

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ НАУЧНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МОЛОЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ» (ФГАНУ «ВНИМИ»)

На правах рукописи

РЫСКИН ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЦИКЛИНГА
НЕРЕАЛИЗОВАННОЙ МОЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ**

4.3.3 – Пищевые системы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор технических наук
Семипятный В.К.

Москва, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ.....	9
1.1. Общие понятия.....	9
1.2. Состояние в мире и России.....	10
1.3. Способы переработки пищевых отходов	17
1.3.1. Общие понятия.....	17
1.3.2. Методы биохимической конверсии	18
1.3.3. Термохимические методы конверсии.....	24
1.3.4. Физико-химические методы конверсии пищевых отходов.....	29
1.4. Подходы математического моделирования в процессах рециклинга пищевых отходов	30
1.5. Вывод из литературного анализа	34
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ.....	36
2.1 Методологические этапы	37
2.2 Объекты исследования	39
2.3 Методы анализа.....	39
2.4 Математический аппарат и статистическая обработка.....	43
2.5 Методология прогнозного моделирования сырьевых потоков.....	48
2.6 Индустриальная апробация.....	50
ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СТРУКТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЦИКЛИНГА НЕПЕРЕРАБОТАННОЙ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ.....	51
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ БИОМАРКЕРОВ ПОРЧИ ПРИ МАРШРУТИЗАЦИИ ПОТОКОВ НЕРЕАЛИЗОВАННОЙ МОЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ.....	56
4.1 Интеграция данных об органических кислотах в систему критериев переработки жировой фазы возвратной молочной продукции.....	65
4.1.1 Интеграционные критерии и пороговые значения.....	65
4.1.2 Выводы по AV и PV	68
4.1.3 Двухуровневая схема контроля.....	69
4.1.4 Технологический потенциал обезжиренного концентрата как субстрата для ферментационного получения молочной кислоты.....	70
4.1.5 Влияние исходной концентрации молочной кислоты на экономику ферментационного процесса	73
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ НЕРЕАЛИЗОВАННОЙ МОЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ, ИНВАРИАНТНОЙ ОТНОСИТЕЛЬНО ВХОДЯЩЕГО СОСТАВА.....	78

5.1 Концептуальные основы инвариантной схемы маршрутизации возвратной молочной продукции	78
5.2 Маршрут I: Кормовое использование возвратной молочной продукции	79
5.3 Маршрут II: Фракционная переработка с извлечением жира и молочной кислоты.....	80
5.3.1 Извлечение жировой фракции и ее переработка.....	81
5.3.2 Ферментационное получение молочной кислоты из обезжиренной фазы	82
5.4 Маршрут III: Анаэробное сбраживание с получением биогаза	85
5.5 Система критериальных показателей для маршрутизации входящего потока	86
5.6 Технологическая схема, инвариантная относительно входящего состава	89
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	105
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	107
Приложение.....	128
Листинг программы по определению целесообразности переработки молочной продукции с остаточным сроком годности	128
Листинг программы для определения оптимальных значений PV и AV	158

ВВЕДЕНИЕ

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 закреплённого 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 на основе структурного моделирования инвариантной технологической схемы переработки смешанных молочных отходов.

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

1. Систематизировать научные знания в области рециклинга пищевых систем и изучить структуру и объем нереализованной молочной продукции.

2. Разработать критерии оценки целесообразности рециклинга нереализованной молочной продукции с учетом ее качественных и количественных физико-химических показателей.

3. Определить значимые факторы, влияющие на деградацию молочных продуктов и на качество продукции, получаемой в результате рециклинга.

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

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

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

Научная новизна работы:

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

- Установлены закономерности формирования качественных показателей продукции, полученной путем рециклинга

- Уточнены и систематизированы биомаркеры, позволяющие маршрутизировать и экономически эффективно проводить рециклинг нереализованной молочной продукции

Теоретическая и практическая значимость работы:

- Сформирована многоуровневая система цифрового профилирования смесей молочных отходов с интегральным индексом приоритизации
- Разработаны практические рекомендации по дифференциации молочных отходов и эффективной маршрутизации их переработки
- 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 двух предприятиях молочной промышленности цифровой СТО 0023498–022–2025 «Технологическая схема утилизации варьируемой 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 смесевых 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 и семинарах различного уровня, включая международную научно-практическую конференцию «Технологии, изменившие вкус эпохи» и международную научно-практическую конференцию «Окружающая среда, устойчивость природных экосистем и проблемы экологической инженерии».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 печатных работ, в том числе 4 статьи в журналах входящих в перечень ВАК и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

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 127 стр. Диссертация содержит 17 таблиц, 13 рисунков и 2 приложения. Список литературы включает 156 источников.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ

1.1. Общие понятия

Пищевые отходы – это продукты питания, которые утратили полностью или частично свои первоначальные потребительские свойства в процессах их производства, переработки, употребления или хранения [2, 33, 57]. Пищевые отходы являются основным компонентом твердых бытовых отходов [91] и могут включать сельскохозяйственные и промышленные пищевые отходы [33, 91], отходы ресторанов и столовых, рыночные и бытовые пищевые отходы, а также садовые отходы [1, 3, 6, 14]. По определению отдельных исследователей [85, 93] понятие «пищевые отходы» трактуется следующим образом: пищевые отходы - это съедобные и несъедобные части пищи, удаляемые из цепочки поставок продуктов питания для утилизации различными методами [134]. Пищевые отходы не включают те фракции пищи, которые используются для кормления животных и/или для производства биоматериалов [6, 18]. Пищевые отходы отличаются от потерь продовольствия [22, 34, 93], определяемых как неубранный урожай, потери скота перед убоем или потери молока из-за мастита и иных болезней [131, 134]. Также, пищевые отходы идентифицируют как продовольственные потери, которые происходят во время розничных и заключительных стадий потребления [2, 33, 57].

Пищевые отходы для их глубокого понимания могут быть классифицированы по нескольким идентификационным признакам [17, 20, 33, 85]:

- по типу происхождения;
- по природе образования;
- по классу опасности;
- по физическим характеристикам.

По первому идентификационному признаку пищевые отходы разделяют на отходы растительного и животного происхождения [2, 36, 57, 153]. По природе образования пищевые отходы возможно различить на следующие подпункты [4, 18, 22, 33]:

- отходы, которые возникают при производстве пищевых продуктов, сортировки сырья, в том числе брак;
- отходы, которые поступают со столовых, кафе, ресторанов;
- просроченные или недоброкачественные продукты питания;
- бракованная пища, которая испортилась из-за повреждения упаковки.

По классу опасности к пищевым отходам применимы только 2 класса, 4 и 5 классы опасности [32, 45, 57]. По 4-му классу отходы наносят незначительный урон окружающей среде, период восстановления составляет 3 года. По 5-му классу отходы классифицируют как неопасные и приносящие вред окружающей среде [3, 57]. По реологическим характеристикам отходы разделяются на жидкие, твердые и мягкие [1, 46].

1.2. Состояние в мире и России

По оценкам исследователей [76, 126] ежегодно образуется 1,6 гигатонн пищевых отходов, что составляет 27% от 6 гигатонн общего объема отходов от сельскохозяйственного производства как для пищевых, так и для непродовольственных целей [36, 46, 148]. Также отмечается, что из общего объема производимых продуктов питания во всем мире, составляющим 1,6 гигатонн в год, одна треть теряется или тратится впустую [12, 66, 111, 126]. Общемировой объем пищевых отходов по прогнозам исследователей и аналитиков к 2025 году вырастет до 2,6 млрд тонн [90, 111].

В 2017 году США заняли третье место по абсолютному количеству пищевых отходов по весу (168 млн тонн в год) среди всех стран, уступая только Китаю и Индии [85, 148], а доля пищевых отходов США в

общемировой структуре составляет порядка 10% [66, 82, 155]. Объем биоразлагаемых отходов России составляет порядка от 40 млн тонн в год (в т.ч. 17 млн пищевых отходов), что в целом соответствует пропорциональному соотношению численности населения России и США [6, 9, 33, 37].

Так, например, по различным оценкам исследователей [65, 134] объем потерь или порчи продуктов питания на всех этапах цепочки поставок продуктов питания (от первичного производства до потребления) [1, 59, 62], варьируются от 73 до 152 миллионов тонн в год, или от 223 до 468 кг на человека в год, что составляет примерно 35% продовольственного снабжения США [84, 95, 131]. В 2007 г. на долю США приходилось примерно 10 процентов мировых пищевых отходов (по весу), при этом, на долю США приходилось менее пяти процентов населения мира [115,147]. В 2017 США достигли цифры в 168 млн тонн отходов в количественном выражении, при этом их опережают Индия и Китай (рис. 1.1) [33, 85, 115]. В Европе показатель потерь или порчи продуктов питания на всех этапах цепочки поставок продуктов питания оценивается примерно в 88 млн тонн [82, 134], что соответствует примерно 173 кг на душу населения. С экономической точки зрения это влечет за собой потери в размере 143 млрд евро каждый год [33, 124, 131, 147].

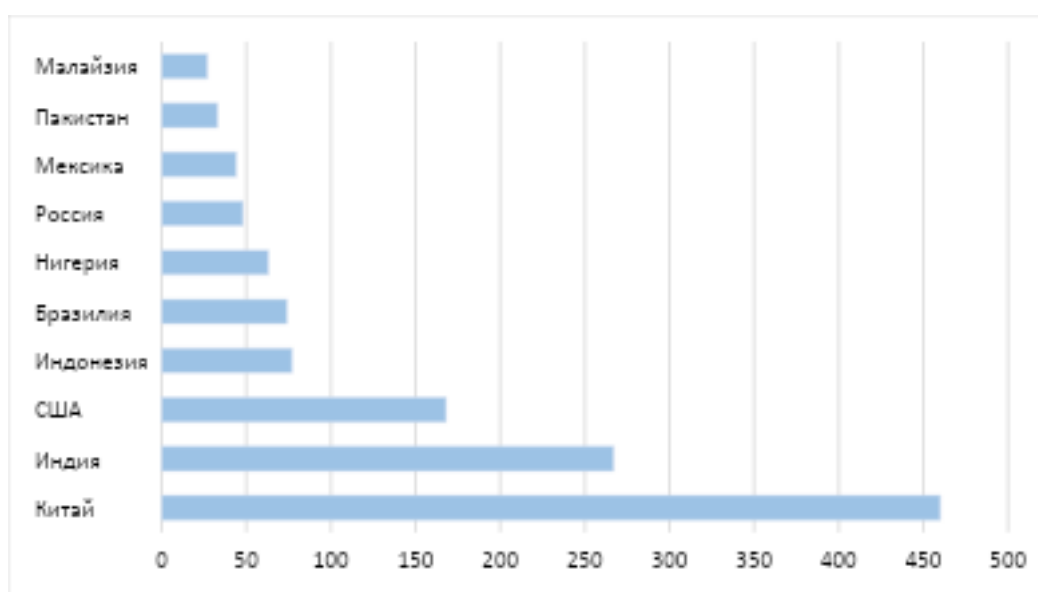


Рисунок 1.1 – Структура мирового образования отходов

При этом экологические, социальные и экономические издержки не переработанных пищевых отходов составляют 2,6 трлн долларов США [5, 21, 126]. Эффективное обращение и вовлечение твердых бытовых отходов в процесс рециклинга становится все более актуальной проблемой для стран по всему миру [57, 84, 146], особенно в развивающихся странах, где твердые бытовые отходы составляют доминирующую долю всех видов отходов [3, 33, 57]. Например, в Бангладеш органические отходы составляют около 75% твердых бытовых отходов [57, 84, 146], а в Китае в среднем они составляли около 52,6% в 2010 году, по сравнению с 25% в США или 32% во Франции [145].

В России объем пищевых отходов в общем составе всех твердых коммунальных отходов составляет около 17 млн тонн (28%) в год (по данным на 2020 год) [25, 50, 151]. По утверждениям аналитиков-исследователей [27, 33, 50] практически 2/3 (около 70 процентов) данных пищевых отходов образуется непосредственно у потребителей, в так называемых домохозяйствах [3, 23]. В Москве по данным Академии коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова [6, 50] доля пищевых отходов в общем количестве твердых коммунальных отходов составляет примерно столько, как и по России, - 24,2 %. Детализация представлена на рис. 1.2 [20, 29, 38, 57].



Рисунок 1.2 – Детализация пищевых отходов в России

Стоит отметить, что в России озвучены и реализуются задачи по сокращению пищевых отходов в соответствии с Указом Президента РФ от

21.07.2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» [33, 150]. На основании данного Указа необходимо достичь показателя по снижению объема полигонных отходов в 2 раза к 2030 году, из бюджета выделена сумма в 435 млрд руб. в период до 2024 г. [150].

Фактор того, что часть продуктов не съедается, а выкидывается, напрямую приводит к увеличению нагрузки на различные энергоресурсы [12, 50, 13]. Такие ресурсы подразумевают использованные сельскохозяйственные земли, пресноводные ресурсы, удобрения и энергию. По мере роста населения, а также увеличения производства продуктов питания [33, 150], сокращение негативного воздействия деятельности сельского хозяйства на окружающую среду будет приобретать все большее значение для обеспечения устойчивости планеты. По прогнозам ООН к 2050 году ожидается прирост численности населения до 9,8 млрд [55, 149] и это потребует увеличение использования земли на 20 процентов [33, 68, 76]. Исследователи отмечают, что устранения дефицита урожая и повышения продуктивности, вероятно, будет недостаточно для предотвращения дальнейшего обезлесения и ухудшения состояния окружающей среды [49, 131].

Отдельно исследователи анализируют стадии жизненного цикла пищевого продукта [33, 91]. Это необходимо для отслеживания цепочки дальнейших потерь, т.к. объемы потерь продуктов питания также сильно зависят от этапа цепочки поставок продуктов, как представлено на рис. 1.3 [33, 51, 55, 59, 91].

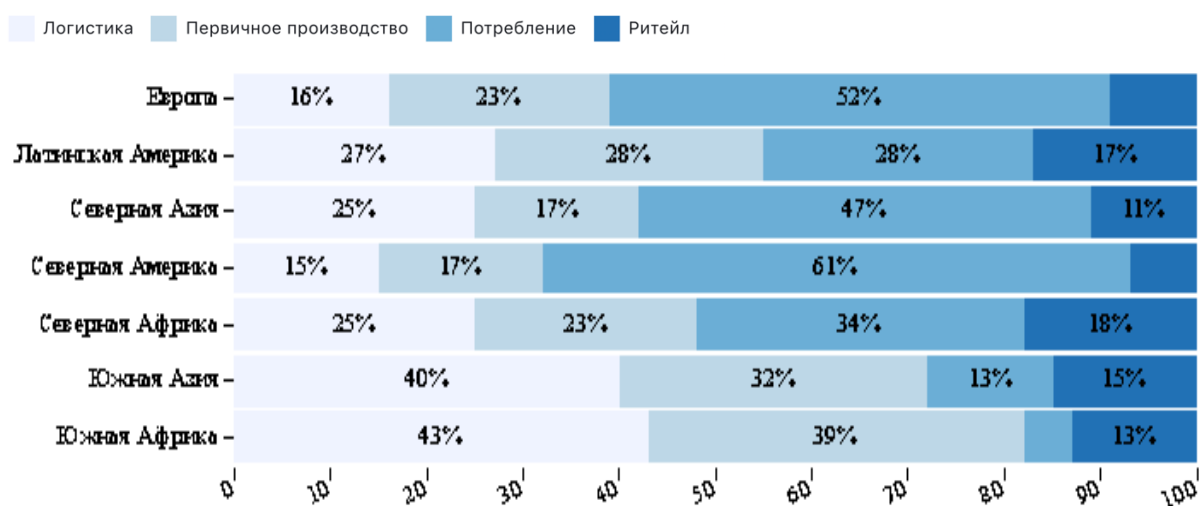


Рисунок 1.3 – Структура потерь пищевой продукции в зависимости от жизненного цикла

Данная иллюстрация наглядно демонстрирует, что Африка, Южная Азия и Латинская Америка большую часть пищевых продуктов в процентном выражении лишается на стадиях первичного производства и логистики [82, 85, 149], что обусловлено недостаточностью оснащенности необходимыми технологическими инструментами и технологиями. Исследователь отмечает [33], что в странах с более высоким уровнем дохода основная потеря пищевых продуктов происходит на стадиях потребления, что вызвано большей покупательской способностью, чем в странах Азии, Африки и Латинской Америки [6, 149].

Отдельно ученые [49, 62, 66, 94, 103, 126] дифференцируют потери пищевых продуктов в зависимости от категории продукта [33, 50, 101] (рис. 1.4). Во всех странах с различным уровнем дохода к наибольшей категории потерь относятся фрукты и овощи, наименьшим процентов потерь характеризуется категория рыбы и морепродуктов. Остальные категории имеют различия в зависимости от региона.

