных систем, обеспечивающих эффективность замкнутой экономики в процессах получения биогаза, биологического водорода и технических нутриентов.

В главе 2 изложена структура, организация и схема проведения исследований (рис.1). На различных этапах работы объектами исследований являлись: сливки (ГОСТ 31451–2013), сметана (ГОСТ 31452–2012), кефир (ГОСТ 31454–2012) и их бинарные смеси (50/50 в массовом соотношении) и опытно-промышленные образцы продукции. Все применяемые в ходе работ компоненты и вещества соответствовали требованиям действующей нормативно-технической документации и имели соответствующие сертификаты. При выполнении работы использовали стандартизованные и общепринятые в химико-технологическом и микробиологическом контроле молочных продуктов методы исследований. Измеряли условную вязкость (вискозиметр ВЗ-246, $d = 4$ мм); активную кислотность (рН-метр) и титруемую кислотность (ГОСТ 30305.3-95); массовую долю лактозы (поляриметр, ГОСТ Р 54667-2011); показатель «активность воды» (A_w) – сорбционно-емкостным методом на приборе «Hygrolab-3» (МВИ № 241.224/2008). Перекисное число определяли йодометрическим методом по ГОСТ 31757–2012. Кислотное число — титриметрически по ГОСТ 54760–2011. Результаты выражали, соответственно, в мэкв O_2 /кг жира и мг КОН/г. Для эмульсионных образцов жировую фазу предварительно отделяли центрифугированием. Повторность измерений – трехкратная; статистическую

обработку выполняли методом однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA, $\alpha = 0,05$) с пост-хок-тестом Тьюки. Статистическая обработка и визуализация экспериментальных данных проводилась с применением методов матричной алгебры, разработка программного обеспечения велась в среде Wolfram Mathematica, визуализация данных проводилась в среде ObservableHQ и с использованием языка Python 3.11

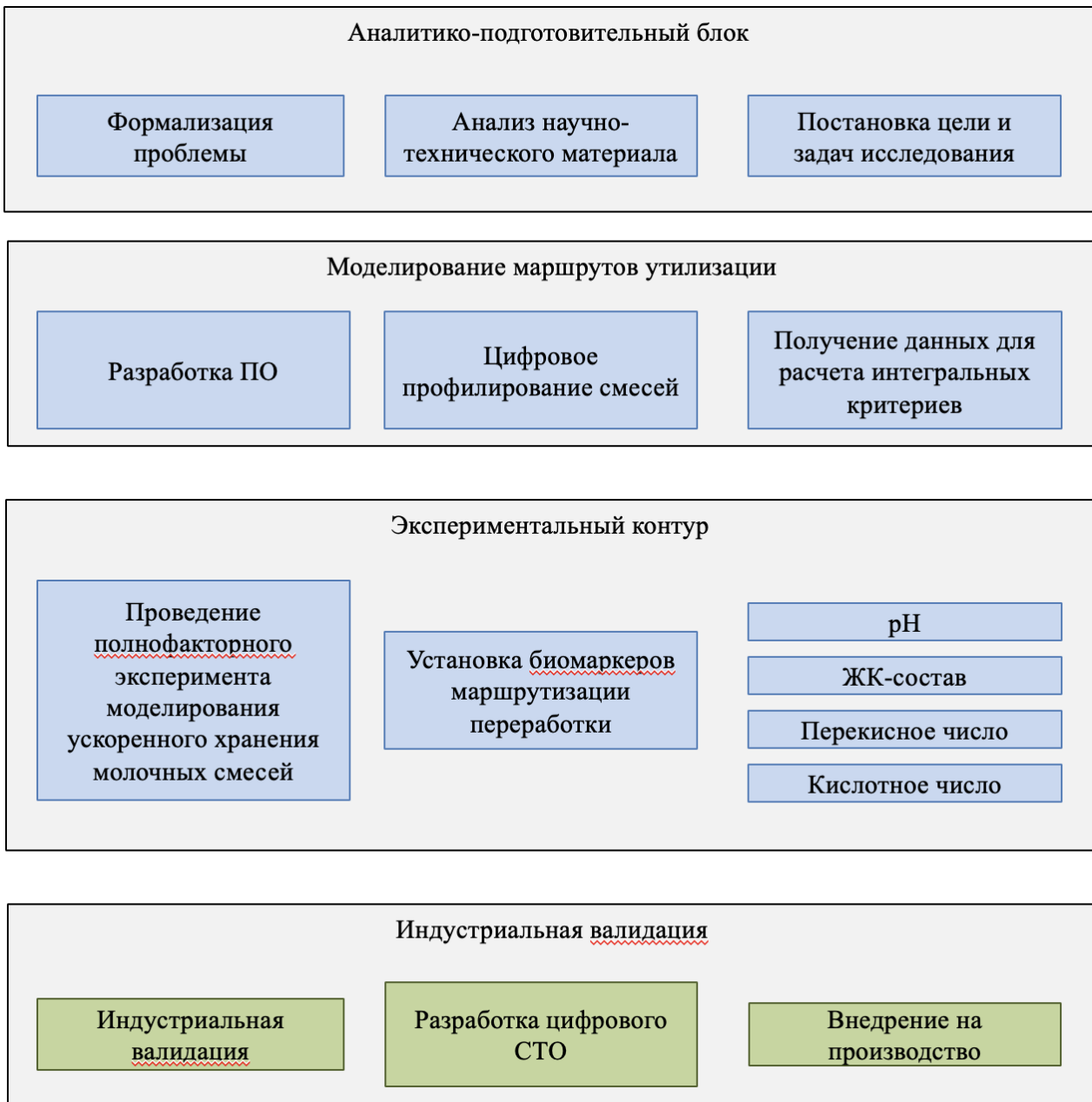


Рисунок 1. Общая схема исследований

В главе 3 представлены теоретические и методические основания выбора математического аппарата, используемого для структурного моделирования процессов рециклинга переработанной пищевой продукции. Также раскрыты основные концептуальные элементы модели, ее возможности, области применения и ограничения.