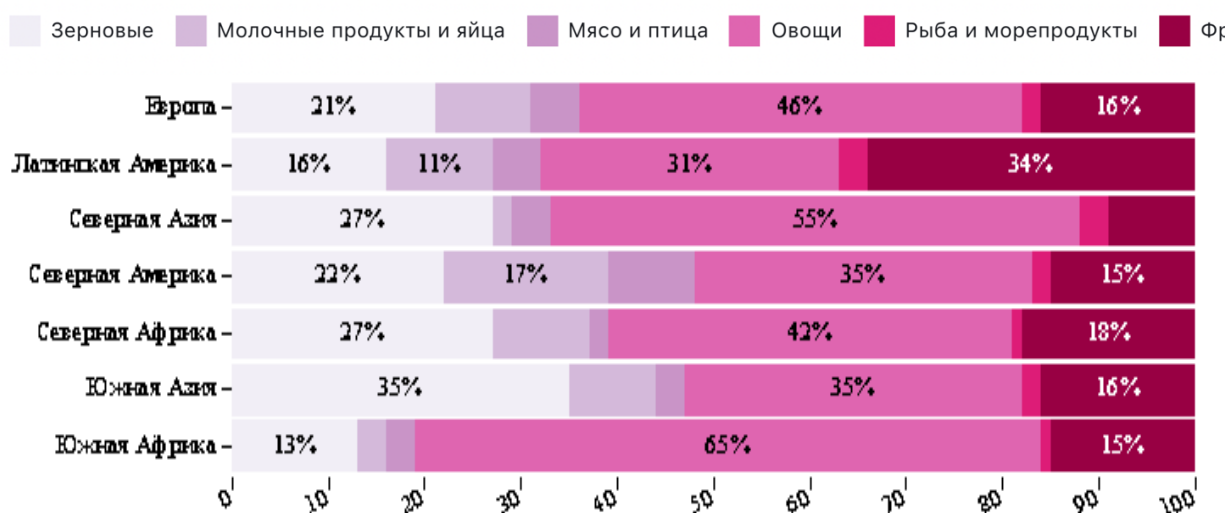


Рисунок 1.4 – Структура потерь пищевой продукции в зависимости от категории продукции

Пищевые отходы, которые являются доминирующей частью органической фракции твердых бытовых отходов, подвержены разложению и при захоронении на свалке. Отмечается, что пищевые отходы разлагаются с образованием метана, парникового газа [50, 100]. Данный процесс может быть причиной, влияющей на глобальное потепление [91, 128, 133]. Также, традиционные методы захоронения приводят к ухудшению экологической ситуации в мире вследствие снижения качества почвы, возрастанию нагрузки на использование дефицитной воды и утраты биоразнообразия [50, 53, 100]. Непереработанные пищевые отходы могут приводить к образованию 4,4 Гт CO₂, что составляет 8% от общего объема парниковых газов [5, 129, 152]. По оценкам Всемирного банка, текущие выбросы свалочных газов в размере 1600 тонн CO₂ на данный момент вырастут к 2050 году до 2600 тонн CO₂, экв. [12, 153].

В поддержку этической стороны переработки пищевых отходов говорят работы многих ученых [118, 126, 131], особенно с учетом того, что по данным ООН 800 млн человек голодают [149, 153]. Сокращение пищевых отходов также может помочь решить проблему с недостатком продовольствия с учетом продолжающегося роста населения в мире [12, 149, 154]. Увеличение населения потребует более чем 50-процентного увеличения производства

продуктов питания по сравнению с уровнем 2010 года [155]. Сокращение потребления может уменьшить потребность в новом производстве продуктов питания, сократить прогнозируемое обезлесение, утрату биоразнообразия, выбросы парниковых газов, загрязнение воды [12, 100, 153].

В соответствии с целями в области устойчивого развития (ЦУР) Рабочей группы открытого состава Генеральной Ассамблеи ООН важно обеспечить устойчивую модель производства и потребления, а также направить усилия на сокращение потерь твердых коммунальных отходов на душу населения в два раза к 2030 году [82, 155]. Грамотный рециклинг не только позволит смягчить негативное воздействие на окружающую среду, уменьшить выбросы парниковых газов, но и позволит обеспечить рабочие места [12, 153], снизить затраты на утилизацию отходов [49, 53] и позволит поддерживать устойчивые методы обращения с отходами в условиях экономики биологического цикла [8, 11, 86].

Пищевые отходы [101] считаются основой для производства многих возобновляемых химических веществ, кормовых добавок, ферментных комплексов, витаминов, антибиотиков, природного биотоплива [10, 15, 23, 34, 80, 103]. Пищевые отходы содержат натуральные волокна, углерод, белки, жиры и липиды, витамины и минералы в сложной матрице, которая легко поддается биологическому разложению и может быть использована повторно [22, 33, 91, 130]. Состав и биохимические характеристики получаемых продуктов из пищевых отходов зависят от многих факторов, в том числе от географии региона, что влияет на способы их утилизации [30, 121]. В целом, стоит отметить, что рациональная система производственного цикла пищевой продукции требует современного подхода, анализа и решения [1, 9, 12, 43, 44].

1.3. Способы переработки пищевых отходов

1.3.1. Общие понятия

Пищевые отходы могут быть подвергнуты рециклингу на основе методов биоконверсии, среди которых выделяют физико-химический, термохимический и биохимический методы [32, 36, 48, 53, 73]. Физико-химическая конверсия включает процесс трансформации исходного сырья с помощью физических и химических процессов, а также переэтерификацию [115, 141]. В основном данный процесс применим для преобразования растительных масел, жиров и другого подходящего сырья в биогаз [73, 87, 120].

Термохимическая обработка – это модификация пищевых отходов путем термического разложения с целью получения тепловой энергии [50, 87, 79, 118]. Технология термической деполимеризации позволяет из углеводородных и органических отходов получать газообразное, жидкое и твердое топливо, некоторые химикаты и удобрения [24, 57, 74, 81]. Подбор технологии может быть основан на физико-химических свойствах исходного сырья. Термохимические методы, включающие процессы сжигания непосредственно, газификации, пиролиза, гидротермальной переработки [73] подходят для переработки продуктов с низкой влажностью [90, 117].

Биохимическая конверсия зачастую включает несколько методов – анаэробное сбраживание и компостирование [42, 51, 60, 76, 115]. В результате биохимических преобразований возможно образование щелока или газообразного метана на базе ферментативной модификации биологических отходов путем метаболизма бактерий [60, 69, 78, 115]. Биохимическая конверсия также включает в себя использование ферментов бактерий или других микроорганизмов для расщепления биомассы посредством процесса анаэробного сбраживания, ферментации или

компостирования [51, 60, 76, 106]. Данная конверсия бывает двух типов: аэробная и анаэробная [51]. Также, сильно различается технология проведения конверсии в зависимости от типа и состава исходного сырья и типа конечного продукта [51, 60, 76], можно сочетать данные методы и экструзию [99, 126].

1.3.2. Методы биохимической конверсии

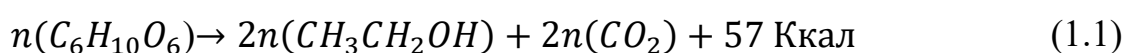
Анаэробное сбраживание

Анаэробное сбраживание - это регулируемое разложение органического вещества в отсутствие кислорода [60, 73, 102, 124]. Данный способ конверсии пищевых отходов представляет собой процесс многостадийного биохимического превращения субстрата под воздействием различных микробных консорциумов и комплекса технологических факторов, в том числе факторов окружающей среды [7, 19, 70, 124]. Данный способ, как отмечают ученые [31, 51], используется для переработки твердых органических отходов с получением богатых энергией газов, таких как метан и водород. Важным преимуществом процесса анаэробного сбраживания является то, что он обеспечивает получение биогаза – альтернативного источника энергии [26, 87, 104].

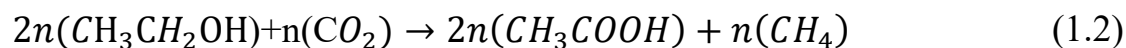
Анаэробное сбраживание используется для денатурации лигноцеллюлозы [26, 120], пищевых отходов, навоза скота, осадков сточных вод [126]. Этот процесс, в частности, генерирует биогаз, который состоит из метана, углекислого газа и незначительных количеств летучих органических соединений [5,70]. Тремя основными группами сырья для производства биоэтанола являются сахаросодержащие культуры (сахарное сорго, сахарный тростник и сахарная свекла) [104, 120], зерновые культуры [63, 87], богатые крахмалом (пшеница, кукуруза и ячмень) и лигноцеллюлозное сырье (древесина, солома и трава) [91, 130]. В отличие от лигноцеллюлозы (сырье второго поколения), превращение сахаристого и крахмалистого сырья (сырье

первого поколения) в биоэтанол является простым и экономически эффективным [91, 97, 103]. Необходимо контролировать такие параметры окружающей среды, как содержание воды, уровень тепла и pH, чтобы максимизировать производство биогаза и скорость разложения отходов [26, 31, 104]. В технологии анаэробного сбраживания используются такие виды микроорганизмов, как *Clostridium*, *Bifidobacterium*, *Bacillus*, *Streptococcus*, *Bacteroides*, *Butyrivibrio*, *Pseudomonas*, протеобактерии, эубактерии. Основными метанообразующими микроорганизмами являются *Methanosaeta*, *Methanobacterium*, *Methanomicrobium*, *Methanobrevibacter*, *Methanosarcina* и *Methanococcus* [89, 104, 130].

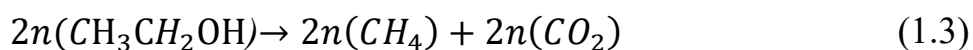
Схематичный теоретический процесс анаэробного сбраживания состоит из нескольких стадий [5, 35, 103, 118]. Первая стадия характеризуется протеканием процесса гидролиза имеющихся в субстрате высокомолекулярных соединений до низкомолекулярных, в том числе происходит деструкция целлюлозной биомассы до глюкозы [5, 32, 35]. Вторая стадия включает этап сбраживания без доступа кислорода под воздействием подобранных релевантных микроорганизмов [5, 26, 35]. На выходе второй стадии образуются такие летучие соединения, как этанол и диоксид углерода, а также формируется большое количество тепла.



Третьей стадией является ацидогенез, и на данном этапе образованные соединения второй стадии разлагаются до различных органических кислот и солей [5,35,103,118].



Четвертая стадия - метаногенез ознаменовывается образованием метана, углекислого газа [5, 35, 104]. Скорость образования данных газов зависит от таких факторов, как температура, значения pH, количественного отношения углевода к азоту в субстрате [5, 31, 35, 51]. Для максимального получения метана необходимо соблюдать температуру в 33-54 °С, значение pH – 6,5, а количественное отношение углевода к азоту – 10-16.



Исследователи подчеркивают некоторые очевидные минусы анаэробного сбраживания [31, 90, 104]. Прежде всего, это образование вторичных загрязняющих соединений и дигестата после полного цикла сбраживания [81]. Также, немаловажным препятствием является сложностью регулирования технологических факторов [104]. Это необходимость строгого регулирования соотношения углерода к азоту, pH и времени воздействия [97, 104]. Стоит отметить и ограничение скорости и охвата деградации исходного сырья без применения стадий предварительной обработки вследствие сложной матрицы лигнинсодержащего сырья [120]. В качестве предварительной обработки могут применены процессы термической и химической обработки [90, 126].

Компостирование

Компостирование - процесс контролируемого биологического разложения пищевых отходов в аэробных или анаэробных условиях [28, 64, 117]. Принято различать аэробное и анаэробное компостирование [66, 106, 117]. Данный процесс биоконверсии основан на преобразовании разнородного пищевого субстрата на основе воздействия консорциума микроорганизмов [42, 64]. Готовый продукт - компост является востребованным продуктом для сельскохозяйственных угодий и восстановления загрязненных территорий [144].

Аэробное компостирование состоит из трех этапов [73, 113]. На первой стадии разложения углеводы и аминокислоты превращаются в более простые соединения, такие как углекислый газ и вода, при высоких температурах (выше 60 °C) [115, 120]. На этапе трансформации органическое вещество разлагается мезофильными бактериями. Синтез или созревание является заключительной фазой. В зависимости от различных факторов весь процесс компостирования может занять от 3 до 6 месяцев [106]. По сравнению с анаэробным сбраживанием, компостирование протекает интенсивнее из-за более высоких темпов роста бактерий и видового разнообразия [103, 106,

120]. Ученые отмечают, что минусы компостирования заключается в трудностях контроля за вторичными выбросами [28, 66, 106, 117]. Минимизировать данные сложности можно с помощью многоступенчатой инокуляции. Также и предварительная обработка субстрата может помочь ускорить процесс компостирования [126].

Технология ферментации (микробиологической конверсии)

Ферментация наряду с анаэробным сбраживанием является основным биохимическим процессом конверсии пищевых отходов с образованием биотеплоносителей [11, 16, 87, 104, 120]. Они могут быть представлены в виде жидкого топлива (этанол), газообразного (биогаз), твердых энергоносителей [90, 126]. Зачастую ферментацию применяют для целлюлозосодержащего сырья [37, 89].

Микробиологическая биконверсия [11, 16, 112, 130] основана на том, что углеводосодержащий субстрат пищевых отходов подвергается ферментным процессам гидролиза различными релевантными ферментными комплексами [38, 45] в результате чего получают необходимый углеводный кормовой комплекс [39, 41]. Используемые ферментные препараты содержат пектиназу, гемицеллюлазу и целлюлазу и осуществляют деструкцию клеточных стенок и встроенных полисахаридов [16, 45, 50]. Стоит отметить, что при этом кормовая ценность некондиционного сырья после соответствующей обработки превышает кормовую ценность кондиционных аналогов в 1,4-1,8 раза [11, 20]. После завершения процесса биоконверсии получаемым конечным продуктом может выступать кормовая добавка - углеводно-белковый концентрат [39, 79]. К плюсам технологии ферментации относят возможность получения наряду с кормовыми добавками, удобрениям полезного биогаза (в том числе метана) [58]. А к минусам ферментации относят необходимость применения стадий предварительной обработки, что увеличивает стоимость процессов [36, 59, 93].

Наиболее широко используемыми микроорганизмами для ферментации ученые называют *K. Marxianus*, *S. Cerevisiae*, *K. lactis*. [47, 79, 93]. С помощью

ферментативной конверсии возможно получать такие ценные вещества, как ферменты (β -галактозидазу, β -глюкозидазу, инулиназу и полигалактуроназу), одноклеточный белок, ароматические соединения и этанол [112, 144].

Стоит отдельно отметить процесс твердофазной ферментации. Твердофазная ферментация - это биотехнология с большим потенциалом для извлечения биоактивных соединений, присутствующих в пищевых отходах [107, 124]. Для экстракции биокомпозитов применяют грибковые комплексы, бактериальные и дрожжевые [48, 54]. Исследования показали, что низкое количество или отсутствие воды в процессе твердофазной ферментации дает многочисленные преимущества, такие как легкое извлечение биоактивных соединений, низкие эксплуатационные расходы и простота внедрения [55, 124]. Список возможных вторичных метаболитов, производимых твердофазной ферментацией, представлен в табл. 1.1 [71, 79, 102, 108, 115, 124, 125, 128, 142, 143].

Таблица 1.1 – продукты и область их применения, производимые методом твердофазной ферментации

Исходный субстрат	Вид микроорганизма	Области применения	Продукт
Отходы переработки кукурузы	<i>Shiraia</i> sp.	Фотодинамические агенты, используемые в области терапии и диагностики	Гиперцеллин А
Смесь субстратов (рапсовый жмых, рисовая шелуха, пшеничные отруби и сырой глицерин)	<i>Streptomyces gilvosporeus</i> Z28	Противогрибковые агенты	Натамицин
Жмых из сахарного тростника	<i>A. fumigatus</i> TXD1 05	Противораковые агенты	Паклитаксел

Жмых из семян кунжута	<i>Penicillium minioluteum</i> ED 24	Микотоксины	Монаскорубрин
Побеги винограда, сосновые опилки	<i>Aspergillus niger</i>	Антиоксидантное, антимикробное, противораковое, анти-ВИЧ, против гиперурикурии, противотуберкулезное,	Нафтогаммапирон
Рис, просо, кукуруза, ячмень и пшеница	<i>Monascus ruber</i>	Средство, снижающее уровень холестерина (статины)	Монаколин К
Кожура фруктов (яблока, граната, банана и манго) и семена (манго, яблока, черной сливы)	<i>Aspergillus niger</i>	Антиоксидант	Галловая кислота
Отходы перловой крупы	<i>Phellinus linteus</i>	Антиоксидантные и противогрибковые агенты	Гиспидин
Смесь из жмыха ятрофы, побегов винограда, оливковых выжимок и оливкового масла	<i>Trichoderma asperellum</i> TF1	Вещества для придания продуктам кокосового аромата	6-пентил-альфа пирон

1.3.3. Термохимические методы конверсии

На данный момент во всем мире насчитывается около 1700 заводов по переработке отходов на основе метода сжигания с термической конверсией. Данные предприятия находятся в странах Европейского союза, США и

Японии, а также Африки. Как отмечают ученые [74, 81, 90], работа части предприятий основана на процессе полного окислительного сжигания. Процесс проводят при температуре 800-1450 °С, вырабатываемое тепло является основным конечным продуктом [79, 118].

Минусом данной технологии можно назвать образование трудноутилизируемой золы [122]. Отмечают, что ее утилизация возможно путем применения в качестве компонента дорожного покрытия, в сельском хозяйстве, в качестве адсорбента сточных вод, в производстве цемента и бетона [98, 144]. Рекуперация энергии при сжигании напрямую связана с тепловым потенциалом исходного сырья, а средняя теплотворная способность должна превышать 7 МДж / кг, чтобы применение данного метода было энергетически выгодным [70, 144]. Следующим минусом является тот факт, что сжигание сопровождается образованием целого спектра вторичных выбросов. Они включают фураны, диоксины, летучие органические соединения и полиароматические соединения [75, 101]. В качестве исходного сырья применяют сырье с низкой влажностью.

Пиролиз

Процесс пиролиза – это цепная реакция, включающая дегидратацию, деполимеризацию, декарбоксилирование, обугливание, изомеризацию и ароматизацию, направленная на деструкцию лигноцеллюлозных отходов [74, 90, 117]. Эти реакции протекают последовательно и параллельно [90, 126]. Благодаря пиролизу можно получать такие биопродукты, как биомасло, биоуголь и неконденсирующиеся газы [88, 92, 103]. Процессы пиролиза в среде с минимальным количеством кислорода и обусловлены температурным режимом, скоростью нагрева и временем выдержки [88, 90]. Различают медленный, быстрый и мгновенный процессы пиролиза. Медленный пиролиз производят при температуре от 400 до 500 °С со скоростью нагрева 5-7 °С мин в течение 5-30 мин [90, 140]. Соответствующие диапазоны для быстрого пиролиза и мгновенного пиролиза составляют 400-650 °С / 400-950 °С, 300 °С мин⁻¹ / 1000 °С мин⁻¹ и 0,5–5 с / <0,5 с для диапазона температур, скорости

нагрева и продолжительности соответственно [89]. Эти условия эксплуатации определяют распределение и состав биопродуктов [89, 135].

К биопродуктам пиролиза относят биомасло и биоуголь [91, 140]. Биомасло характеризуется показателями низкой теплотворной способности (23,5 МДж/кг), сильной насыщенности кислородом, что обуславливает необходимость его дальнейшего преобразования. Биомасло используют в качестве источника транспортного топлива, для генерации тепла и электроэнергии [63, 90]. Биоуголь характеризуется высокой концентрацией неорганических веществ в золе при сжигании [133]. Это затрудняет процесс его использования в качестве источника энергии. Исследователи отмечают, что биоуголь возможно использовать в сельском хозяйстве для связывания углерода, улучшения состояния почвы [74, 81, 133]. К недостаткам метода пиролиза относят:

- показатель невысокой эффективности процесса преобразования энергии (23-24%) [74, 133];

- возможность использования сырья низкой влажности (<15% по массе). Увеличение количества влаги в исходном сырье коррелирует со снижением качества и количества получаемого биоматериала [90, 109], предварительная стадия сушки сырья приводит к удорожанию процесса пиролиза [135].

- выделение вторичных загрязняющих соединений в виде летучих газов [74].

Газификация

Газификация представляет собой комплекс процессов конверсии, включающих газификацию, сушку, пиролиз, окисление и восстановление [65, 90, 95]. При газификации пищевых отходов воздухом, паром и кислородом при относительно более высокой температуре от 800 до 900 °С образуются горючие газы (CO, H₂ и CH₄) и негорючие газы (CO₂ и N₂) в газификаторе [105, 132]. Состав исходного сырья априори обуславливают выход продукта и газовый состав [77].

Газификация паром является распространенной, поскольку она способствует получению большего объема горючего газа и меньшему образованию смолы по сравнению с газификацией воздухом и кислородом [90]. Эффективность конверсии относительно высока (45-61%) по сравнению с другими процессами термохимической конверсии на сухой основе, в том числе пиролиз [77, 81]. Образующиеся горючие газы (также известные как синтез-газ) могут сжигаться непосредственно для выработки тепла и электроэнергии или использоваться в качестве промежуточного ресурса для производства бензина, дизельного топлива и реактивного топлива с помощью синтеза Фишера-Тропша [74, 89].

Минусом процесса газификации является необходимость использования, как и в процессе пиролиза, сырья с низкой влажностью до 30 процентов [81, 89, 118]. Увеличение влаги свыше 30% приводит к ухудшению получаемого летучего продукта и уменьшению его теплотворной способности [118, 133, 139]. Также, исследователи отмечают, что имеются сложности с утилизацией побочного продукта - гудрона и с разделением фракций синтез-газа [133, 139]. Кроме того, уголь, полученный в качестве побочного продукта газификации, в настоящее время рассматривается как отходы, не имеющие рыночной или экономической ценности и требующие утилизации на свалке [118]. Хотя использование древесного угля для приготовления катализатора [61], внесения удобрений в почву, сорбента и сжигания было исследовано, научные разработки в области газификации сосредоточены на инновационных процессах снижения содержания смолы и древесного угля в конечном продукте [74, 90], а не на разработке средств повышения стоимости побочных продуктов [74, 118].

Гидротермальная обработка

Гидротермальная обработка представляет собой конверсию пищевых отходов в подкритической или сверхкритической водной среде в отсутствие кислорода [90, 96, 118]. Плюсом данной технологии является то, что в качестве исходного сырья можно использовать сырье с высокой влажностью (свыше

50%), что позволяет избежать энергоемкой предварительной сушки. Различают несколько подвидов гидротермальной обработки в зависимости от применяемой температуры, давления, времени выдержки, скорости загрузки твердого вещества и состава исходного сырья [6, 80, 91].

Гидротермальная карбонизация (первый способ осуществления гидротермальной обработки) проводится в условиях с температурой от 180 до 250 °С [80, 90, 118]. Механизмы реакции включают гидролиз, дегидратацию, декарбоксилирование, конденсацию, полимеризацию и ароматизацию [24, 88]. Во время гидротермальной обработки исходное сырье нагревается в закрытом реакторе с получением твердой фракции, называемой гидроуглем, и жидкой фракции, богатой органикой, называемой технологической водой [24, 128]. Также образуется небольшое количество газообразного продукта (в основном CO_2) [96, 129]. Эффективность гидротермальной обработки колеблется от 32 до 64%. Гидроуголь в процессе гидротермальной обработки обладает хорошими свойствами гидрофобности, измельчаемости, энергосодержания, также свойства гидроугля улучшает процесс деминерализации [24, 88, 96].

Второй способ называется гидротермальным сжижением. Гидротермальное сжижение проводят при температурах 280-360 °С и давлении 18-30 МПа в условиях суб- и сверхкритической воды [81, 123]. В результате этого процесса получают жидкое топливо, твердый остаток неорганического происхождения, а также газообразный продукт, состоящего в основном из CO_2 , и жидкой фракции, содержащей небольшое количество водорастворимых органических веществ [87]. Механизмы реакции включают гидролиз, дегидратацию, декарбоксилирование, конденсацию, полимеризацию без этапа ароматизации [24, 88]. И эффективность данного процесса находится в пределах 38 до 72,6%. Прямое использование получаемого топлива в данном процессе сталкивается с некоторыми ограничениями, включая высокую вязкость, химическую нестабильность, содержание твердых веществ и неполную летучесть, обусловленную присутствием ему высоким содержанием кислорода [96]. Следовательно,

необходима дальнейшая переработка для снижения содержания кислорода для получения жидкого топлива, совместимого с обычным топливом.

Третий способ - гидротермальная газификация осуществляется в условиях сверхкритической воды, при температуре выше 375 °С, с получением синтез-газа (с более высоким содержанием водорода, чем при обычной газификации) и жидкой фракции с низким содержанием растворенной органики. Основными реакциями гидротермальной газификации являются паровой риформинг, водогазовый переход и реакции метанирования [95, 127]. Исследования и разработки данного процесса находятся на достаточно стартовом уровне, большинство исследований проводится на основе модельных синтетических субстратов, таких как глюкоза и целлюлоза [96]. Эффективность преобразования энергии гидротермальной газификацией находится в диапазоне от 26 до 38% [96, 97]. Сравнительный анализ эффективности процессов переработки пищевых отходов по критериям получения основных и побочных продуктов и эффективности в процентном выражении представлен в таблице 1.2 [60, 65, 73, 94, 96, 97, 102, 117, 124].

Таблица 1.2 – Анализ эффективности процессов переработки пищевых отходов

Методы переработки	Температура, °С	Эффективность переработки, %	Производство энергоносителя / биотоплива	Побочные продукты или вторичные загрязнители
Анаэробное сбраживание	32-65	< 50	Биогаз	Дигестат
Ферментация	25-35	62.5-70	Жидкий этанол	Барда
Пиролиз	400-950	23-43	Биоуголь	Водные конденсаты
Газификация	800-900	44-61	Синтез-газ	Смола и обугленные остатки
Гидротермальная переработка	180-375	26-72.6	Гидроуголь	Техническая вода

1.3.4. Физико-химические методы конверсии пищевых отходов

Переэтерификация

Процесс переэтерификации заключается в конверсии триглицеридов исходного насыщенного липидами пищевого сырья в метиловые эфиры жирных кислот с использованием метанола и/или этанола [78, 117]. На основе метода прямой переэтерификации возможно получать биодизель [126]. Биодизельное топливо - это альтернативное топливо, получаемое из жиров и масел [137]. Для производства данного экологически чистого топлива, используются штаммы *Schizochytrium mangrovei*, *Penicillium expansum*, *Aspergillus* sp., *Schizochytrium mangrovei*, *Chlorella pyrenoidosa* [114, 126]. В процессе переэтерификации образуются жирные кислоты, далее синтезируемые в биодизельное топливо [117, 119]. Отдельные ученые обнаружили, что *Penicillium expansum* и пять различных штаммов *Aspergillus* sp. в качестве сырья предпочтительнее используют отработанное кулинарное оливковое масло [126]. Также, производство биодизеля возможно из таких пищевых отходов, как овощи, животные жиры, сливочное масло, в т.ч. отработанные различные масла после жарки [117, 119].

Отмечается, что использование гетерогенного исходного сырья является более рентабельным подходом для осуществления химических модификаций процесса переэтерификации [78]. В реакции переэтерификации очень важен подбор катализатора, который вызывает алкилирование сложных эфиров [78, 117]. Катализаторы, используемые в реакции переэтерификации, могут быть щелочными или кислотными, гомогенными или гетерогенными [83]. Минусы гомогенных катализаторов обусловлены сложностью выделения продукта, регенерацией катализатора и образованием отработанной воды, при этом гомогенные катализаторы возможно извлекать и повторно использовать [78, 121]. Кислотные гетерогенные катализаторы медленно вступают в реакцию и не могут обеспечить быстрое ее протекание. Щелочные

катализаторы более привлекательны из-за возможности обеспечить быструю реакцию переэтерификации и мягких условий эксплуатации [78, 111].

1.4. Подходы математического моделирования в процессах рециклинга пищевых отходов

На сегодняшний день приобретают все большее значение подходы управления производственными пищевыми процессами на базе создания интеллектуальной системы управления, основанной на различных математических моделях [19, 52]. Известны различные подходы для математического моделирования в процессах рециклинга пищевых отходов [7, 67, 94]. Например, метод, основанный на данных, который позволяет прогнозировать будущие или ненаблюдаемые данные, получая представление о потенциальных взаимодействиях между одинаково распределенными входными и выходными измерениями [110]. Данный метод возможно применять для прогнозирования конечного качества компоста в компостировании пищевых отходов [66, 140].

Имеется исследование качества проведения процесса компостирования автором - Айкан Дюменчи [67]. Ученый использовал искусственные нейронные сети для прогнозирования уровня зрелости компоста. Была использована радиальная базисная функция для прогнозирования содержания влаги, общего органического углерода и общих потерь азота при совместном компостировании разнородных исходных материалов [67].

Авторы Ван С. и Ли Ц. с соавторами [138] развили идею предыдущего исследования и на основе данных реактивного компостирования построили четыре модели, включая random forest, eXtreme Gradient Boosting, Light Gradient Boosting Machine и многослойный персептрон. Также, авторы разработали приложение для прогнозирования зрелости компоста и обеспечения регулирования процесса компостирования. Предлагаемые

модели могут оценивать зрелость компоста из пищевых отходов и давать рекомендации для различных сценариев использования при реактивном компостировании. Авторы предлагали вносить в качестве входных переменных 13 параметров, характеризующих условия компостирования. Построена модель классификатора для дифференциации обучающего и тестового наборов с использованием тестовых наборов данных, а также применено моделирование [138]. Перед моделированием категориальные переменные были закодированы. Различия в размерах в не двоичных числовых переменных нивелировали нормализацией [138]:

$$x_i^* = \frac{x_i - \mu}{var} \quad (1.4)$$

где x_i - значение i -го входного признака; x_i^* - нормализованное значение начального x_i ; μ - среднее значение x_i ; и var - стандартное отклонение x_i .

Линейные и монотонные зависимости проанализированы с учетом анализа коэффициента корреляции Пирсона и коэффициента ранга Спирмена, значения которых установлены с помощью программирования на Python. Для оценки производительности ранее созданных моделей для расчета точности прогнозирования использовались коэффициент детерминации, среднеквадратичная ошибка и средняя абсолютная ошибка между наблюдаемыми и прогнозируемыми значениями индекса зрелости. Уравнения, используемые для расчета этих показателей производительности, следующие:

$$R_2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (e_i - p_i)}{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})} \bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} \quad (1.5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - p_i)^2}{n}} \quad (1.6)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |p_i - e_i|}{n} \quad (1.7)$$

где n - количество точек данных; e_i - i -е экспериментальные данные, а p_i - i -е соответствующее прогнозируемое значение; \bar{e} - среднее значение экспериментальных значений.

Также, имеются данные о математической модели аэробной биодеградациии молочной сыворотки [60, 83, 94]. В работе использовали смешанную культуру лабораторных молочнокислых дрожжей и *Bacillus sp.* Биомасса была объединена в одну «эквивалентную культуру» с единственной эквивалентной удельной скоростью роста μ . Источники углерода в моделях были выражены в виде трех «эквивалентных субстратов»: 1, лактоза; 2, лактат; 3, ацетат. Отдельные удельные скорости роста, по одной на каждом субстрате: μ_1 для лабораторных дрожжей (на лактозе), μ_2 для термофилов (на лактате), μ_3 для термофилов (на ацетате).

Кинетика множественного монодного типа для каждого источника углерода, переработки углеродного субстрата и динамика роста биомассы представлены в уравнениях 1.8-1.15 [60, 83, 94]:

$$\frac{dX}{dt} = \mu \cdot X - K_d \cdot X \quad (1.8)$$

$$\frac{dC_1}{dt} = -\frac{1}{Y_{x/c1}} \mu_1 \cdot X \quad C_1(0) = C_1^0 \quad (1.9)$$

$$\frac{dC_2}{dt} = -\frac{1}{Y_{x/c2}} \mu_2 \cdot X + \frac{1}{Y_{x/c1}} \mu_1 \cdot X \quad C_2(0) = C_2^0 \quad (1.10)$$

$$\frac{dC_3}{dt} = -\frac{1}{Y_{x/c3}} \mu_3 \cdot X + \frac{1}{Y_{x/c1}} \mu_1 \cdot X \quad C_3(0) = C_3^0 \quad (1.11)$$

$$\mu = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 \quad (1.12)$$

$$\mu_1 = \mu_{1max} \frac{C_1}{K_{1c} + C_1} \quad (1.13)$$

$$\mu_2 = \mu_{2max} \frac{C_2}{K_{2c} + C_2} \quad (1.14)$$

$$\mu_3 = \mu_{3max} \frac{C_3}{K_{3c} + C_3} \quad (1.15)$$

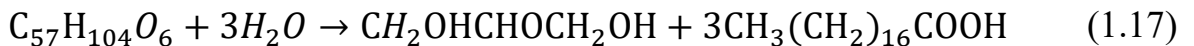
где - μ удельный темп роста (ч^{-1}), C_1 -концентрация лактозы (г/л^{-1}), C_2 - концентрация лактата (г/л^{-1}), C_3 - концентрация ацетата (г/л^{-1}), K_{1c} , K_{2c} , K_{3c} - константы насыщения (г/л^{-1}), K_d - коэффициент затухания K_d (ч^{-1}), X - концентрация сосредоточенной биомассы (г/л^{-1}), $Y_{x/c1}$, $Y_{x/c2}$, $Y_{x/c3}$ - коэффициенты выхода ((г биомассы)/ (г субстрата)), t - продолжительность эксперимента (ч).

Схема основных реакций в биореакторе представляет собой концептуальную теоретическую модель процесса, которая учитывает только поток углерода в системе, предполагая, что полный гидролиз белков, липидов и целлюлозы будет предшествовать ферментации мочевой кислоты и моносахаридов, производству метана [60, 83, 94].

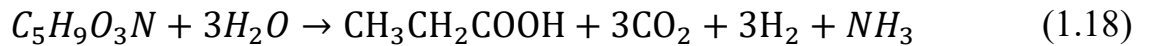
Гидролиз белков до аминокислот:



Деструкция жира до длинноцепочечных жирных кислот:



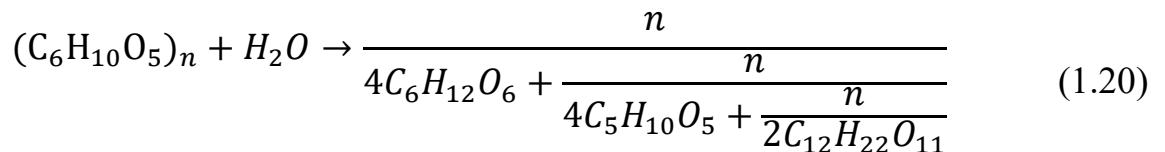
Ферментативный гидролиз аминокислот и моносахаров:



Деструкция мочевой кислоты:



Гидролиз целлюлозы до углеводов:



Соответственно, следующие кинетические выражения были использованы для реакции гидролиза белков, липидов и целлюлозы:

$$r_{h1} = \frac{dC_1}{dt} = -K_{h1}C_1; \quad C_1(0) = C_1^0 \quad (1.21)$$

$$r_{h2} = \frac{dC_2}{dt} = -K_{h2}C_2; \quad C_2(0) = C_2^0 \quad (1.22)$$

$$r_{h3} = \frac{dC_3}{dt} = -K_{h3}C_3; \quad C_3(0) = C_3^0 \quad (1.23)$$

Исследование ученых показало [60, 83, 94], что моделирование сложных систем биореакции посредством объединения ключевых субстратов и видов микроорганизмов в ограниченное число «эквивалентных кластеров» заслуживает рассмотрения как метод достаточно быстрого протекания процесса и практической эксплуатации. Имеется потенциал дальнейшего углубления в работу над моделями для улучшения учета изменяющихся во времени конкретных темпов роста.

1.5. Вывод из литературного анализа

Полномасштабная переработка пищевых отходов представляет большую значимость как в экологическом, так и экономическом плане. Несмотря на разнообразие имеющихся технологий по переработке пищевых отходов актуальным вопросом остается необходимость анализа и создания классификационных методов рециклинга пищевых отходов. Особенно важно обеспечить оптимизацию условий проведения перерабатывающих процессов и рационализацию стадий подготовки исходного сырья, обуславливающих выход и качество энергоносителя и вторичных загрязняющих веществ.