Ввиду ограниченности ресурсно-временной базы для реализации всех мер по экологизации пищевых производств, требовалось создать иерархическую критериальную базу выбора приоритетных направлений для переработки. Для этого, была разработана модель оценки целесообразности переработки молочной продукции с остаточным сроком годности, основанная на каскадном принципе «признак – критерий – желательность». Выделены три основных признака:

- Экономическая целесообразность (**S**) – оценивает эффективность инвестиций в переработку отходов, учитывая потенциальную прибыль, экономию на затратах по утилизации и операционные расходы переработки;
- Технологическая оснащенность (**T**) – характеризует степень технической готовности предприятия к реализации переработки, наличие автоматизированных линий, уровень технологической готовности специальных технологий (например, сушки или биоконверсии);
- Экологическое воздействие (**E**) – отражает степень снижения негативного влияния на окружающую среду, включая сокращение эмиссий загрязняющих веществ и парниковых газов.

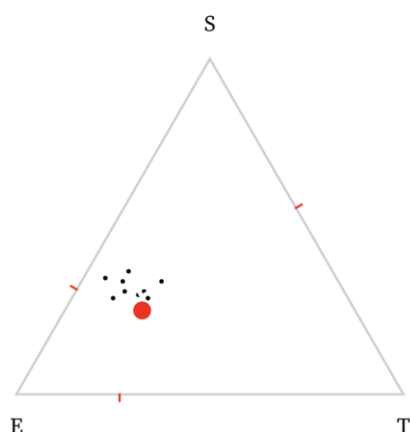


Рисунок 2. Определение весовых коэффициентов признаков целесообразности утилизации. Черным отмечены веса, присвоенные экспертами

Весовые коэффициенты признаков были определены с помощью опроса экспертов, (18 специалистов в области переработки молока и устойчивого агропромышленного развития) методом парных сравнений Саати (отношение согласованности 0.057 – высокий уровень):

- Экономическая целесообразность – 0,25;
- Технологическая оснащенность – 0,20;
- Экологическое воздействие – 0,55.

Выбор этих весов (см. рис. 2) подчеркивает направленность тренда соответствия молочной отрасли ЦУР 12 – переход к устойчивым моделям потребления и производства.

Следующим этапом являлась установка критериев желательности, соотнесенных с признаками. Было выделено 7 критериев (представлены в табл. 1) и определены их значения, соответствующие основным переходным точкам (0,37, 0,63, 0,8, 0,99) функции Харрингтона:

$$d(x) = e^{\{e^{-a(x-b)}\}} \quad x \in \mathbb{R} \quad (1)$$

Для оценки объемов нереализованной молочной продукции (критерий 3) и рынка сбыта переработанной продукции (критерий 5) был проведен опрос среди 12 ведущих торговых сетей, покрывающих все 8 федеральных округов РФ. Данные опроса представлены в таблице 2.

Таблица 1. Критерии желательности при определении целесообразности переработки пищевой продукции

№	Критерий	S	T	E	Базовые показатели желательности	Вес критерия
1	Наличие экспертного мнения	+	+	+	67% — 0.8; 50% — 0.37	0,1
2	Количество способов утилизации		+		5 — 0.8; 2 — 0.37	0,1
3	Объемы нереализованной продукции	+		+	1000 млн. руб. — 0.8; 100 млн. руб. — 0.37	0,15
4	Текущие способы утилизации		+	+	5 — 0.99; 2 — 0.63	0,1
5	Рынок сбыта переработанной продукции	+			1000 млн. руб. — 0.99; 100 млн. руб. — 0.63	0,2
6	Инвестиции в перерабатывающую инфраструктуру	+	+		1000 млн. руб. — 0.8; 10 000 млн. руб. — 0.37	0,15
7	Текущий экологический ущерб			+	8 баллов — 0.8; 3 балла — 0.37	0,2

Таблица 2. Данные опроса торговых сетей по списанию молочной продукции

Категория	Количество на реализацию, т	Количество списания, т	% списания
Молоко	412,3 ± 487,8*	5,19 ± 1,97	3,23 ± 3,34
Сливки	12,48 ± 15,96	0,23 ± 0,22	3,75 ± 3,04
Молочные консервы	8,06 ± 10,91	0,11 ± 0,13	3,08 ± 2,57
Мороженое	17,79 ± 22,77	0,09 ± 0,08	1,21 ± 1,12
Сыры	57,36 ± 71,81	1,01 ± 0,62	5,02 ± 5,20
Творог и творожные продукты	54,68 ± 47,61	1,34 ± 0,04	3,99 ± 3,55
Ацидофилин	0,68 ± 0,27	0,05 ± 0,03	7,41 ± 1,27
Йогурт	49,89 ± 40,30	1,96 ± 0,04	5,88 ± 4,84
Кефир	57,73 ± 63,44	1,76 ± 0,86	5,61 ± 4,66
Ряженка	10,80 ± 9,62	0,26 ± 0,07	4,39 ± 4,53
Сметана	59,70 ± 66,08	1,06 ± 1,13	1,88 ± 0,18

*a±s, где a – среднее, s – среднеквадратичное отклонение

Была получена формула для интегрального показателя для определения целесообразности переработки молочного продукта в виде консолидированной оценки, выраженной суммой взвешенных геометрических средних функций желательности отдельных критериев:

$$D_p = S \left(\prod_{j \in \{1,3,5,6\}} d_j(x_j)^{w_{sj}} \right)^{\frac{1}{\sum_{k \in \{1,3,5,6\}} w_{sk}}} + T \left(\prod_{j \in \{1,2,4,6\}} d_j(x_j)^{w_{sj}} \right)^{\frac{1}{\sum_{k \in \{1,2,4,6\}} w_{sk}}} + E \left(\prod_{j \in \{1,3,4,7\}} d_j(x_j)^{w_{sj}} \right)^{\frac{1}{\sum_{k \in \{1,3,4,7\}} w_{sk}}} \quad (2)$$

Где $d_i(x)$ – значение функции желательности для i -го критерия, x – абсолютное значение критерия, w_{Xl} – вес критерия l в интегральном показателе желательности для признака X (см. табл. 1).

Методология расчета была реализована в виде облачного программного обеспечения (ссылку см. рис. 3, интерфейс см. рис. 4). В программе полностью реализован принцип «признак – критерий – желательность», который позволяет универсально для пищевой промышленности проводить комплексный анализ и принимать взвешенные решения, направленные на оптимизацию использования ресурсов и минимизацию экологических рисков при переработке пищевой продукции с истекающим сроком годности, при наличии уточняющих данных по потерям в конкретной пищевой отрасли.