Потенциал исследований в данной области заключается в разработке новых стратегий предварительной обработки исходного сырья для максимализации переработки, создании математических моделей управления сложными многостадийными процессами деструкции исходного биоматериала. При этом, важнейшей промышленной задачей является проектирование и масштабирование, необходимые для коммерческой конкурентоспособности и широкого внедрения технологий переработки для производства энергоносителей, и иных полезных продуктов. Переработка пищевых отходов позволяет перейти от системного линейного подхода в пищевой промышленности к циклической биоэкономике.

ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ

Работа была выполнена в Федеральном государственном автономном научном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности». Схема проведения исследований представлена на рис. 2.1.

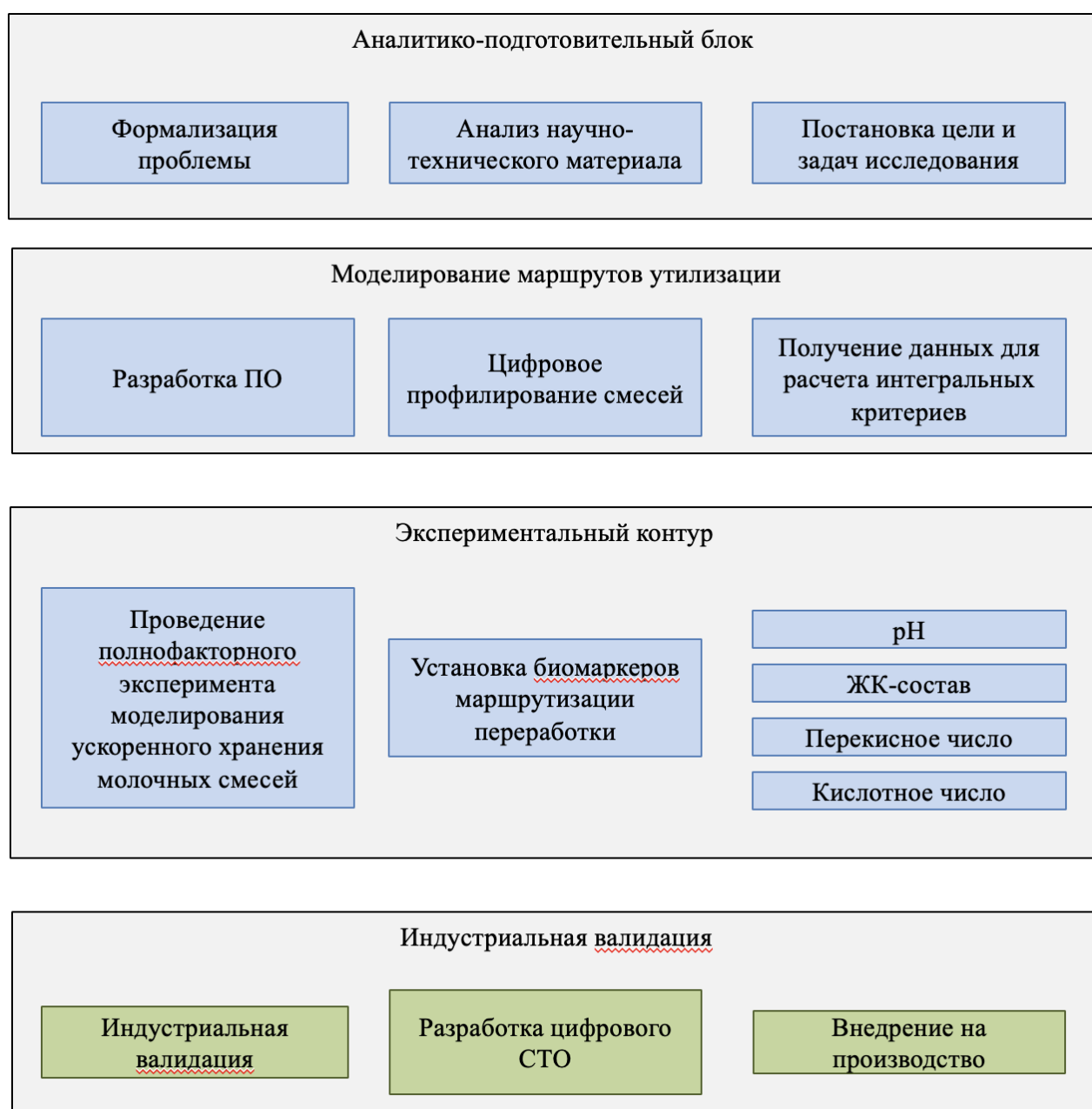


Рисунок 2.1 – Общая схема исследований

Методологическая основа диссертационной работы сформирована на принципах системного и структурного анализа технологически дифференцированных молочных отходов, комплексного применения методов цифрового профилирования, математического моделирования и экспериментального обоснования ключевых стадий рециклинга.

2.1 Методологические этапы

Исследования реализованы в несколько взаимосвязанных этапов, включающих:

Аналитический этап. В рамках аналитического этапа диссертационного исследования осуществлены систематизация и критический анализ современных научных данных, а также нормативно-правовых документов, касающихся рециклинга пищевых отходов, с мониторингом структуры и объемов нереализованной молочной продукции в Российской Федерации и ведущих зарубежных экономиках. Литературный поиск проводился с применением наукометрических баз данных Elibrary (<https://elibrary.ru/>), Google Scholar (<https://scholar.google.com/>), CyberLeninka (<https://cyberleninka.ru/>), ScienceDirect (<https://www.sciencedirect.com/>) и PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>) по ключевым словам: «пищевые отходы», «рециклинг пищевых отходов», «управление отходами», «цифровые системы управления», «нереализованная молочная продукция», «нормативно-правовое регулирование отходов», «технологии переработки молочной продукции». Анализ включил эмпирические и обзорные научные статьи, главы из монографий на русском и английском языках, опубликованные в период с 1985 по 2025 год, а также действующие стандарты, государственные стратегии, программы развития и отраслевые регламенты, с последующей оценкой применимости зарубежных технологий к отечественным условиям переработки. Особое внимание было уделено изучению вклада отечественных

и зарубежных ученых в развитие научных основ переработки пищевых отходов и разработку интеллектуальных систем для их рециклинга, направленных на снижение доли отходов, направляемых на захоронение.

Цифровое профилирование и структурное моделирование.

Разработана и реализована оригинальная схема цифрового профилирования смесей нереализованной молочной продукции с учетом экономической, технологической и экологической составляющих. Для структурного моделирования процессов рециклинга применялись методы математического анализа (матричные методы, иерархическое кластерное моделирование, оценка весовых коэффициентов методом Саати), а также модели оценки критериев целесообразности переработки на основе функции Харрингтона. Интеграция результатов цифрового профилирования в интеллектуальную систему сортировки пищевых отходов осуществлялась с применением технологий машинного обучения, что обеспечило возможность прогнозирования поступления отходов и оптимизации маршрутов их переработки.

Экспериментальный этап. В лабораторных условиях исследовано влияние структуры, компонентного состава и условий хранения молочных смесей на физико-химические показатели и пригодность к различным маршрутам утилизации. Модельные смеси формировались из сливок, сметаны, кефира и их бинарных комбинаций с вариацией массовых долей жира и исходной кислотности. Экспериментальная часть включала:

- Определение показателя активности воды (A_w) сорбционно-емкостным методом на приборе Hygrolab-3;
- Измерение массовой доли белка методом Кьельдаля;
- Анализ физико-химических показателей: условной вязкости (вискозиметр ВЗ-246), активной и титруемой кислотности (рН-метр, ГОСТ 30305.3-95), массовой доли лактозы (поляриметр, ГОСТ Р 54667-2011), кислотного числа (титриметрически по ГОСТ 54760–2011), перекисного числа (йодометрически по ГОСТ 31757–2012);

- Изучение профиля органических кислот методом ВЭЖХ.

Эксперименты проводились в 3-кратной повторности, контрольные точки хранения – 0, 72 и 144 ч при $32\pm 1^\circ\text{C}$. Для оценки деградации жировой фазы применялись регрессионные модели с учетом поправки по уравнению Аррениуса для экстраполяции данных к реальным условиям хранения.

2.2 Объекты исследования

При моделировании ускоренных процессов порчи смешанных молочных систем, состоящих из целесообразных для переработки продуктов, в качестве объектов исследования были взяты сливки, сметана, кефир со сроками годности 90-120% от рекомендованных производителем и их бинарные смеси 50/50 в массовом соотношении. В соответствии с планом полнофакторного эксперимента сформированы шесть модельных композиций с исходной массовой долей жира 2,5–15 %: сливки (ГОСТ 31451–2013) – образец Сл, сметана (ГОСТ 31452–2012) – образец См, кефир (ГОСТ 31454–2012) – образец К, сливки/сметана – образец СлСм, сливки/кефир – образец СлК, сметана/кефир – образец СмК. Все исходные молочные продукты соответствовали требованиям действующей нормативно-технической документации и имели соответствующие сертификаты.

Каждый из образцов с массой (150 ± 1) г перемешивали в течение 30 с при температуре (4 ± 2) $^\circ\text{C}$ мешалкой WG-2001 (Primo Electric, США), герметично закупоривали в стеклянные банки с металлическими крышками и термостатировали без доступа света при (32 ± 1) $^\circ\text{C}$ в течение 144 ч. Эксперимент моделировал закрытую тару во избежание катализации фотоиндуцированного прогоркания посредством фотоинициации медь-хлорофиллового комплекса.

2.3 Методы анализа

Определение условной вязкости образцов осуществляли при помощи метода, основанного на измерении времени истечения ньютоновских жидкостей объемом 100 см³ через калиброванное капиллярное отверстие. Условную вязкость определяли на вискозиметре ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм, при температуре (4±2)°С. Подготовку и использование прибора проводили в соответствии с ГОСТ 8420-2022. Перед измерением образцы перемешивали в течение 30 сек с помощью перемешивающего устройства WG2001.

Под сопло вискозиметра, помещенного в штатив в строго вертикальном положении, устанавливали приемный сосуд на расстояние между выходным отверстием резервуара и приемным сосудом не менее 100 мм. Отверстие сопла закрывали пальцем для исключения вытекания жидкости, а затем медленно, во избежание образования пузырьков воздуха, заполняли резервуар исследуемой пробой до верхней кромки. Образовавшийся мениск удаляли стеклянной пластиной. Открывали выходное отверстие сопла и при начале истечения жидкости из отверстия одновременно включали секундомер. В момент первого прерывания струи жидкости секундомер останавливали и отсчитывали время. За результат измерения принимали среднее арифметическое значение трех измерений времени истечения в секундах с погрешностью не более 0,5 с.

Определение физико-химических показателей объектов исследования проводили по стандартизованным методикам:

– титруемую кислотность измеряли в соответствии с ГОСТ 3624-92 методом с применением индикатора фенолфталеина и навесок, соответствующих типу и реологическим свойствам объектов исследования.

– определение активной кислотности, выраженной в единицах рН, проводили потенциометрическим методом, основанным на измерении разности потенциалов между двумя электродами (измерительным и электродом сравнения), погруженными в анализируемую пробу, в соответствии с ГОСТ 32892-2014 с использованием настольного измерителя Aquasearcher ТМ АВ33РН-В (Ohaus Corporation, США) с точностью

измерений 0,01 рН, оснащенного универсальным заправляемым рН-электродом Starter ST230 в стеклянном корпусе, предназначенным для измерений в суспензиях и эмульсиях.

– массовую долю лактозы определяли поляриметрическим методом в фильтрах продукта после осаждения жировой и белковой фракций в соответствии ГОСТ Р 54667-2011 с использованием сахариметра универсального СУ-4 посредством поляризации без светофильтра в поляриметрической кювете длиной 400 мм.

– 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 гидроксида калия в присутствии индикатора фенолфталеина.

– перекисное число в выделенной из образцов жировой фракции определяли в соответствии с ГОСТ Р 51487-99 методом, основанным на реакции продуктов окисления жиров (перекисей) с йодистым калием в присутствии уксусной кислоты и хлороформа, с последующим количественным определением выделившегося йода посредством титрования тиосульфатом натрия.

– подготовка образцов к анализам включала стадию гомогенизации, для чего применялся гомогенизатор с аналоговым управлением HG-15A-Set-A (Daihan Scientific, Южная Корея, заводской №0400514207M009). Отвешивание навесок проводили с использованием лабораторных электронных весов CAUX-320 (CAS Corporation Ltd., Корея, заводской №D303900041), имеющих действующее свидетельство о поверке ООО «Проммаш Тест Метрология» № С-ДЮП/27-02-2024/319861508 (действительно до 26.02.2025). Концентрация экстрактов осуществлялась на ротационном испарителе ИКА RV 10 (ИКА-Werke GmbH & Co. KG, Германия, заводской № 07.152929, инвентарный № 21013400000100).

– определение жирнокислотного состава образцов выполняли методом газовой хроматографии в соответствии ГОСТ 32915-2014. Разделение и идентификацию жировой фазы проводили с применением газового хроматографа «Кристаллюкс 4000М» исполнение 2 (ООО НПФ «Мета-хром», Россия) с пламенно-ионизационным детектором и капиллярной колонкой.

Метод основан на разделении исследуемых смесей по мере движения по хроматографической колонке посредством многократного распределения между подвижной фазой газа-носителя (азота) и неподвижной жидкой фазой, нанесенной на инертный твердый носитель, которым заполнена колонка. В процессе селективного удержания компонентов смеси происходило их разделение, с последующей регистрацией детектором выходящих из колонки веществ. Для управления режимами анализа, записи хроматограмм и обработки полученной информации использовали программное обеспечение NetChrom v2.1.

Определение профиля органических кислот исследуемых образцов осуществляли методом капиллярного электрофореза. Подготовка проб, включая приготовление растворов электролитов и стандартов, требовала контроля активной кислотности (рН), для чего использовался стационарный рН-метр рН-213 (HANNA Instruments, Германия, заводской №520555), имеющий действующее свидетельство о поверке ООО «Поверие» №С-ДЫТ/01-10-2024/376657173 (действительно до 30.09.2025). Отвешивание навесок реактивов и проб проводили на весах неавтоматического действия GR-300 (A&D Company Ltd., Япония, заводской №14243011) с действующим свидетельством о поверке ООО «Проммаш Тест Метрология» №С-ДЮП/27-02-2024/319861507 (действительно до 26.02.2025).

Непосредственный анализ выполняли в соответствии с утвержденной методикой М 04-47-2012 с использованием системы капиллярного электрофореза «Капель-205» (ООО «Люмекс-Маркетинг», г. Санкт-Петербург, Россия, заводской № 3077). Метод основан на электрофоретическом разделении заряженных частиц в кварцевом капилляре,

заполненном раствором электролита, с последующим фотометрическим детектированием их электрофоретической подвижности при длине волны 254 нм и косвенном детектировании. Прибор обеспечен действующим свидетельством о поверке ФБУ «РОСТЕСТ-МОСКВА» № С-СП/07-06-2024/184803196 от 07.06.2024 (действительно до 06.06.2025), что гарантирует метрологическую прослеживаемость результатов. Сбор, обработку и интерпретацию хроматографических данных осуществляли при помощи специализированного программного обеспечения «Эльфран».

2.4 Математический аппарат и статистическая обработка

Для обеспечения корректности интерпретации результатов и выявления достоверных различий между исследуемыми вариантами молочных композиций, в работе применялся комплекс методов математической статистики, направленных на оценку значимости полученных данных и выявление закономерностей деградации показателей в динамике хранения.

Основным методом проверки статистической значимости различий между группами служил однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с уровнем значимости $\alpha = 0,05$. Применение ANOVA позволяло определить, являются ли различия средних значений изучаемых показателей (например, кислотности, вязкости, содержания жира, лактозы и пр.) статистически значимыми для различных временных точек хранения или компонентного состава смесей. Для подтверждения устойчивости выводов и контроля уровня ошибок первого рода анализ сопровождался вычислением доверительных интервалов для средних значений.

При наличии двух и более независимых факторов (например, вида молочного продукта и срока хранения) применялся многофакторный дисперсионный анализ (многофакторный ANOVA). Попарные различия между группами уточнялись с помощью post-hoc критерия Тьюки (HSD);

выбор именно этого теста обусловлен тем, что он одновременно контролирует уровень ошибки первого рода по всему семейству сравнений, не требуя при этом поправок на множественность в ущерб мощности.

Когда объектом анализа выступали многомерные данные (профиль жирных кислот, комплекс реологических параметров), классический параметрический подход неприменим ввиду отсутствия гарантий нормальности многомерного распределения. В таких случаях использовался пермутационный дисперсионный анализ (PERMANOVA). Метод проверяет значимость факторов на основе реальной структуры расстояний между объектами: в зависимости от природы данных применялась метрика Брея–Кертиса либо евклидово расстояние. Число пермутаций составило 999, что обеспечивало приемлемую статистическую мощность при работе с матрицами жирнокислотного и кислотно-композиционного состава.

Поиск скрытых группировок в данных проводился методами иерархической кластеризации. Перед анализом все количественные переменные стандартизировались (Z-нормализация), иначе признаки с разными единицами измерения или разным диапазоном значений доминировали бы над остальными вне зависимости от реальной информативности. В качестве алгоритма агломерации выбран метод Уорда: на каждом шаге объединяются именно те два кластера, слияние которых дает минимальный прирост суммарной внутрикластерной дисперсии.

Расстояние между кластерами А и В в методе Уорда формально определяется через приращение суммы квадратов ошибок:

$$D(A, B) = \frac{n_A n_B}{n_A + n_B} \times \|\mu_A - \mu_B\|^2, \quad (2.1)$$

где n_A и n_B – количество объектов в кластерах А и В; μ_A и μ_B – векторы средних значений (центроиды) кластеров

Парные линейные связи между признаками оценивались через коэффициент корреляции Пирсона. Поскольку часть распределений отклонялась от нормального, для верификации полученных значений

дополнительно рассчитывался ранговый коэффициент Спирмена, более устойчивый к выбросам и асимметрии. Для оценки силы и направления парных линейных зависимостей между количественными признаками применялся корреляционный анализ с вычислением коэффициентов корреляции Пирсона. Для проверки устойчивости связей, особенно при отклонении от нормального распределения, дополнительно рассчитывался коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Это позволило количественно оценить, например, степень связанности между динамикой кислотности и изменением состава жировой фазы. Статистическая обработка данных выполнена с использованием специализированного программного обеспечения.

Визуализация результатов анализа осуществлялась с использованием специализированных программных средств: Python 3.11 (библиотеки `pandas`, `matplotlib`, `scipy`, `scikit-learn`) – для построения графиков динамики, дендрограмм, поверхностей отклика и матриц рассеяния, а также для реализации собственных скриптов кластерного и регрессионного анализа; `ObservableHQ` – для интерактивных визуализаций (`heatmaps`, многофакторные графики, 3D-поверхности отклика), облегчающих представление комплексных взаимосвязей в данных, а также для разработки программного обеспечения и расчетных модулей для поддержки экспериментальных решений (в частности, для мультикритериального анализа, расчета интегральных оценок по функции Харрингтона и сценарного прогнозирования); `Microsoft Excel` – для предварительной обработки массивов данных, расчета статистических характеристик и построения базовых графиков; `Wolfram Mathematica` – для разработки и реализации алгоритмов расчета интегральных показателей и структурных моделей, а также для аналитического описания регрессионных и кинетических уравнений (уравнений Аррениуса, аппроксимаций динамики кислотного и перекисного чисел).

Одним из прикладных инструментов при качественной оценке показателей, характер которых можно оценить только сравнительным

способом (какими являются возможности для утилизации молочных продуктов с предельным сроком годности для регионов РФ), является функция желательности Харрингтона.

Идея функции Харрингтона лежит в преобразовании значений критериев в безразмерную шкалу желательности, позволяющую сравнивать и комбинировать характеристики различной природы. Она устанавливает соответствие между психо-лингвистическими оценками экспертов и натуральными показателями критериев, к тому же, она обладает всеми необходимыми практическими свойствами характеристической функции.

Функция Харрингтона в общем виде имеет вид:

$$d(y) = e^{\{-e^{-(b_0 + b_1 y)}\}} \quad (2.2)$$

где $d(y)$ – некая функция, устанавливающая соответствие между значениями исследуемого критерия и безразмерной шкалой. На практике она почти всегда линейная, отвечающая за сдвиг и крутизну кривой функции Харрингтона, в соответствии с прикладными потребностями. Она подбирается таким образом, чтобы соответствовать устоявшемуся отображению интервалов значений функции на лингвистическую переменную желательности: "очень хорошо" – (0.8, 1), "хорошо" – (0.63, 0.8), "удовлетворительно" – (0.37, 0.63), "плохо" – (0.2, 0.37), "очень плохо" – (0, 0.2).

Если имеется n критериев с соответствующими функциями желательности $d_i(x)$, то консолидированная оценка выражается взвешенным геометрическим средним:

$$D = \prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \quad (2.3)$$

Так как для каждого продукта будет даваться единый интегральный критерий, отвечающий возможности утилизации этого продукта, то для отдельных показателей будут указаны соответствующие веса, использованные при расчете критерия. Веса будут определяться экспертно.

Для каждого критерия будут указываться два значения, соответствующие двум значениям желательности: 0.63 (будет браться средний показатель по Российской Федерации, как барьерный эталонный показатель приемлемости, за исключением случаев, когда большое количество выбросных данных смещает показатель по РФ) и одно дополнительное значение, специфичное для каждого конкретного критерия. В силу линейности функции $Y(x)$, вся функция Харрингтона восстанавливается по двум значениям.

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:

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

$$\frac{k_{32}}{k_5} = \exp \exp \left(-\frac{E_a}{R} \times \left(\frac{1}{T_{32}} - \frac{1}{T_5} \right) \right) \quad (2.4)$$

В ходе выполнения диссертационного исследования для обоснования весовых коэффициентов ключевых критериев целесообразности переработки и рециклинга нереализованной молочной продукции использован метод анализа иерархий Саати (Analytic Hierarchy Process, АНР). Данный подход зарекомендовал себя как один из наиболее эффективных инструментов принятия решений в условиях многокритериальности и неопределенности, широко применяемый при оптимизации технологических и экологических процессов в пищевой промышленности.

Применение метода Саати в рамках работы включало следующие этапы:

1. Формализация задачи и построение иерархии. На первом этапе формировалась иерархическая структура проблемы, включающая целевую функцию (определение целесообразности переработки отходов), критерии

первого уровня (экономическая целесообразность, технологическая оснащенность, экологическое воздействие), а также частные подкритерии, определяющие значимость отдельных аспектов переработки (например, объем отходов, потенциал рынка сбыта, инвестиции, количество способов утилизации, текущий экологический ущерб и др.).

2. Проведение парных сравнений критериев. Для получения объективных весовых коэффициентов критериев был организован опрос 18 экспертов (специалистов в области переработки молока, промышленной экологии и устойчивого развития), рассылка которым осуществлялась через сеть Интернет, которые осуществляли парные сравнения критериев по девятибалльной шкале Саати, определяя относительную значимость каждого из них в контексте выбранной цели.

3. Построение и обработка матрицы парных сравнений. На основе экспертных оценок формировалась матрица парных сравнений, в которой каждому элементу присваивалось значение согласно результатам опроса. Согласованность экспертных суждений проверялась с помощью индекса согласованности (Consistency Ratio, CR). В работе был достигнут высокий уровень согласованности с отношением согласованности 0,057 (допустимый уровень $< 0,1$ по Саати), что подтверждает статистическую достоверность весов.

4. Расчет весовых коэффициентов.

После нормализации и анализа матрицы парных сравнений вычислялись локальные и глобальные веса критериев посредством метода главного собственного вектора. Полученная структура весов сравнивалась с приоритетами устойчивого развития и минимизации экологического ущерба при выборе направлений рециклинга, что соответствует мировым трендам и Целям устойчивого развития ООН (ЦУР 12).

5. Внедрение весов в интегральную модель.

Итоговые весовые коэффициенты были интегрированы в расчетную модель консолидированной оценки целесообразности переработки по

функции Харрингтона и использованы для принятия решений в интеллектуальной системе сортировки и маршрутизации молочных отходов.

2.5 Методология прогнозного моделирования сырьевых потоков

В целях формализации процесса планирования и минимизации операционных рисков, связанных со стохастическим характером поступления сырья, в исследовании применен аппарат анализа временных рядов. Основным инструментом выбрана сезонная авторегрессионная интегрированная модель скользящего среднего (SARIMA).

Общая модель SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)[s] описывается следующим стохастическим разностным уравнением:

$$\phi_p(B)\Phi_P(B^s)\nabla^d\nabla_s^D y_t = c + \theta_q(B)\Theta_Q(B^s)\varepsilon_t \quad (2.5)$$

или, в эквивалентной развернутой форме:

$$(1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p)(1 - \Phi_1 B^s - \dots - \Phi_P B^{\{sP\}})(1 - B)^d(1 - B^s)^D y_t = c + (1 + \theta_1 B + \dots + \theta_q B^q)(1 + \Theta_1 B^s + \dots + \Theta_Q B^{\{sQ\}})\varepsilon_t \quad (2.6)$$

где:

(y_t) – наблюдаемое значение временного ряда в момент t.

(B) – оператор лага (лаг-оператор): ($B y_t = y_{\{t-1\}}$).

($\nabla^d = (1 - B)^d$) и ($\nabla_s^D = (1 - B^s)^D$) – операторы несезонного и сезонного дифференцирования порядков d и D соответственно.

($\phi_p(B) = 1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p$) – полином авторегрессии несезонной части порядка p.

($\Phi_P(B^s) = 1 - \Phi_1 B^s - \dots - \Phi_P B^{\{sP\}}$) – полином авторегрессии сезонной части порядка P с периодом s.

($\theta_q(B) = 1 + \theta_1 B + \dots + \theta_q B^q$) – полином скользящего среднего несезонной части порядка q.

$(\theta_Q(B^s) = 1 + \theta_1 B^s + \dots + \theta_Q B^{\{sQ\}})$ – полином скользящего среднего сезонной части порядка Q.

c – константа модели.

(ε_t) – процесс белого шума.

Период сезонности s в данной работе определен как 7 (для учета недельной цикличности).

Для учета влияния внешних детерминированных факторов (праздники, погодные условия) применялось расширение модели до SARIMAX, общее уравнение которой с k экзогенными переменными имеет вид:

$$\phi_p(B)\Phi_P(B^s)\nabla^d\nabla_s^D y_t = c + \sum_{\{i=1\}}^k \beta_i x_{\{i,t\}} + \theta_q(B)\theta_Q(B^s)\varepsilon_t \quad (2.7)$$

где $(x_{\{i,t\}})$ – значение i -й экзогенной переменной в момент t , а β_i – ее коэффициент.

2.6 Индустриальная апробация

Разработанная методология апробирована на трех предприятиях молочной промышленности, что подтверждено актами внедрения. Разработан и внедрен цифровой стандарт предприятия (СТО 0023498–022–2025), обеспечивающий автоматизированное принятие решений о маршрутах утилизации молочных отходов с использованием интеллектуальной системы сортировки.

ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СТРУКТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЦИКЛИНГА НЕПЕРЕРАБОТАННОЙ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ

В главе представлены теоретические и методические основания выбора математического аппарата, используемого для структурного моделирования процессов рециклинга непереработанной 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.

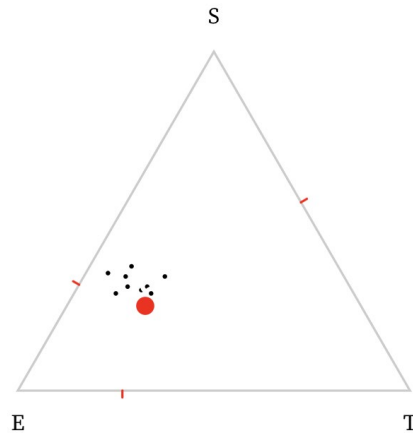


Рисунок 3.1 – Определение весовых коэффициентов признаков целесообразности утилизации. Точками отмечены веса, присвоенные экспертами

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. 3.1) 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. 3.1) и определены их значения, соответствующие основным переходным точкам (0,37, 0,63, 0,8, 0,99) функции Харрингтона:

$$d(x) = e^{\{-e^{\{-a(x-b)\}}\}} \quad x \in R \quad (3.1)$$

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 табл. 3.2.

Программа предназначена для анализа экономической, технологической и экологической обоснованности переработки или утилизации нереализованной продукции. Она помогает определить, какие объемы молочной продукции с остаточным сроком годности рационально переработать с целью минимизации убытков и снижения негативного воздействия на окружающую среду. Основной акцент программы делается на трех ключевых аспектах: экономическая целесообразность, технологическая оснащенность и экологическое воздействие. Программа учитывает наличие экспертных мнений, которые играют важную роль в оценке эффективности переработки. Также оценивается количество доступных технологий утилизации и переработки продукции. Объемы нереализованной продукции анализируются с точки зрения экономической целесообразности и текущих способов утилизации.

Таблица 3.1 – 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 3.2 – 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

$a \pm s$, 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:

$$D_p = S \left(\prod_{j \in \{1,3,5,6\}} d_j(x_j)^{w_{sj}} \right)^{\frac{1}{\sum_{k \in \{1,3,5,6\}} w_{sk}}} + T \left(\prod_{j \in \{1,2,4,6\}} d_j(x_j)^{w_{tj}} \right)^{\frac{1}{\sum_{k \in \{1,2,4,6\}} w_{sk}}} + E \left(\prod_{j \in \{1,3,4,7\}} d_j(x_j)^{w_{ej}} \right)^{\frac{1}{\sum_{k \in \{1,3,4,7\}} w_{sk}}} \quad (3.2)$$

Где $d_i(x)$ – значение функции желательности для i -го критерия, x – абсолютное значение критерия, w_{x_l} – вес критерия l в интегральном показателе желательности для признака X (см. табл. 3.1).

Методология расчета была реализована в виде облачного программного обеспечения (см. рис. 3.2). 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. 3.2). 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.



Интегральный уровень желательности: 0.69

Рисунок 3.2 – Расчет интегрального уровня целесообразности переработки кефира. Уровень 0.69 соответствует показателю «переработка целесообразна».

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ БИОМАРКЕРОВ ПОРЧИ ПРИ МАРШРУТИЗАЦИИ ПОТОКОВ НЕРЕАЛИЗОВАННОЙ МОЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ

Для получения зависимостей критических биомаркеров порчи, которые закладываются в интеллектуальную систему сортировки непереработанной молочной продукции, был осуществлен дизайн и проведен эксперимент по исследованию влияния структуры пищевых отходов и факторов хранения на физико-химические показатели рекондиционированной 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) °С 30 с мешалкой Primo WG-2001, герметично укупоривали в стеклянные контейнеры и термостатировали при (32 ± 1) °С в течение 144 ч (см. рис. 4.1). Контрольные точки отбора составляли 0, 72 и 144 ч хранения, что позволило проследить кинетику деградации на начальном, среднем и завершающем этапах ускоренного испытания.

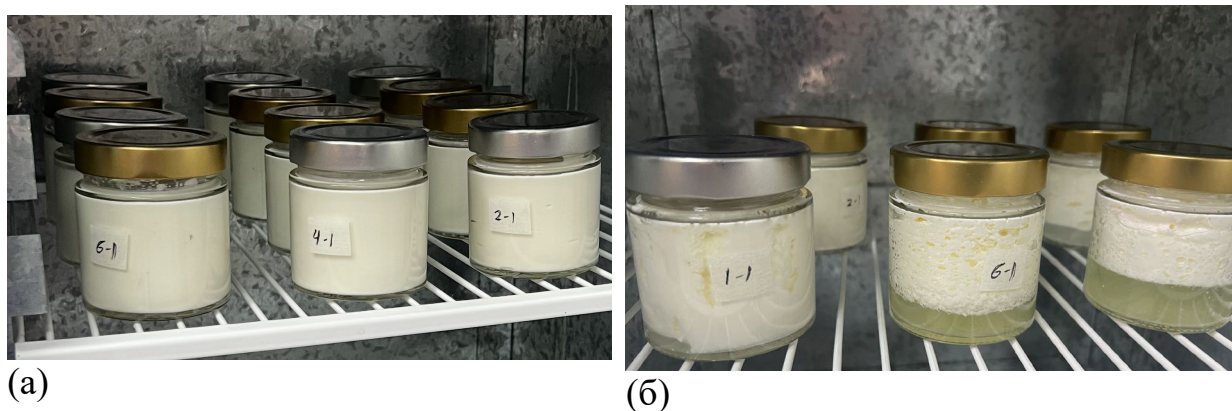


Рисунок 4.1 – Внешний вид образцов смешанных молочных продуктов до (а) и (б) после ускоренного хранения

Данные по физико-химическим показателям эксперимента представлены в таблице 4.1.

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:

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

$$\frac{k_{32}}{k_5} = \exp \exp \left(-\frac{E_a}{R} \times \left(\frac{1}{T_{32}} - \frac{1}{T_5} \right) \right) \quad (4.1)$$

где k_{32}, k_5 – модели Аррениуса для температур 32 °С и 5 °С, соответственно; E_a – энергия активации, принятая равной 66,7 кДж·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 4.1 – 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:

$$t_5 = t_{32} \frac{k_5}{k_{32}} = 144 \text{ ч} \times 12,8 \approx 18,4 \times 10^2 \text{ ч} (77 \text{ сут}) \quad (4.2)$$

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. 4.1). За 144 ч титруемая кислотность сливок возросла с 16°Т до 136°Т (рост в 8,5 раз, $p < 0,05$), рН 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.

При анализе учитывался индекс атерогенности (IA, иногда AI) – это расчетный показатель, который оценивает «атерогенный потенциал» жирового субстрата, то есть его способность способствовать отложению липидов в стенках сосудов и, соответственно, развитию атеросклероза. В пищевой химии и нутрициологии для охарактеризования жирового профиля продуктов применяют формулу Улбрихта и Саутгейта – наиболее распространенную на сегодняшний день:

$$IA = \frac{C12:0 + 4 * C14:0 + C16:0}{\Sigma MЖК + \Sigma ПНЖК} \quad (4.3)$$

где

- C12:0 – лауриновая кислота,
- C14:0 – миристиновая кислота (умножается на 4, поскольку считается наиболее атерогенной),
- C16:0 – пальмитиновая кислота,
- $\Sigma MЖК$ – суммарные мононенасыщенные жирные кислоты,
- $\Sigma ПНЖК$ – суммарные полиненасыщенные жирные кислоты.

Чем ниже IA, тем благоприятнее жирнокислотный состав:

- $IA < 1$ – условно «кардиозащитный» профиль;
- $IA = 1-2$ – умеренный риск;

- $IA > 2$ – повышенный атерогенный потенциал (типично для немодифицированного молочного жира).