В качестве примера можно привести расчетные данные по кефиру (см. рис. 4). Проведенный опрос показал, что 18 из 25 опрошенных технологов и экологов считают переработку кефира экономически и экологически оправданной (уровень согласованности 72%); в обзоре ФАО приведено 5 перспективных методов утилизации (кормовые добавки, производство биогаза, распылительная сушка, выделение лактата/протеина/жировой фазы, компостирование); текущие способы утилизации – преимущественно слив и корм скоту; при общем объеме потребления кефира в 971 тыс. тонн, общий объем нереализованного кефира, при консервативной оценке пригодности для рециклинга, составляет порядка 700 млн. руб. из которого можно обеспечить 350 млн. руб. объема рынка вторичных ресурсов; инвестиционные вложения в типовую линию производства, включающую сепаратор, сушилку и биореакторы составляет порядка 1,1 млрд. руб.; при этом как дилатные стоки, так и просроченная кефирная продукция характеризуются высоким показателем биохимического потребления кислорода (более 3000 мг/л), что составляет серьезную экологическую угрозу кислородного истощения водоемов, что позволяет оценить текущий экологический ущерб от кефира с истекшим сроком годности в 8 баллов.



Рисунок 3. QR-код ссылки на ПО для определения целесообразности переработки молочной продукции с остаточным сроком годности



Интегральный уровень желательности: 0.69

Рисунок 4. Расчет интегрального уровня целесообразности переработки кефира. Уровень 0.69 соответствует показателю «переработка целесообразна».

С помощью реализованного программного обеспечения был последовательно произведен анализ текущего перечня потенциально перерабатываемой молочной продукции (см. табл. 3). При текущем уровне развития технологий только три продукта (сливки, сметана, кефир) имеют адекватный уровень перспективности переработки (больше 0.5). Показательно, что самый распространенный молочный продукт – молоко – имеет низкую целесообразность, так как относительно других продуктов имеет гораздо более низкую относительную долю списания у ритейлеров (см. показатели опроса, табл. 2) и выбрасывания в связи с истечением срока годности в домохозяйствах, а также сниженное относительное экологическое влияние, что подтверждает адекватность выбранных коэффициентов модели. Модель также дает направления исследований для повышения интегрального уровня для других молочных продуктов.

Таблица 3. Интегральный уровень целесообразности переработки отдельных видов молочных продуктов

№	Продукт	Интегральный уровень целесообразности переработки
1	Сливки	0,72
2	Сметана	0,70
3	Кефир	0,69
4	Йогурт	0,48
5	Простокваша	0,45
6	Ряженка	0,43
7	Ацидофилин	0,41
8	Биолакт	0,40
9	Варенец	0,39
10	Молоко	0,38
11	Молоко сухое	0,36
12	Молочные консервы	0,34
13	Творог и творожные продукты	0,33
14	Мороженое	0,30
15	Сыры	0,28
16	Сливочное масло	0,26

В главе 4 для получения зависимостей критических биомаркеров порчи, которые закладываются в интеллектуальную систему сортировки переработанной молочной продукции, был осуществлен дизайн и проведен эксперимент по исследованию влияния структуры пищевых отходов и факторов хранения на физико-химические показатели рекондicionированной пищевой продукции.

Для имитации ускоренных процессов порчи смешанных молочных систем, состоящих из целесообразных для переработки продуктов (сливки, сметана, кефир со сроками годности 90-120% от рекомендованных производителем и их бинарные смеси 50/50, в соответствии с планом полнофакторного эксперимента) были сформированы шесть модельных композиций с исходной массовой долей жира 2,5–15 %. Каждый образец (масса ≈ 150 г) при необходимости смешивали при (4 ± 2) °C 30 с мешалкой Primo WG-2001, герметично закупоривали в стерильные пластиковые контейнеры и термостатировали при (32 ± 1) °C в течение 144 ч (см. рис. 5). Контрольные точки отбора составляли 0, 72 и 144 ч хранения, что позволило проследить кинетику деградации на начальном, среднем и завершающем этапах ускоренного испытания. Данные по физико-химическим показателям эксперимента представлены в таблице (4).



Рисунок 5. Внешний вид образцов смешанных молочных продуктов до (а) и (б) после ускоренного хранения

В качестве кинетической модели ускоренной деградации для расчета эквивалентного срока хранения при холодильной температуре в условиях промежуточного хранения продукции с предельным сроком годности на складах логистической цепочки утилизации принята классическая модель Аррениуса:

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

$$\frac{k_{32}}{k_5} = \exp\left(-\frac{E_a}{R} \times \left(\frac{1}{T_{32}} - \frac{1}{T_5}\right)\right) \quad (3)$$

где k_{32}, k_5 – модели Аррениуса для температур 32 °C и 5 °C, соответственно; E_a – энергия активации, принятая равной 66,7 Дж·моль⁻¹ (как верхней границы диапазона активации процессов, лимитирующих качество питьевого и ферментированного молока, и характерного для липидного окисления цельных молочных систем); $T_{32} = 305,15$ К, $T_5 = 278,15$ К.

Таблица 4. Физико-химические показатели образцов в динамике ускоренного хранения (Сл – сливки, См – сметана, К – Кефир)

Образец	Время хранения, ч	Условная вязкость, с	pH	Титруемая кислотность, °Т	Массовая доля лактозы, %
Сл	0	6.08 ± 0.91 ^a	6.50 ± 0.97 ^a	16 ± 2.40 ^a	4.49 ± 0.67 ^a
	72	560.00 ± 84.00 ^b	4.11 ± 0.62 ^b	96 ± 14.40 ^b	3.80 ± 0.57 ^b
	144	790.00 ± 118.50 ^b	3.60 ± 0.54 ^c	136 ± 20.40 ^c	3.45 ± 0.52 ^b
См	0	Высокая	4.39 ± 0.66 ^a	78 ± 11.70 ^a	4.08 ± 0.61 ^a
	72	Высокая	4.18 ± 0.63 ^{ab}	85 ± 12.75 ^{ab}	3.86 ± 0.58 ^{ab}
	144	Гелеобразование	4.07 ± 0.61 ^b	89 ± 13.35 ^b	3.75 ± 0.56 ^b
К	0	47.00 ± 7.05 ^a	4.20 ± 0.63 ^a	96 ± 14.40 ^a	н/д
	72	39.00 ± 5.85 ^{ab}	4.06 ± 0.61 ^a	131 ± 19.65 ^b	н/д
	144	35.00 ± 5.25 ^b	3.99 ± 0.60 ^a	149 ± 22.35 ^b	н/д
СлСм	0	8.34 ± 1.25	5.28 ± 0.79 ^a	50 ± 7.50 ^a	3.91 ± 0.59 ^a
	72	Высокая	4.35 ± 0.65 ^b	74 ± 11.10 ^{ab}	3.81 ± 0.57 ^a
	144	Гелеобразование	3.88 ± 0.58 ^c	86 ± 12.90 ^b	3.76 ± 0.56 ^a
СлК	0	7.12 ± 1.07 ^a	5.27 ± 0.79 ^a	55 ± 8.25 ^a	5.05 ± 0.76 ^a
	72	68.00 ± 10.20 ^b	3.85 ± 0.58 ^b	150 ± 22.50 ^b	3.99 ± 0.60 ^b
	144	96.00 ± 14.40 ^c	3.50 ± 0.53 ^b	198 ± 29.70 ^b	3.46 ± 0.52 ^b
СмК	0	290.00 ± 43.50 ^a	4.30 ± 0.64 ^a	94 ± 14.10 ^a	4.41 ± 0.66 ^a
	72	210.00 ± 31.50 ^b	3.91 ± 0.59 ^b	138 ± 20.70 ^b	3.34 ± 0.50 ^b
	144	213.00 ± 25.50 ^b	3.71 ± 0.56 ^b	160 ± 24.00 ^b	2.80 ± 0.42 ^c

Для линейного накопления дефектов степень деградации пропорциональна $k(T)$, поэтому:

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

Следовательно, полнофакторный эксперимент экстраполирует результаты на двухмесячный срок хранения молочных продуктов с истекшим сроком годности. При переносе модели на промышленную оценку интервалов утилизации, в программе введен коэффициент запаса 1,2 с учетом вариабельности сырья и логистических колебаний температуры.

В результате эксперимента по ускоренному хранению смесей молочной продукции с предельным сроком годности установлено, что наиболее подвержены деградации системы с высокой лактозой и невысокой исходной кислотностью (сливки, сливки + кефир, см. табл. 4). За 144 ч титруемая кислотность сливок возросла с 16°Т до 136°Т (рост в 8,5 раз, $p < 0,05$), pH снизился на 2,9 единицы, а условная вязкость выросла более чем в 100 раз (6,08 с до 790 с) Резкое сгущение подтверждает высокую склонность сливок к коагуляции и ограничивает их перерабатываемость. Смешивание сливок со сброженными компонентами также резко ускоряет коагуляцию, повышая энергетические затраты на механическую сепарацию. Напротив, стабильность коллоидной системы сметаны объясняет ее более длительную сохраняемость и допускает расширенный временной интервал утилизации.

С учетом полученных кинетических данных продукты классифицированы по двум управляющим параметрам: скорость накопления кислотности и

изменение реологических свойств. В рамках интеллектуальной системы сортировки эти показатели были использованы как входные переменные для алгоритмов принятия решений о направлении переработки (жироотделение, ферментативный гидролиз, кормовое применение).

Для оценки возможности извлечения жировой фазы и ее последующего применения, были исследован жирнокислотный состав образцов, а также кислотное (AV) и перекисное (PV) числа. Все продукты лежат в зоне $a_w > 0.97$ и относятся к высоко-влажным, следовательно, гидролитическое прогоркание идет сразу после нарушения цепи холода.

В процессе эксперимента установлено, что при ускоренном хранении образцов при 32 °C PV возрастает с 0,7–0,9 до 5,1–6,6 мэкв O₂/кг, а AV — с 0,6–0,8 до 1,7–2,2 мг КОН/г для молочных смесей в течение 144 ч. Эксперимент моделировал закрытую тару для избежания катализации фотоиндуцированного прогоркания посредством фотоинициации медь-хлорофиллового комплекса.

В соответствии с планом полнофакторного эксперимента по исследованию влияния длительного хранения и компонентного состава на динамику изменений жировой фазы в модельных молочных смесях, были построены регрессионные уравнения:

$$\begin{aligned} PV(x, y, t) &= 0.71 + 0.052t + 0.34x - 0.008tx - 0.4x^2 + 0.18y \\ &\quad - 0.006ty + 1.2xy \\ AV(x, y, t) &= 0.54 + 0.012t - 0.2x + 0.4x^2 + 0.28y - 0.001ty \\ &\quad + 0.4xy + 0.2y^2 \end{aligned} \quad (5)$$

где PV() – перекисное число, мэкв/кг; AV() – кислотное число, x – массовая доля сметаны в смеси, y – массовая доля кефира, t – время, ч (для ускоренной модели, для хранения в холодильных условиях требуется коррекция по модели Аррениуса (4)). Массовая доля сливок задана как зависимый параметр (1 – x – y). Адекватность моделей подтверждена анализом статистических критериев качества аппроксимации (R^2 – коэффициент детерминации – 0.898 для PV, 0.905 для AV; MAE – средняя абсолютная ошибка – 0.07 для PV, 0.02 для AV). Поверхности отклика уравнений (5) представлены на рис. 6.

Согласно ГОСТ 31757-2012 и ГОСТ 54760-2011 предельные значения для пищевых жиров составляют PV < 5 мэкв O₂/кг и AV < 2,5 мг КОН/г. Модель указывает, что критический переход за пределы кормовой пригодности наступает уже после 72 ч при 32 °C, точные временные значения заложены в интеллектуальную сортировочную модель согласно уравнениям (5). В ГОСТ 1045-73 для технического жира первого сорта допускается AV < 10 мг КОН/г (PV не нормируется), для второго сорта — AV < 25 мг КОН/г, следовательно, исследованные молочные смеси во всем указанном временном диапазоне соответствуют первому сорту.

Для уточнения критических точек утилизации был дополнительно исследован профиль органических кислот молочных смесей в динамике хранения (см. табл. 5). Баланс органических кислот напрямую связан с отношением ХПК/БПК, следовательно, влияет на модель совокупной оценки жизненного цикла воздействия на окружающую среду.