В процессе эксперимента установлено, что при ускоренном хранении образцов при 32 °С PV возрастает с 0,7–0,9 до 5,1–6,6 мэкв/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. Полнофакторный эксперимент представлен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Сетка для построения моделей AV и PV

Образец	х (сметана)	у (кефир)	1-х-у (сливки)
См	1	0	0
К	0	1	0
Сл	0	0	1
Сл + См	0.5	0	0.5
Сл + К	0	0.5	0.5
См + К	0.5	0.5	0

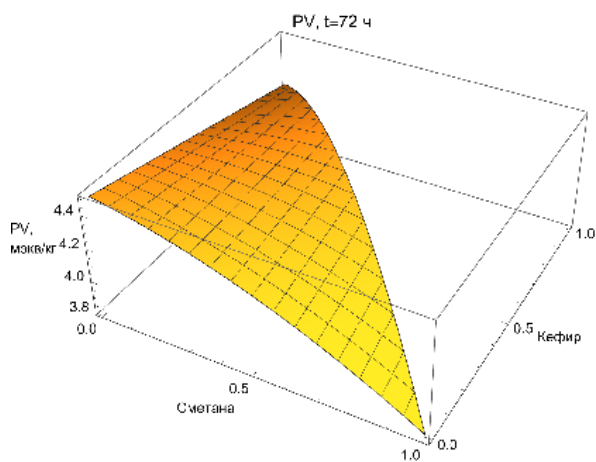
Лауриновая, миристиновая и пальмитиновая кислоты относятся к насыщенным средне- и длинноцепочечным фракциям, которые увеличивают уровень плазменного холестерина и способствуют образованию атерогенных липопротеинов. Напротив, моно- и полиненасыщенные кислоты обладают гипохолестеринемическими и противовоспалительными свойствами, поэтому присутствуют в знаменателе формулы. На практике, при анализе жирнокислотного состава образцов, снижение IA в среднем на 12 % по мере хранения смесей указывает на относительный сдвиг жирового профиля в сторону мононенасыщенных фракций и, следовательно, на потенциально более благоприятные свойства выделяемого жира с точки зрения питания или кормовых применений, при условии, что остальные его показатели качества и безопасности остаются в норме.

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:

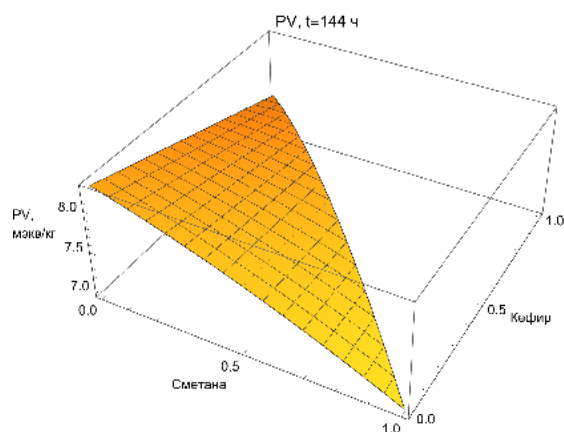
$$\begin{aligned}
 PV(x, y, t) &= 0.71 + 0.052t + 0.34x - 0.008tx - 0.4x^2 + 0.18y \\
 &\quad - 0.006ty + 1.2xy \\
 AV(x, y, t) &= 0.54 + 0.012t - 0.2x + 0.4x^2 + 0.28y - 0.001ty \\
 &\quad + 0.4xy + 0.2y^2
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

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 (4.1)). 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 (4.4) представлены на рис. 4.2.

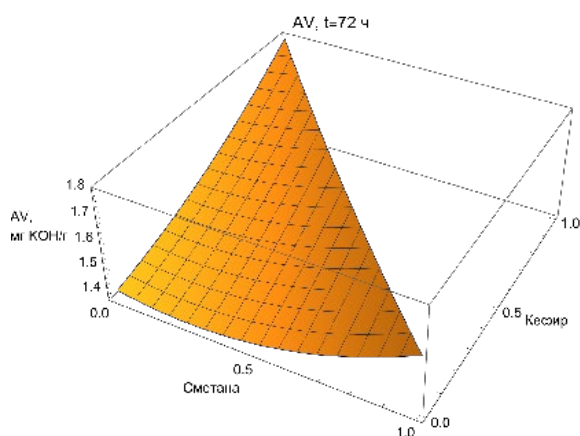
Согласно ГОСТ 31757-2012 и ГОСТ 54760-2011 предельные значения для пищевых жиров составляют $PV < 5$ мэкв/кг и $AV < 2,5$ мг КОН/г. Модель указывает, что критический переход за пределы кормовой пригодности наступает уже после 72 ч при 32 °С, точные временные значения заложены в интеллектуальную сортировочную модель согласно уравнениям (4.4). 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.



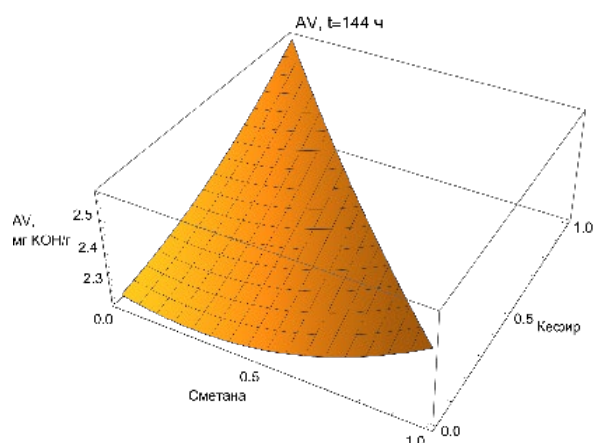
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 4.2 – 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.

Для уточнения критических точек утилизации был дополнительно исследован профиль органических кислот молочных смесей в динамике хранения (см. табл. 4.3). Баланс органических кислот напрямую связан с отношением ХПК/БПК, следовательно, влияет на модель совокупной оценки жизненного цикла воздействия на окружающую среду.

Таблица 4.3 – 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, бесконтрольное 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. 4.3, только кефир находился в данной стадии ацидогенеза), что повышает рацемизацию и влечет за собой использование экономически нецелесообразных методов фракционирования – такой субстрат после жиороотделения направляется на анаэробное сбразивание.

4.1 Интеграция данных об органических кислотах в систему критериев переработки жировой фазы возвратной молочной продукции

Формирование комплексной системы оценки пригодности возвратной молочной продукции к определенному маршруту рециклинга предполагает расширение аналитической базы за счет включения профиля органических кислот, прежде всего молочной, уксусной и лимонной, в дополнение к стандартно применяемым показателям перекисного числа (PV) и кислотного числа (AV). Динамика концентраций указанных соединений отражает микробиологические и биохимические процессы, предшествующие нарастанию AV и, в определенной мере, PV, что обуславливает их значимость как маркеров раннего предупреждения о деградации жировой фазы. Интеграция данных об органических кислотах с показателями окислительной и гидролитической порчи позволяет перейти от двухпараметрической модели PV/AV к многоуровневой системе принятия технологических решений.

4.1.1 Интеграционные критерии и пороговые значения

Анализ закономерностей накопления органических кислот в молочном сырье на различных стадиях хранения позволяет выделить три ключевых блока контроля, характеризующих интенсивность ферментативных и микробиологических процессов. Суммарная концентрация молочной и уксусной кислот $\Sigma(LA + AA)$ служит интегральным показателем ферментативной активности. При значениях $\Sigma(LA + AA) < 5$ г/л, соответствующих фону свежего продукта, ферментативная активность остается низкой, а показатели PV и AV находятся в пределах, допустимых для пищевого использования ($PV < 3$ мэкв/кг; $AV < 1$ мг КОН/г); рекомендуется пищевой маршрут с применением мягкой рафинации. В диапазоне 5-15 г/л

наблюдается начало интенсивного ферментативного гидролиза: AV нарастает экспоненциально и опережает рост PV на 24-36 ч, что соответствует точке предобработки для кормового или технического жира. Если суммарная концентрация органических кислот $\Sigma(LA + AA)$ превышает 15 г/л, это указывает на глубокое брожение с pH ниже 4,4. В таких условиях кислотное число AV приближается к 10 мг KOH/г, а перекисное число PV достигает 7-10 мэкв/кг, что фактически предопределяет единственный технологически обоснованный маршрут для данного сырья - переработку в технический жир путем омыления.

Концентрация лимонной кислоты служит индикатором интенсивности окислительного декарбоксилирования. При $CA < 0,2$ г/л этот процесс практически не выражен, и сырье можно считать свежим. Иная картина наблюдается при снижении концентрации лимонной кислоты более чем вдвое от исходного уровня: это свидетельствует об активации цикла Кребса и цитратлиазного метаболизма с накоплением активных радикалов. В подобных условиях локальный температурный коэффициент Q10 превышает 3, что заметно ускоряет прирост PV и требует оперативного решения о проведении дезодорации.

Соотношение уксусной и молочной кислот (AA/LA) позволяет установить, какой тип брожения преобладает в образце. Значения AA/LA ниже 0,1 характерны для доминирующего молочнокислого брожения: в этом случае AV растет быстрее PV, а переход сырья в категорию кормового использования прогнозируется в течение 3-4 суток. Диапазон 0,1-0,3 соответствует смешанному брожению; при этом PV, как правило, находится вблизи отметки 5 мэкв/кг, которая является практической границей между пищевым и техническим направлением переработки. При AA/LA выше 0,3 картина меняется: преобладает уксуснокислое брожение, PV превышает 7 мэкв/кг, нарастает содержание вторичных альдегидов, и целесообразно рассмотреть биогазовый маршрут утилизации.

Перечисленные пороговые критерии систематизированы в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Интеграционные пороговые критерии органических кислот и их связь с показателями PV и AV

Блок контроля	Пороговое значение	Характер изменений	Связь с PV / AV	Рекомендация по переработке
$\Sigma(LA + AA)$, г/л	< 5 (фон свежего продукта)	Ферментативная активность низкая	PV < 3 мэкв/кг; AV < 1 мг КОН/г	Пищевой маршрут, мягкая рафинация
	5 – 15	Начало интенсивного ферментативного гидролиза	AV нарастает экспоненциально, опережая PV на 24–36 ч	Точка предобработки; кормовой / технический жир
	> 15	Глубокое брожение; pH < 4,4	AV \approx 10 мг КОН/г; PV = 7–10 мэкв/кг	Перевод в технический жир (омыление)
Лимонная кислота (CA), г/л	< 0,2 (исходный уровень)	Окислительное декарбоксилирование отсутствует		
	Снижение > 50 % от исходного	Активирован путь Кребса / цитратлиазы; рост активных радикалов	PV ускоряется (Q_{10} локально > 3)	Ускорение принятия решения о дезодорации
Отношение AA / LA	< 0,1	Преобладание молочнокислого брожения	AV нарастает быстрее PV	Прогноз перехода в кормовой

Блок контроля	Пороговое значение	Характер изменений	Связь с PV / AV	Рекомендация по переработке
				маршрут через 3–4 сут
	0,1 – 0,3	Смешанное брожение	Соответствие переходной зоне PV ≈ 5 мэкв/кг	Переход: пищевой → технический жир
	> 0,3	Преобладание уксуснокислого брожения (ААВ); рост вторичных альдегидов	PV > 7 мэкв/кг	Рекомендовано рассмотрение биогазового маршрута

4.1.2 Выводы по AV и PV

По совокупности выявленных закономерностей можно сформулировать три концептуальных положения, определяющих практическую ценность включения данных об органических кислотах в систему мониторинга жировой фазы. Первое касается возможности раннего обнаружения критических изменений качества сырья. Суммарная концентрация молочной и уксусной кислот нарастает до 5-8 г/л еще до того, как AV достигает 2,5 мг КОН/г, а PV - 5 мэкв/кг. Это дает временное опережение порядка 24-36 ч, достаточное для того, чтобы своевременно инициировать мягкую рафинацию и удержать сырье в пищевой зоне, не дожидаясь необратимого ухудшения качества. Второе положение связано с оптимизацией энергетических затрат при переработке. Сочетание AA/LA > 0,3 и PV в диапазоне 7-10 мэкв/кг указывает на то, что

многоступенчатая схема отбеливания и дезодорации экономически не оправдана: затраты на нее не соответствуют достижимому качеству конечного продукта. В таких условиях прямое омыление с получением мыла или биодизеля оказывается предпочтительным как по себестоимости, так и по выходу целевого продукта. Третье положение определяет граничные условия для применения биогазового маршрута. Если одновременно наблюдается $AV > 25$ мг КОН/г и суммарная концентрация органических кислот $\Sigma(OK) > 20$ г/л, выделение жировой фракции в самостоятельный продукт нецелесообразно. Такой субстрат рациональнее направить в анаэробный реактор: высокая концентрация летучих жирных кислот сокращает фазу гидролиза и ускоряет метаногенез, что повышает удельный выход биогаза.

4.1.3 Двухуровневая схема контроля

Включение анализа органических кислот в систему мониторинга возвратной молочной продукции формирует двухуровневую схему контроля качества. Первый уровень представлен органическими кислотами как ранними ферментативными маркерами, фиксирующими начальные стадии деградации до манифестации значимых изменений PV и AV. Второй уровень образуют показатели PV и AV как суммарные индикаторы окислительной и гидролитической порчи, подтверждающие тенденции, выявленные на первом уровне.

Такое комбинированное наблюдение повышает точность прогнозирования качества сырья, снижает риск потерь пищевой ценности и обеспечивает научно обоснованный выбор технологической стратегии – от возврата продукции в пищевые цепочки до ее направления на получение биотоплива. Практическая значимость предложенной схемы обусловлена, в частности, тем, что органические кислоты определяются доступными хроматографическими методами (ВЭЖХ) и могут быть включены в

стандартные протоколы входного контроля без существенного увеличения аналитической нагрузки.

4.1.4 Технологический потенциал обезжиренного концентрата как субстрата для ферментационного получения молочной кислоты

Обезжиренный концентрат, образующийся после сепарации жировой фазы, представляет собой потенциально ценный субстрат для ферментационного получения молочной кислоты при условии устранения ряда технологических и нормативных ограничений. Промышленная целесообразность данного направления определяется совокупностью факторов, систематизированных в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Ограничивающие факторы и меры коррекции при использовании обезжиренного концентрата для молочнокислой ферментации

Группа факторов	Потенциальные ограничения	Технологические меры коррекции
Состав субстрата	Недостаток сбраживаемых углеводов (лактоза < 30 г/л). Высокая остаточная концентрация свободных жирных кислот и пероксидов ингибирует рост бактерий.	Дополнение лактозой, глюкозой или ультрафильтратом сыворотки. Удаление остаточного жира и пероксидов активированным углем или центрифугированием до < 0,2% (масс./масс.).
Микробиологический фон	Наличие термостойких спор <i>Bacillus spp.</i> , уксуснокислых бактерий, дрожжей – риск побочного образования уксусной кислоты и этанола.	Быстрая пастеризация 90 °С / 10 с с последующим охлаждением до 37 °С; коррекция рН до ≈ 6,0 перед инокуляцией.

Группа факторов	Потенциальные ограничения	Технологические меры коррекции
Минеральный состав / буферность	Низкая буферная емкость ⇒ резкое снижение pH < 4,0 → ингибирование бактерий. Избыток Na ⁺ / K ⁺ (> 60 мэкв/л) при использовании рассольного концентрата.	Поддержание pH 5,5–6,0 с применением CaCO ₃ / Mg(OH) ₂ .
Конкурирующие маршруты использования	При AV > 10 мг КОН/г и Σ летучих кислот > 20 г/л субстрат целесообразнее направить на биогазовый маршрут, а не на ферментацию.	Сравнение экономики: выход L-лактата (0,6–0,9 кг/кг сахара) против выхода биометана (0,35 м ³ /кг ХПК).
Очистка продукта	Высокая зольность и содержание белкового азота затрудняют мембранно-ионную очистку.	Микрофльтрация + декатионизация либо эстерификационно-рафинационная схема: Са-лактат – Н-лактат.
Нормативные требования	Согласно ТР ТС 021/2011, пищевая L-молочная кислота нормируется по содержанию фосфора, железа, мышьяка; концентрация пероксидов < 0,1 мэкв/кг.	Анализ микро- и токсичных элементов; при несоответствии – переориентация на техническое применение (силосный консервант, кормовой Са-лактат).

Необходимым условием проведения эффективной молочнокислой ферментации является содержание сбраживаемых углеводов – прежде всего лактозы – не менее 30 г/л. При недостаточном их уровне субстрат подлежит

дополнению лактозой, глюкозой или ультрафильтратом сыворотки. Высокая остаточная концентрация свободных жирных кислот и пероксидов ингибирует рост молочнокислых бактерий, поэтому перед ферментацией необходима очистка активированным углем или центрифугированием до остаточного содержания жира $< 0,2\%$.

Для подавления термостойкой контаминирующей микрофлоры рекомендуется быстрая пастеризация при $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 10 с с последующим охлаждением до $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ и корректировкой pH до значения $\approx 6,0$ перед инокуляцией. Поддержание pH в рабочем диапазоне 5,5–6,0 обеспечивается введением CaCO_3 или $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

Технологическая последовательность включает следующие этапы: (1) отделение жира на дисковом сепараторе до остаточного содержания $< 0,2\%$; (2) пастеризация или стерилизация обезжиренной фазы; (3) коррекция углеводно-минерального баланса (подпитка лактозой, раскисление CaCO_3); (4) инокуляция гомоферментативными штаммами *Lactobacillus plantarum* или *L. casei* при $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 24–48 ч; (5) отделение биомассы и очистка молочной кислоты (микрофильтрация – ионный обмен – вакуум-испарение).

Маршрут является экономически обоснованным при содержании сбрасываемых углеводов $> 30\text{ г/л}$ и значении AV $< 10\text{ мг КОН/г}$; теоретический выход молочной кислоты достигает 70–80% от расчетного. При AV $> 10\text{ мг КОН/г}$ и высокой доле летучих жирных кислот затраты на очистку конечного продукта превышают получаемый экономический эффект, в связи с чем предпочтителен биогазовый маршрут. Следует отметить дополнительную ценность процесса: биомасса, образующаяся в ходе ферментации (около 3 г/л сухого вещества), может быть использована в качестве кормового пробиотика, что улучшает экономический баланс направления.