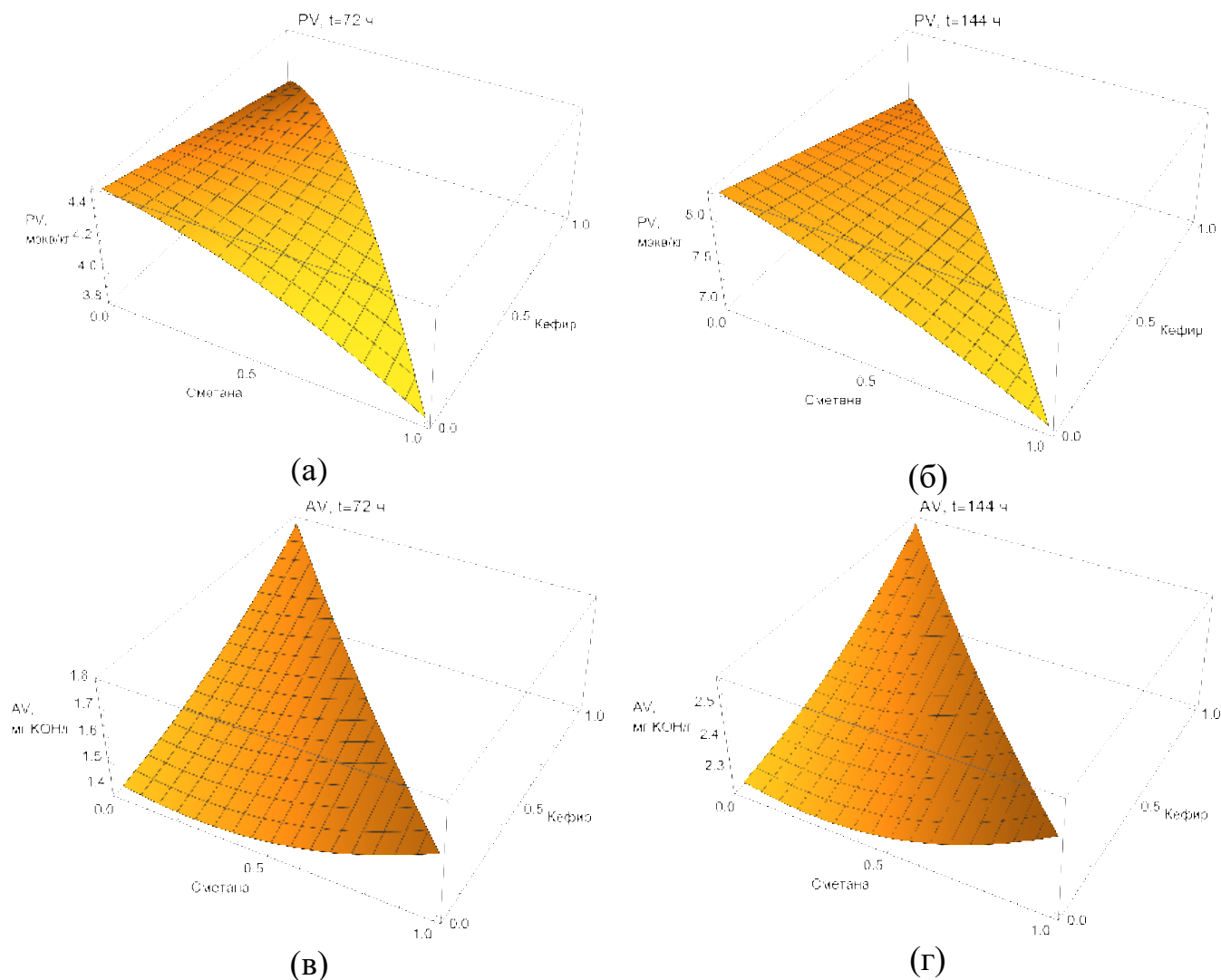


Рисунок 6. Поверхности отклика модели прогнозирования изменения перекисного числа (PV) и кислотного числа (AV) в зависимости от состава смеси и времени хранения: (а) PV через 72ч, (б) PV через 144ч, (в) AV через 72ч, (г) AV через 144ч. Сметана и кефир указаны в долях, остаточная доля приходится на сливки.

Таблица 5. Органические кислоты смесей молочных продуктов в хранении

Кислота (мг/л)	Молочная		Лимонная		Муравьиная		Янтарная	Уксусная
	0ч	72ч	0ч	72ч	0ч	72ч	72ч	72ч
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

Высокая концентрация молочной кислоты и остаточной лактозы для большинства комбинаций молочных смесей позволяет экономически эффективно ферментировать молочный субстрат с получением технической молочной кислоты. Вместе с тем, неконтролируемое брожение и спонтанное кислотонакопление приводят к формированию рацемической (DL) смеси молочной кислоты вместо востребованного оптически чистого L-лактата. В таких условиях технологически целесообразным решением является предварительное отделение технической DL-смеси от белково-жировой матрицы, что позволяет сохранить возможность последующей рекристаллизации с целью получения оптически чистого L-лактата. После анализа профиля органических кислот введен дополнительный биомаркер – содержание ЛЖК > 1000 мг/л (см. табл. 5, только кефир находился в данной стадии ацидогенеза), что повышает рацемизацию и влечет за собой использование экономически нецелесообразных методов фракционирования – такой субстрат после жиरोотделения направляется на анаэробное сбраживание.

При оценке жирнокислотного профиля образцов (см. рис. 226 установлено, что в сметане и ее смесях содержание каприловой (C8:0) и каприновой (C10:0) кислот возрастает к 72 ч, после чего статистически не изменяется, что указывает на умеренную липолитическую активность. Во всех образцах к 144 ч выявлены достоверные ($p < 0,05$) приросты пальмитиновой (C16:0) и пальмитолеиновой (C16:1 cis-9) кислот (+4%), что интерпретируется как частичная деградация длинноцепочечных триглицеридов с относительным накоплением среднецепочечных и отдельных мононенасыщенных фракций.

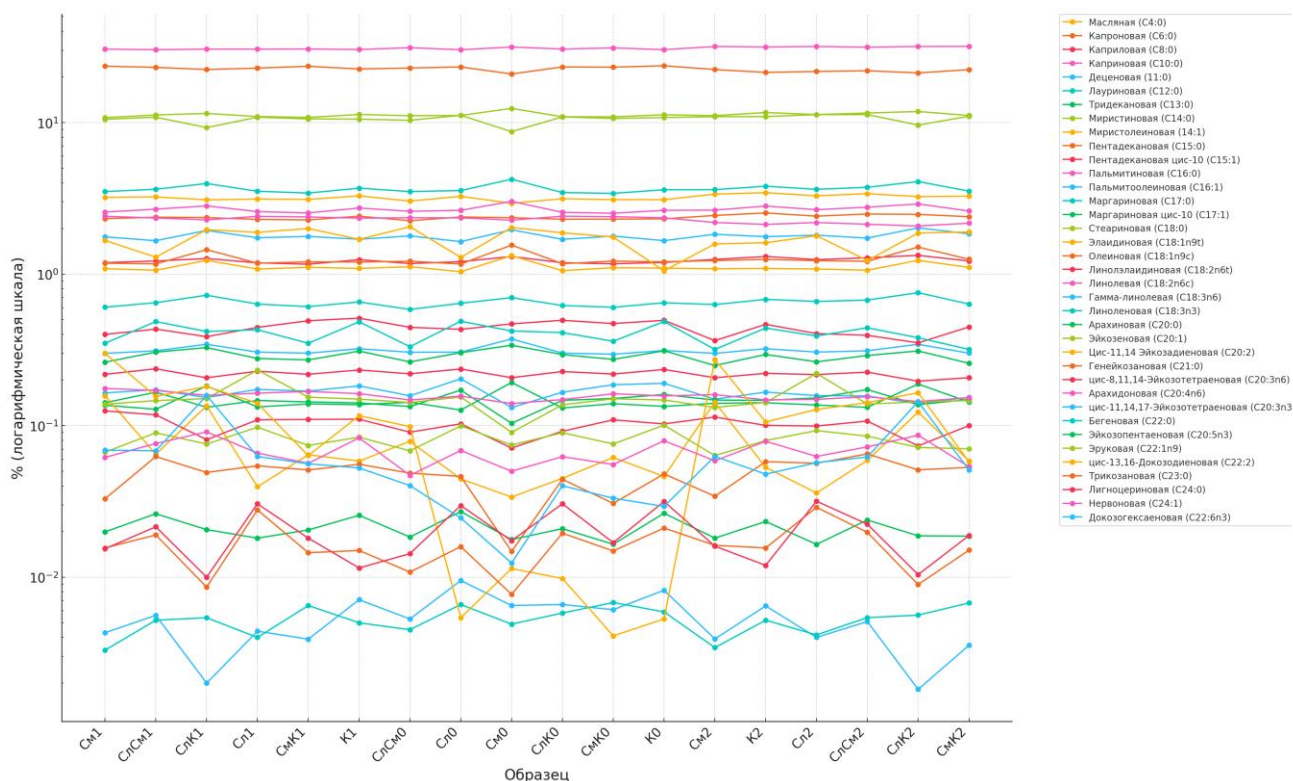


Рисунок 7. Динамика жирнокислотного состава образцов в хранении (обозначения: 0 – контроль, 1 – 72 ч хранения, 2 – 144 ч хранения)

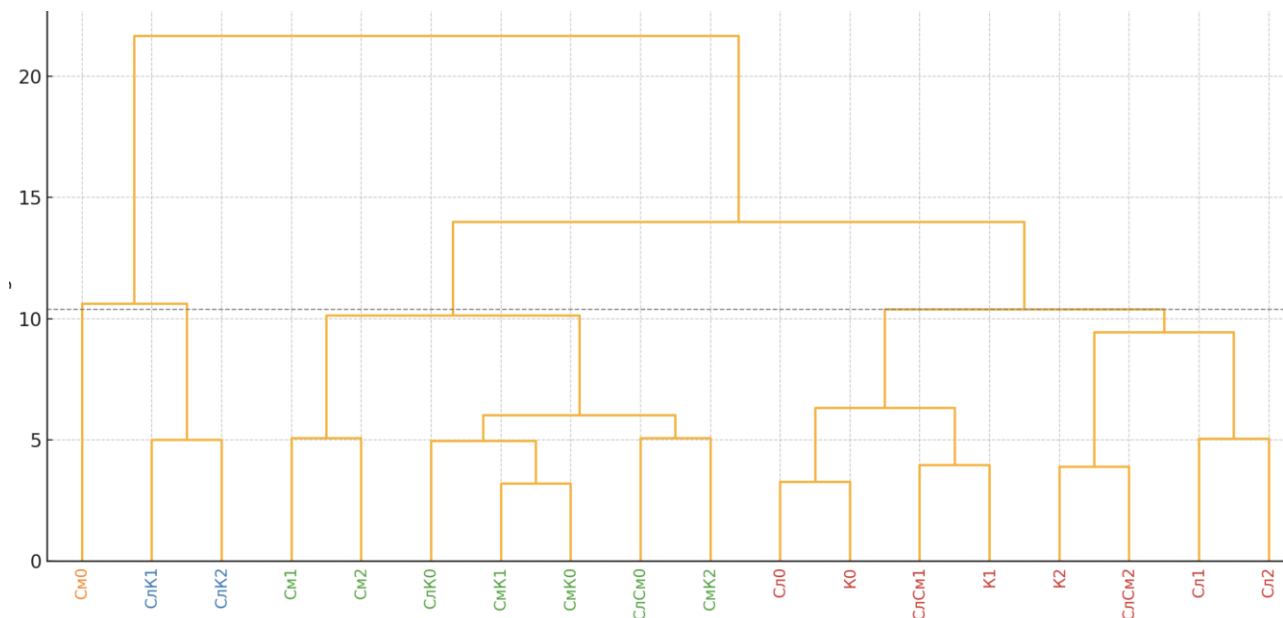


Рисунок 8. Кластерный иерархический анализ образцов смесей молочной продукции в хранении

Относительное содержание пальмитолеиновой кислоты (C16:1 cis-9) статистически увеличилось во всех вариантах, хотя суммарная доля МНЖК снизилась из-за уменьшения олеиновой кислоты (C18:1 cis-9). Маркерное соотношение C18:1 cis-9/C16:0 уменьшилось с $0,75 \pm 0,02$ до $0,69 \pm 0,02$, оставаясь в диапазоне, характерном для молочного жира. По удельным долям НЖК/МНЖК/ПНЖК зафиксировано увеличение НЖК, небольшое снижение МНЖК и более выраженное снижение ПНЖК для большинства образцов, что отражает начальные окислительные изменения полиненасыщенных фракций. Рост НЖК и появление свободных короткоцепочечных кислот повышают плотность и уменьшают вязкость плазмы, что облегчает отделение жира в сепараторе.