4.1.5 Влияние исходной концентрации молочной кислоты на экономику ферментационного процесса

Присутствие в субстрате молочной кислоты на уровне 15 г/л до начала ферментации следует рассматривать как потенциальный технологический актив при условии грамотного управления кислотнo-щелочным балансом. Данная концентрация эквивалентна экономии 15-20% сахарной подпитки относительно базового процесса, поскольку соответствующее количество LA уже синтезировано без дополнительного расхода углеводного субстрата. Сравнительная характеристика технологических параметров базового процесса и процесса с исходной концентрацией LA 15 г/л представлена в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Сравнительная характеристика технологических параметров ферментации при различном начальном содержании молочной кислоты

Параметр	Без начальной молочной кислоты (базовый процесс)	С 15 г/л начальной молочной кислоты	Влияние на процесс
Стартовый pH	6,0 ± 0,2 (после коррекции)	≈ 4,2–4,4	Требуется коррекция до 5,5–6,0 введением CaCO ₃ / NaOH
Расход сбраживаемых углеводов	80–100 г/л для достижения целевых 90–110 г/л молочной кислоты	60–80 г/л (экономия 15–20%)	Снижение затрат на сырье или ультрафильтрат

Параметр	Без начальной молочной кислоты (базовый процесс)	С 15 г/л начальной молочной кислоты	Влияние на процесс
Буферная нагрузка	Нормальная	Повышенная (большой объем солей лактата)	+10–15% осадка Са-лактата; увеличение объема шлама
Итоговая концентрация молочной кислоты	90–110 г/л	105–125 г/л или прежняя при меньшем расходе сахара	Сокращение длительности цикла на 1,0–1,5 сут.

Вместе с тем субстрат с исходной молочной кислотой в 15 г/л имеет рН в диапазоне 4,2–4,4, тогда как для эффективной инокуляции необходим диапазон 5,5–6,0, что требует введения нейтрализующих агентов (СаСО₃ или NaOH). Буферная нагрузка при этом возрастает на 10–15% вследствие накопления кальций-лактатного осадка и соответствующего увеличения объема шлама. Экономическая целесообразность данного маршрута определяется соотношением стоимости нейтрализующих агентов и стоимости углеводного сырья, которое не потребуются добавлять: при благоприятном соотношении рыночных цен итоговая концентрация молочной кислоты достигает 105–125 г/л при сокращении длительности ферментационного цикла на 1,0–1,5 суток.

Таким образом, наличие в возвратной молочной продукции предсуществующего пула молочной кислоты не является технологическим препятствием и при надлежащей рН-коррекции трансформируется в конкурентное преимущество по критериям материальной эффективности и производительности процесса.

При оценке жирнокислотного профиля образцов (см. рис. 4.3) 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.

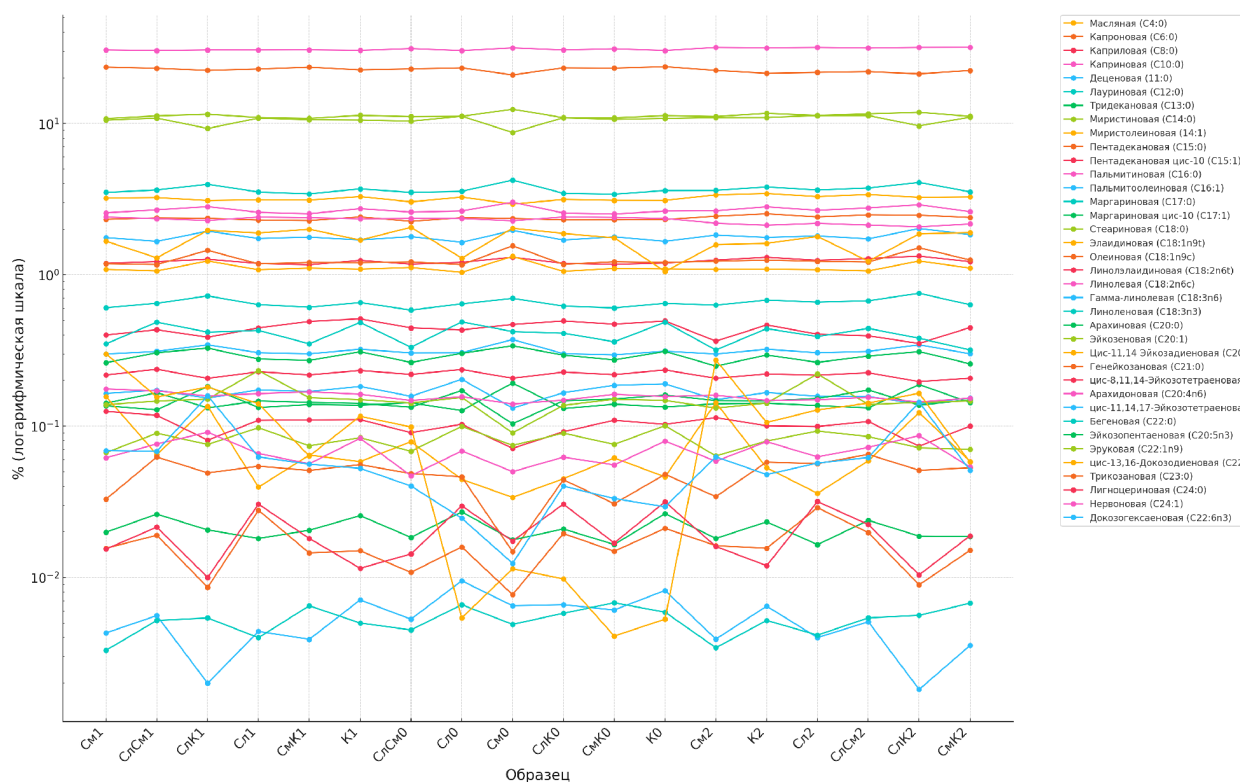


Рисунок 4.3 – Динамика жирнокислотного состава образцов в хранении (обозначения: 0 – контроль, 1 – 72 ч хранения, 2 – 144 ч хранения)

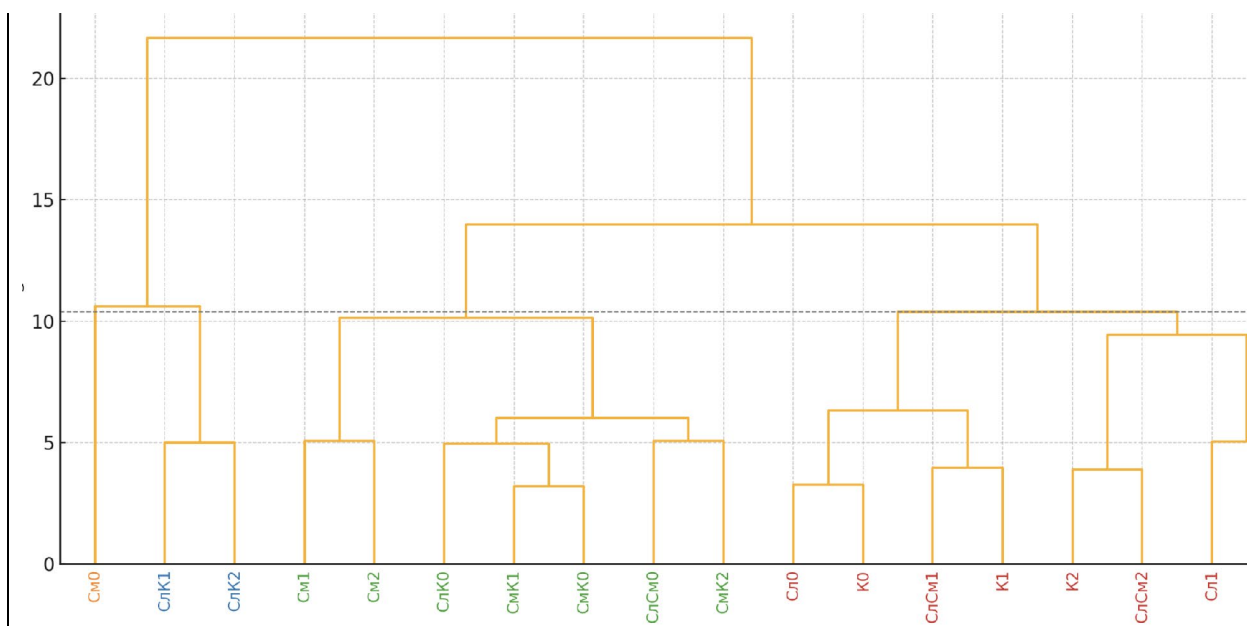


Рисунок 4.4 – Кластерный иерархический анализ образцов смесей молочной продукции в хранении

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. 4.4). 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 (С16:1, С18:1) 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.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ НЕРЕАЛИЗОВАННОЙ МОЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ, ИНВАРИАНТНОЙ ОТНОСИТЕЛЬНО ВХОДЯЩЕГО СОСТАВА

5.1 Концептуальные основы инвариантной схемы маршрутизации возвратной молочной продукции

Разработка единой технологической схемы переработки нереализованной молочной продукции сопряжена с принципиальной неоднородностью входящего сырья: партии, поступающие на переработку, различаются по кислотности, степени окисления жировой фазы, жирности, микробиологическому фону и срокам хранения. Инвариантность схемы в данном контексте означает ее способность однозначно направлять любую входящую партию на тот или иной технологический маршрут на основании измеримых качественных показателей, не прибегая к индивидуальным экспертным оценкам. Принцип инвариантности обеспечивается введением

системы критериальных пороговых значений, при достижении которых автоматически активируется соответствующий маршрут переработки.

Анализ научной литературы и нормативных документов позволяет выделить три технологически обоснованных и экономически состоятельных маршрута утилизации возвратной молочной продукции. Первый маршрут – кормовое использование – реализуется при минимальной степени деградации сырья и предполагает пастеризацию продукции с последующей передачей в качестве кормового компонента для сельскохозяйственных животных, прежде всего свиней и телят. Второй маршрут – фракционная переработка – ориентирован на извлечение жировой фракции методом сепарирования или отстаивания и одновременное использование обезжиренной белково-углеводной фазы для молочнокислой ферментации с получением технической или пищевой молочной кислоты. Третий маршрут – анаэробное сбраживание – применяется для продукции с глубокой степенью деградации, когда избирательное извлечение компонентов нецелесообразно, и обеспечивает получение биогаза с минимальными требованиями к качеству исходного субстрата.

Выбор маршрута определяется совокупностью химических биомаркеров, прежде всего активной кислотностью (рН), титруемой кислотностью, кислотным числом (AV) и перекисным числом (PV) жировой фазы, а также концентрацией вторичных продуктов окисления. Указанные показатели характеризуют не только текущее состояние сырья, но и потенциал извлечения ценных компонентов. Включение в систему принятия решений органических кислот – молочной и уксусной – в соответствии с подходом, рассмотренным в предшествующей главе, формирует дополнительный уровень раннего предупреждения и повышает точность маршрутизации на ранних стадиях деградации.

Принципиальная особенность предлагаемой схемы состоит в ее каскадной структуре: каждый последующий маршрут активируется при исчерпании возможностей предыдущего. Такая архитектура обеспечивает

максимальное извлечение ценности из каждой партии сырья, следуя иерархии экономической целесообразности: кормовое использование как наименее затратный маршрут с наибольшим выходом нутриентной ценности; фракционная переработка как маршрут с умеренными капитальными затратами и высокой стоимостью конечного продукта; анаэробное сбраживание как универсальная конечная стадия, принимающая субстраты любого качества.

5.2 Маршрут I: Кормовое использование возвратной молочной продукции

Кормовое использование нереализованной молочной продукции является наиболее ресурсосберегающим маршрутом утилизации, поскольку позволяет вернуть в хозяйственный оборот практически полный комплекс питательных веществ молока через животноводческое звено. Ветеринарные нормативы ряда стран устанавливают допустимое содержание молочной кислоты в рационе телят на уровне не более 0,3-0,4% на сухое вещество. В связи с этим кормовой маршрут применим преимущественно к продукции в начальной стадии скисания ($\text{pH} > 4,6$) или умеренно кислой ($\text{pH} 4,6-5,5$) при условии разбавления менее кислым сырьем или нейтрализации CaCO_3 . Не допускается скармливание продукции, содержащей антибиотики (маститное молоко), афлатоксины или иные ингибирующие вещества, поскольку их присутствие не устраняется пастеризацией.

Экономическая привлекательность маршрута определяется минимальными операционными затратами: единственной энергетической статьей является пастеризация, стоимость которой при применении пластинчатых теплообменников с рекуперацией тепла составляет 0,3-0,6 кВт·ч на 100 л. Альтернативные издержки утилизации (вывоз на полигон, очистка стоков) полностью исключаются. Вместе с тем маршрут требует наличия

сопряженного животноводческого производства или контрактных поставок корма, что в условиях городской или крупнотоварной переработки может являться логистическим ограничением.

Контроль пригодности продукции к кормовому маршруту осуществляется по трем ключевым показателям: рН (нижний допустимый предел $> 4,6$), перекисному числу жировой фазы ($PV < 20$ мэкв/кг) и кислотному числу жира ($AV < 10$ мг КОН/г). При превышении указанных порогов кормовое использование исключается и продукция переводится на маршрут II или III. Микробиологический контроль (КМАФАнМ, патогены, БГКП) проводится до пастеризации для принятия решения о допустимости скармливания в принципе, однако абсолютные значения общего микробного числа в сыром продукте не являются самостоятельным ограничивающим фактором при условии соблюдения пастеризационного режима.

5.3 Маршрут II: Фракционная переработка с извлечением жира и молочной кислоты

Маршрут фракционной переработки ориентирован на кисломолочную продукцию, утратившую пригодность к кормовому использованию вследствие нарастания кислотности ($pH < 4,6$) или повышения перекисного числа жировой фазы, но сохранившую технологическую ценность отдельных компонентов. Принципиальная особенность маршрута состоит в последовательном разделении исходного субстрата на три фракции: жировую, белково-казеиновую и обезжиренную лактозосодержащую сыворотку – с последующей независимой переработкой каждой из них. Интеграция жировой переработки и молочнокислой ферментации в рамках единого маршрута обеспечивает комплексную утилизацию органического вещества и максимизацию выхода ценных продуктов из одной партии сырья.

5.3.1 Извлечение жировой фракции и ее переработка

Жировую фракцию отделяют центробежным сепарированием на дисковом сепараторе. При отсутствии специализированного оборудования допустимо отстаивание при 40-45 °С в течение 2-4 ч с последующим механическим снятием сливочного слоя, однако этот способ уступает центробежному по полноте извлечения. Сепарирование обеспечивает остаточное содержание жира в обезжиренной фазе на уровне 0,1-0,2% и предпочтительно при переработке значительных объемов сырья. В обоих случаях субстрат предварительно подогревают до 35-40 °С: снижение вязкости жировых шариков при этой температуре заметно улучшает качество разделения фаз. Выход жировой фракции определяется исходным содержанием жира в сырье. Из 100 л молока с жирностью 3,5% получают 3,0-3,5 кг жира, из 100 л кефира с жирностью 2,5% - 2,2-2,8 кг, из 100 л сметаны с жирностью 20-25% - до 18-22 кг. Полученный жир-сырец анализируют по кислотному числу (AV) и перекисному числу (PV): совокупность этих показателей определяет, по какому технологическому маршруту будет направлена данная партия сырья. При значениях $AV < 10$ мг КОН/г и $PV < 20$ мэкв/кг жир пригоден для омыления или переэтерификации в метиловые эфиры жирных кислот (биодизельное топливо). Переэтерификация проводится реакцией с метанолом (мольное соотношение жир:метанол = 1:6) в присутствии щелочного катализатора NaOH или КОН (0,5-1,0% от массы жира) при температуре 55-60 °С в течение 60-90 мин. Выход метиловых эфиров жирных кислот составляет 90-95% от массы исходного жира; побочный продукт – глицерин (около 10% от массы жира) – может быть реализован в качестве технического сырья. При $AV > 10$ мг КОН/г щелочной катализ дает мыло вместо эфиров вследствие реакции кислот с катализатором; в этом случае необходимо применение кислотного катализа (H_2SO_4) или предварительной этерификации свободных жирных кислот. Технические

требования к жиру для биодизельного производства предполагают влажность < 0,5% и кислотное число < 3% свободных жирных кислот, что для большинства молочных жиров со значениями AV < 6 мг КОН/г выполняется без дополнительной обработки. Технический жир первого сорта по ГОСТ 1045-73 характеризуется кислотным числом < 10 мг КОН/г, второго сорта < 25 мг КОН/г; жир с AV > 25 мг КОН/г направляется на мыловарение, где высокая концентрация свободных жирных кислот является технологически допустимой и даже предпочтительной.

5.3.2 Ферментационное получение молочной кислоты из обезжиренной фазы

Обезжиренная фаза, полученная после сепарации, содержит основной запас сбраживаемого субстрата – лактозы (3,8-4,8% в молоке, 3,5-4,0% в кефире) – и является перспективным сырьем для микробиологического синтеза молочной кислоты. Лактоза молока обладает рядом преимуществ перед традиционными субстратами молочнокислой ферментации (крахмалом, сахарозой): она не требует гидролиза, непосредственно утилизируется гомоферментативными штаммами *Lactobacillus* и не является конкурентным с пищевыми цепочками источником углерода.

Принципиальная технологическая последовательность включает: пастеризацию обезжиренной фазы при 90 °С / 10 с для подавления контаминирующей микрофлоры; охлаждение до 37-40 °С и коррекцию pH до значения 5,5-6,0 введением CaCO₃ или Mg(OH)₂; инокуляцию гомоферментативными штаммами *Lactobacillus plantarum*, *L. casei* или *L. bulgaricus* с нормой засева 3-5% по объему; ферментацию при 37-42 °С в течение 24-48 ч при непрерывной нейтрализации для поддержания pH в диапазоне 5,5-6,0; отделение биомассы центрифугированием или

микрофильтрацией; концентрирование и очистку молочной кислоты (ионообменная хроматография, вакуум-испарение).