Далее была произведена кластеризация образцов с построением иерархической дендрограммы по методу Уорда с использованием евклидовой метрики после Z-нормализации жирнокислотного состава (см. рис. 8). Было выделено 4 отдельных класса, при этом, матрица исходного сырья отвечала за 35% объясненной дисперсии, время хранения за 28% (отношение межгрупповой суммы квадратов ошибок к общей).

Для всех пищевых матриц отличим подкластер 144 ч, но он остается ближе к своему исходному продукту, чем к другим матрицам. При этом липолиз и накопление МНЖК (C16:1, C18:1) смещают образцы вверх по дендрограмме, не разрушая «видовой» кластер. Сметана и сметаносодержащие смеси устойчиво формируют отдельную ветвь, при этом кефир остается наиболее дистанцированным по жирнокислотному составу, требуя отдельного рассмотрения при построении сценариев технологического рециклинга.

Для унификации входного сырья для последующей переработки результаты кластеризации занесены в программу сортировки, так как смешивание в рамках одного кластера позволяет осуществлять достоверное прогнозирование структурных и деградационных изменений.

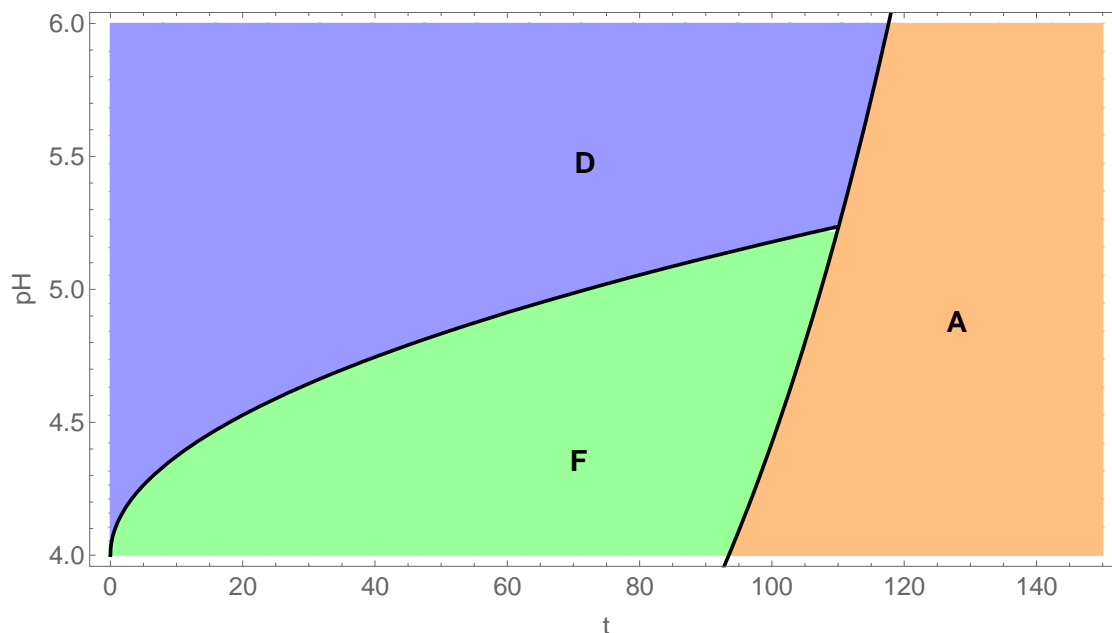


Рисунок 9. Фазовая диаграмма экономической эффективности переработки смесей молочной продукции в зависимости от кислотности и времени хранения. D – область целесообразности сушки, F – область отделения жировой фазы, A – область эффективности анаэробного метаногенеза. «Тройная точка» экономической эффективности: (109, 5.27)

В главе 5 осуществлена разработка технологической схемы переработки нереализованной молочной продукции, инвариантной относительно входящего состава, интегрированной в программное обеспечение для анализа и прогнозирования поступления пищевых отходов на перерабатывающее предприятие на основе машинного обучения. Для исследованных продуктов выбраны три основных маршрута утилизации: сушка на корм молодняка, отделение жировой фракции с последующим выделением технического лактата и анаэробный метаногенез. Рассчитана экономическая эффективность маршрутов, визуализация представлена на рис. Рисунок 9. Фазовая диаграмма экономической эффективности переработки смесей молочной продукции в зависимости от кислотности и времени хранения. D – область целесообразности сушки, F – область отделения жировой фазы, A – область эффективности анаэробного метаногенеза. «Тройная точка» экономической эффективности: (109, 5.27).

Отличительной особенностью интеллектуальной системы сегментации поступающей нереализованной молочной продукции является режим «на складском удержании» для продуктов, для которых имеется временной интервал утилизации, установленный по методологии из главы 4, ввиду нецелесообразности переработки поступающей номенклатуры молочной продукции по отдельности. Остаточное поступающее сырье, подходящее для ранних более ценных режимов рециклинга, но не отвечающее минимальным объемам загрузки перерабатывающих мощностей, утилизируется на финальной стадии анаэробного сбраживания в метановых биогазных установках, так как нейтрализация путем сжигания изначально влажных молочных отходов является энергетически невыгодной.

Потоковое ПО применяется на 3 предприятиях молочной промышленности, что подтверждено актами о внедрении. Интерфейс программного обеспечения оператора управления потоками нереализованной молочной продукции представлен на рис. 10.

Загрузить данные по поступившей продукции

	Белки	Жиры	Углеводы	Сухие в-ва	Масса	Кислотность
Молоко	3.2	3.	3.8	11.	250.	6.9
Творожное изделие	9.	14.	5.	28.	30.	4.1
Сметана	18.	2.6	3.	25.	50.	5.5
Кисломолочный продукт	2.	3.5	6.2	13.	100.	4
Молоко сгущенное	7.2	8.5	31.	48.5	40.	6.6
Кефир	3.2	3.	4.1	13.	100.	4.2

Оптимизационная цель

Максимальная утилизация по массе Максимизация экстракции

Параметры оптимизации для сухого вещества

Показатель	Оптимизация	Значение	Показатель	Оптимизация
Белки	">="	20	Активная кислотность, pH	6 – 7
Жиры	">="	10	Индекс растворимости, см3	1 – 1.2
Углеводы	"<="	20	□	□

Рассчитать параметры смеси

Результаты оптимизации

```
{72.1358, {x1 → 28.9474, x2 → 8.84211, x3 → 13.1579, x4 → 7.50424, x5 → 0., x6 → 13.6842}}
```

Натуральное выражение:
{Молоко → 250., Творожное изделие → 30., Сметана → 50., Кисломолочный продукт → 54.8387, Молоко сгущенное → 0., Кефир → 100.}

Нереализованный остаток:
{Молоко → 0, Творожное изделие → 0, Сметана → 0, Кисломолочный продукт → 45.1613, Молоко сгущенное → 40., Кефир → 0}

Рисунок 10. Интерфейс программного обеспечения для контроля за поступающей нереализованной молочной продукцией на предприятии по утилизации

Экономическая эффективность всех маршрутов утилизации динамическая и зависит от исходных параметров сырья, заложенный в разработанную интеллектуальную систему управления потоками отходов. Например, сильно закисший высокожирный субстрат, несмотря на близкую к оптимальной концентрацию летучих кислот, ускоряющих метаногенез, ограничивает применимость анаэробного сбраживания, как в случае смеси сметаны и кефира (см. табл. 4): жир требует коферментации или предэмульгирования; низкий pH подавляет метаногены и требует затрат CaCO_3 на выравнивание; внесение же солей кальция повышает осмотическое давление в биоустановке и повышает затраты на вывоз дигестата. Анаэробное сбраживание остается при этом экономически прибыльным, но дает вдвое меньший экономический выход (17л $\text{CH}_4/\text{л}$ субстрата), чем маршрут сепарации жира и получения лактата (см. табл. 6).

Таблица 6. Расчет экономической эффективности маршрутов утилизации для смеси сметаны и кефира в соотношении 50/50 при предельном сроке хранения для возможности сушки (25 дней холодильного хранения)

<i>Маршрут</i>	Выручка, Р/л	Переменные затраты, Р/л	Прибыль, Р/л
Сушка на корм	1,90	4,74	-2,84
Технический жир + L-лактат	8,43	2,61	+5,82
Анаэробное сбраживание	3,00	1,03	+1,97

Основные результаты и выводы

1. Систематизированы современные научные сведения о переработке пищевых отходов и проведен мониторинг объемов нереализованной молочной продукции. Классифицированы существующие схемы утилизации по уровням входных данных, сценарного моделирования и принятия решений.

2. Разработана многоуровневая модель цифрового профилирования смесей непереработанной молочной продукции, основанная на критериях экономической целесообразности, технологической оснащенности и экологического воздействия. Получена формула для интегрального показателя для определения целесообразности переработки молочного продукта в виде консолидированной оценки 7 критериев желательности переработки, что позволило ранжировать 16 групп молочных продуктов и обосновать приоритет переработки сливок, сметаны и кефира (интегральный индекс > 0.5).

3. Установлены закономерности изменения физико-химических свойств модельных смесей (сливки, сметана, кефир и их бинарные комбинации) при ускоренном хранении (32 °С, 0–144 ч, что соответствует 5 °С, 0–77 сут, соответствие с холодильным хранением рассчитано по уравнению Аррениуса). Получены регрессионные уравнения зависимости перекисного и кислотного чисел от времени хранения и исходной матрицы состава ($R^2 = 0.898$ для PV, $R^2 = 0.905$ для AV).

4. С использованием кластерного анализа жирнокислотных профилей по методу Уорда установлено, что формирование кластерных групп молочных смесей определяется преимущественно исходной матрицей продукта: сметанные, сливочные и кефирные образцы, включая их бинарные комбинации, устойчиво сгруппированы в отдельные ветви, тогда как фактор времени хранения (0, 72 и 144 ч при 32 °С) проявляется как вторичный, вызывая подкластеризацию внутри «видовых» ветвей. PERMANOVA-оценка внесенной дисперсии подтверждает приоритет исходного состава (35% общих различий) по сравнению с временным сдвигом (28%), что свидетельствует о доминирующей роли базового сырья в структурировании жирнокислотного пространства и указывает на целесообразность первичной сортировки отходов по типу продукта, а последующей – по степени деградации при разработке схем рециклинга. Также доказано, что смешивание пищевых матриц внутри одного кластера минимизирует вариацию и унифицирует сырье перед переработкой.

5. С помощью уточненных биомаркеров порчи молочных смесей выстроена рациональная иерархическая схема утилизации нереализованной молочной продукции, включающая три основных маршрута: кормовое использование и нутрицевтическая экстракция при низких значениях летучих жирных кислот и отсутствии прогорклости жира; последовательное отделение

технической фракции (жир, DL-молочная кислота); отправка на анаэробное сбраживание для биогаза при критических значениях накопления ЛЖК и снижении товарной ценности исходного субстрата в хранении. Показано, что критический переход за пределы кормовой пригодности ($PV > 5$ мэкв O_2 /кг и $AV > 2,5$ мг КОН/г) наступает уже после 72 ч при 32 °С для модельных систем. Построена фазовая диаграмма экономической эффективности трех маршрутов переработки в фазовом пространстве (t-pH), определена «тройная точка» равной рентабельности (109 ч, pH 5,27).

6. Разработана и апробирована инвариантная технологическая схема переработки смешанных молочных отходов, реализованная в виде программного комплекса. Комплекс использует методы машинного обучения для прогнозирования состава и объемов отходных потоков и автоматизированного выбора оптимального маршрута рециклинга. Опытно-промышленные испытания, проведенные на двух предприятиях, подтвердили соответствие получаемой продукции действующим нормативам безопасности, а также экономическую целесообразность переработки.

Список трудов, опубликованных по материалам диссертации:

1) Программа для определения целесообразности переработки молочной продукции с остаточным сроком годности. **Рыскин Д.С.**, Семипятный В.К. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025662653, 22.05.2025. Заявка № 2025660443 от 29.04.2025.

2) Очистка сточных вод пищевой промышленности: принципы и подходы. Огнева А.Н., Пряничникова Н.С., Блиадзе В.Г., Семипятный В.К., **Рыскин Д.С.** Пищевая промышленность. 2025. № 10. С. 69-72.

3) Пищевые биоинформационные матрицы – базовые элементы в технологической сингулярности. Семипятный В.К., Климова Д.В., Хуршудян С.А., **Рыскин Д.С.**, Косарева А.В., Савенкова Т.В. Пищевая промышленность. 2025. №12. С. 58-62.

4) Анализ трендовых схем переработки пищевых отходов. Семипятный В.К., Стрижко М.Н., **Рыскин Д.С.** Пищевая промышленность. 2023. №2. С. 61-65.