Теоретический выход молочной кислоты при гомоферментативном брожении лактозы составляет 4 моль молочной кислоты на 1 моль лактозы, что при содержании лактозы 4,5 г/100 мл соответствует теоретическому выходу 4,0-5,0 г LA на 100 мл субстрата (40-50 г/л). Практический выход, с учетом потерь при разделении и очистке, составляет 3,0-4,0 кг молочной кислоты на 100 л переработанного субстрата. Полученная молочная кислота может быть реализована в виде 80%-го водного раствора для пищевой, фармацевтической или химической промышленности, либо использована для получения полилактида – биоразлагаемого полимера с растущим рыночным спросом.

Критическим ограничением маршрута является необходимость минимального содержания сбраживаемых углеводов (лактозы) в субстрате – не менее 30 г/л. При концентрации лактозы ниже указанного порога субстрат может быть обогащен добавлением ультрафильтрата молочной сыворотки или глюкозы. Дополнительным ограничением служит присутствие ингибиторов молочнокислого брожения: свободных жирных кислот (остаточное содержание жира в обезжиренной фазе $> 0,2\%$ угнетает рост бактерий), антибиотиков (сохраняющих активность после пастеризации) и высоких концентраций уксусной кислоты ($AA > 10$ г/л при соотношении $AA/LA > 0,3$), свидетельствующих о преобладании уксуснокислого брожения в ущерб молочнокислому.

Таблица 5.1 – Технологические параметры и ограничения маршрута фракционной переработки

Стадия переработки	Ключевые параметры	Выход продукта	Ограничивающие условия
---------------------------	---------------------------	-----------------------	-------------------------------

Сепарирование жировой фазы (дисковый сепаратор, 40 °С)	Температура 35-40 °С; частота вращения 6000-8000 об/мин	3,0-3,5 кг жира / 100 л молока; 18-22 кг / 100 л сметаны	Жирность < 1% нецелесообразна для отдельного жирового маршрута
Переэтерификация жира в биодизель (щелочной катализ)	NaOH 0,5-1,0%; метанол 1:6 (моль); 55-60 °С, 60-90 мин	~90-95% жира -> МЭЖК; глицерин ~10% от жира	AV > 10 мг КОН/г требует кислотного предкатализа
Пастеризация обезжиренной фазы	90 °С / 10 с; охлаждение до 37-40 °С	Инактивация вегетативной микрофлоры	Остаточные антибиотики и термостойкие споры не инактивируются
Молочнокислая ферментация	<i>L. plantarum</i> / <i>L. casei</i> ; pH 5,5-6,0; 37-42 °С; 24-48 ч; CaCO ₃ -нейтрализация	3,0-4,0 кг LA / 100 л субстрата	Лактоза < 30 г/л; остаточный жир > 0,2%; AA > 10 г/л – ингибирование
Очистка молочной кислоты	Микрофльтрация -> ионный обмен -> вакуум-испарение	80%-й раствор LA; чистота > 99% для	Высокая зольность затрудняет декатионизацию; при AV > 10 мг

		пищевого применения	КОН/г очистка нерентабельна
--	--	------------------------	--------------------------------

5.4 Маршрут III: Анаэробное сбраживание с получением биогаза

Анаэробное сбраживание представляет собой универсальный завершающий маршрут, пригодный для молочного сырья любого качества, включая глубоко деградированные субстраты с выраженным прогорканием жировой фазы, развитием гнилостной микрофлоры и высоким содержанием вторичных токсичных метаболитов. Принципиальное технологическое преимущество метода состоит в отсутствии требований к исходному качеству субстрата: высокое содержание органического вещества в молочных отходах (ХПК молока составляет 100-130 г/л, кефира 80-110 г/л) обеспечивает стабильный выход биогаза даже при использовании сильно разложившегося сырья. 1 кг ХПК молочного субстрата в оптимальных условиях метаногенеза дает около 0,35 м³ биогаза с содержанием метана 60-70%. В пересчете на типичные субстраты: из 100 л молока (ХПК приблизительно 103 кг/м³) теоретически можно получить 20-30 м³ биогаза, что эквивалентно 120-180 кВт·ч тепловой энергии. Практический выход несколько ниже из-за неполного разложения жировых фракций и потерь при биогазоочистке. Вместе с тем молочные субстраты имеют специфическое технологическое ограничение. Высокое содержание жиров и белков обуславливает интенсивное кислотообразование в фазе ацидогенеза, что ведет к накоплению летучих жирных кислот и падению pH ниже оптимального диапазона метаногенеза (6,8-7,4). Для предотвращения закисления реактора применяют буферирование раствором NaHCO₃ или Ca(OH)₂, ко-сбраживание с менее кислыми субстратами (навоз, силос, растительные отходы в соотношении 1:2-1:3 по ХПК), а также двухстадийные схемы с разделенными ацидогенной и метаногенной фазами. Последний вариант снижает нагрузку на метаногенный

реактор и повышает устойчивость процесса при переработке концентрированных молочных отходов. Дигестат содержит минеральный азот, фосфор и калий и может использоваться в качестве органического удобрения при условии соответствия требованиям ГОСТ Р 54181-2010 по содержанию тяжелых металлов и патогенных микроорганизмов. Таким образом, маршрут анаэробного сбраживания обеспечивает полную утилизацию органической массы, производство возобновляемой энергии и получение почвенных улучшителей, что в целом отвечает концепции безотходного производства.

Экономическая целесообразность маршрута существенно зависит от объема поступающего сырья. Капитальные затраты на биогазовую установку окупаются при объеме органических отходов от 10-15 т/сут, хотя конкретные цифры определяются региональными ценами на энергоносители и доступностью субсидий. При меньших объемах разумнее рассмотреть кооперацию с региональным биогазовым предприятием на условиях давальческой переработки. При этом стоит учитывать, что действующие стимулирующие механизмы (зеленые тарифы, углеродные квоты) улучшают экономику биогазового маршрута и делают его привлекательным даже при относительно небольших партиях молочных отходов.

5.5 Система критериальных показателей для маршрутизации входящего потока

Инвариантность технологической схемы обеспечивается системой формализованных критериев, позволяющих однозначно направить каждую партию нереализованной молочной продукции на соответствующий маршрут переработки. Система включает два уровня оценки: первичный (оперативный) контроль, осуществляемый по pH и органолептическим признакам, и

расширенный лабораторный контроль, включающий определение AV, PV и концентраций органических кислот.

Первичная оценка активной кислотности позволяет разграничить продукцию по трем зонам состояния. Зона I ($\text{pH} > 4,6$) соответствует начальной стадии скисания без выраженной коагуляции белка; в этой зоне все три маршрута теоретически применимы, однако кормовое использование является предпочтительным по экономическим критериям. Зона II ($\text{pH} 4,0-4,6$) характеризуется выпадением казеинового сгустка при изоэлектрическом pH казеина $\approx 4,6$ и нарастанием кислотности до уровня, исключающего прямое скармливание без нейтрализации; в этой зоне показан маршрут фракционной переработки при условии удовлетворительного состояния жировой фазы. Зона III ($\text{pH} < 4,0$ или $\text{pH} > 7,0$ вследствие гнилостного разложения) свидетельствует о глубокой деградации органической матрицы; при $\text{pH} > 7,0$ присутствие аммиака и продуктов распада белка делает кормовое использование ветеринарно недопустимым, фракционная переработка – экономически невыгодной; единственным рациональным маршрутом является анаэробное сбраживание.

Второй уровень контроля – оценка состояния жировой фазы по AV и PV – определяет возможность реализации жировой фракции в рамках маршрута II. Кислотное число AV < 10 мг KOH/г соответствует жиру первого сорта по ГОСТ 1045-73, пригодному для щелочной переэтерификации в биодизель без предварительной обработки. При AV 10-25 мг KOH/г (второй сорт) необходима кислотная предобработка или применение двухстадийного катализа; при AV > 25 мг KOH/г переориентация на мыловарение или прямое включение в субстрат анаэробного реактора является технологически и экономически более обоснованной. Перекисное число PV > 100 мэкв/кг свидетельствует о глубоком окислении с накоплением токсичных вторичных оксипродуктов (малонового диальдегида, полимерных соединений), которые ингибируют молочнокислые бактерии в ходе молочнокислой ферментации; при таких значениях PV жировая фракция утрачивает самостоятельную

коммерческую ценность и должна направляться в анаэробный реактор совместно с обезжиренной фазой.

Таблица 5.2 – Критериальная матрица маршрутизации нереализованной молочной продукции

Зона состояния	pH	AV, мг КОН/г	PV, мэкв/кг	Рекомендуемый маршрут и технологическое действие
I. Начальное скисание	4,6 - 6,7	< 10	< 20	Маршрут I:
II. Умеренная деградация жира	4,0 - 4,6	10 - 25	20 - 100	Маршрут II:
II. Пригодная жировая фаза при кислом белке	4,0 - 4,6	< 10	< 20	Маршрут II
III. Глубокая деградация	< 4,0	> 25	> 100	Маршрут III

III.	> 7,0			
Гнилостное разложение	(аммиачный сдвиг)	Любое	Любое	Маршрут III

Дополнительным критерием второго уровня является соотношение уксусной и молочной кислот (AA/LA), рассмотренное в главе 4. Значение $AA/LA > 0,3$ при одновременном значении $pH < 4,4$ свидетельствует о преобладании уксуснокислого брожения, снижающего выход целевой молочной кислоты при ферментации и увеличивающем нагрузку на систему очистки; в таких случаях обезжиренная фаза направляется на анаэробное сбраживание совместно с жировой фракцией либо жировая фракция переводится на мыловарение.

5.6 Технологическая схема, инвариантная относительно входящего состава

Интеграция трех маршрутов в единую технологическую схему обеспечивается каскадной архитектурой принятия решений, в которой результаты первичного и расширенного контроля последовательно разграничивают входящий поток сырья. Схема включает три функциональных блока: блок входного контроля и маршрутизации, блок технологической переработки (три параллельных ветви) и блок контроля выходной продукции.

Блок входного контроля и маршрутизации осуществляет экспресс-анализ каждой поступающей партии по следующей последовательности операций: органолептическая оценка (запах, цвет, наличие плесени); измерение pH потенциометрическим методом; (3) при необходимости – определение AV и PV жировой фазы методами кислотно-щелочного титрования и йодометрии соответственно. По результатам анализа партия

направляется на один из трех маршрутов в соответствии с критериальной матрицей (табл. 5.2). Время принятия решения по результатам экспресс-анализа не превышает 15-20 мин, что соответствует требованиям оперативного управления производственным потоком.

Маршрутная ветвь I включает единственную технологическую операцию – пастеризацию в пластинчатом пастеризаторе при 72 °C / 15 с с рекуперацией тепла – и завершается передачей продукции потребителю (животноводческое предприятие) или хранением в охлажденном виде при 2-4 °C не более 24 ч.

Маршрутная ветвь II реализуется в виде двух параллельных подпроцессов. Первый подпроцесс: сепарирование жировой фазы, ее анализ по AV и PV, переэтерификация в биодизель (щелочной или кислотный катализ в зависимости от AV) с выходом МЭЖК и технического глицерина. Второй подпроцесс: пастеризация обезжиренной фазы, коррекция pH, инокуляция молочнокислый бактерий, ферментация с контролем pH и температуры, отделение биомассы, концентрирование и очистка молочной кислоты. Оба подпроцесса осуществляются независимо и могут быть интегрированы с различной степенью совмещения по времени и оборудованию.

Маршрутная ветвь III предусматривает прямую подачу субстрата в анаэробный реактор (метантенк). Перед подачей сырье измельчают и нагревают до рабочей температуры: 37 °C при мезофильном или 55 °C при термофильном режиме сбраживания. Концентрированные молочные субстраты требуют предварительного разбавления или ко-сбраживания с другими органическими материалами, чтобы удерживать соотношение C/N в диапазоне 20-30 и не допустить ингибирования метаногенеза летучими жирными кислотами. Полученный биогаз очищают от H₂S и CO₂ на установке биогазоочистки и направляют в когенерационную установку. Дигестат обезвоживают декантером и либо реализуют как органическое удобрение, либо вывозят на поля в соответствии с агрохимическими регламентами.

Ветви II и III могут использоваться совместно в рамках каскадного подхода. Обезжиренная фаза, непригодная для дальнейшей ферментации (лактоза ниже 30 г/л или АА/ЛА выше 0,3), не выводится из процесса, а передается из ветви II напрямую в анаэробный реактор ветви III. Такая схема обеспечивает полную утилизацию субстрата при максимальном извлечении жировой фракции и исключает поступление жидких органических стоков в канализацию без предварительной переработки, что соответствует принципам ресурсоэффективного производства. Инвариантность схемы в отношении входящего состава достигается за счет того, что ни одна партия сырья, поступившая в систему, не оказывается вне зоны маршрутизации: даже продукция с наиболее глубокой степенью деградации и смешанным составом принимается маршрутом III. Схема масштабируется в диапазоне от малотоннажных молочных предприятий с суточным объемом возвратной продукции 0,5-2 т (ориентация на маршруты I и II с периодической передачей на региональный биогазовый объект) до крупных молокоперерабатывающих комплексов с суточным объемом возвратной продукции 10-50 т (полная реализация всех трех маршрутов с собственной биогазовой установкой).

Таблица 5.3 – Сравнительная характеристика маршрутов утилизации нереализованной молочной продукции

Показатель	Маршрут I: Кормовое использован ие	Маршрут II: Фракционная переработка	Маршрут III: Анаэробное сбраживание	Критериальн ый порог активации
Допустимый диапазон рН	4,6 - 6,7	4,0 - 4,6	< 4,0 или > 7,0	рН < 4,0 -> Маршрут III

Допустимый AV жира, мг КОН/г	< 10	< 25 (щелочной катализ); до 50 (мыловарение)	Любое	AV > 25
Допустимый PV жира, мэкв/кг	< 20	< 100 (ферментация)	Любое	PV > 100
Выход ценного продукта	~100% нутриентов в форме кормовой биомассы	3-4 кг LA + 3-3,5 кг МЭЖК / 100 л молока	20-30 м ³ биогаза (120-180 кВт·ч) / 100 л молока	
Требуемое оборудование	Пастеризатор, емкости хранения	Сепаратор, реактор ферментации, система очистки, установка переэтерификации	Метантенк, когенерационная установка, декантер, биогазоочистка	
Экономическая целесообразность	Высокая	Средняя - высокая; зависит от объема и цен на молочную кислоту и биодизель	Высокая при объеме > 10 т/сут; оправдана при субсидировании	—

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 деградиационных изменений.

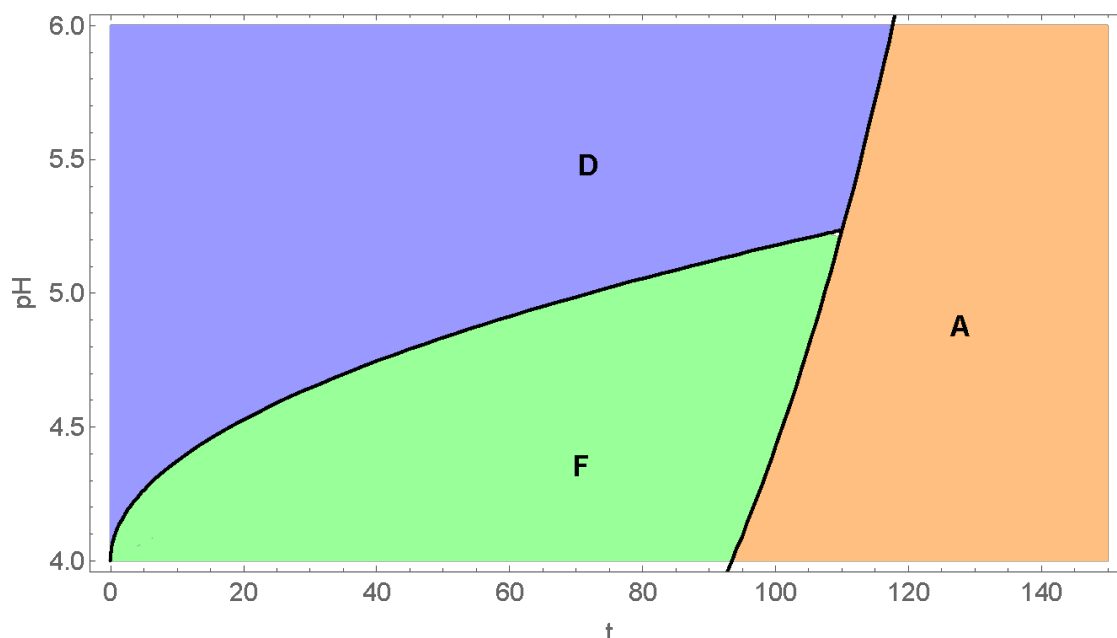


Рисунок 5.1 – Фазовая диаграмма экономической эффективности переработки смесей молочной продукции в зависимости от кислотности и времени хранения. D – область целесообразности сушки, F – область отделения жировой фазы, A – область эффективности анаэробного метаногенеза. «Тройная точка» экономической эффективности: (109, 5.27)

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. 5.1.

Контроль содержания летучих жирных кислот при сортировке партий нереализованной молочной продукции целесообразно осуществлять поэтапно,

с последовательной оценкой ключевых физико-химических показателей, определяющих дальнейший технологический маршрут переработки.

На первом этапе проводят измерение активной кислотности среды и содержания свободной масляной кислоты, определяемого методом газовой хроматографии с парофазным вводом либо титриметрическим методом по Бутову. При значениях массовой концентрации масляной кислоты менее 20 миллиграммов на килограмм и активной кислотности выше 6,0 исследуемое сырье может быть отнесено к категории технологически стабильного и пригодного для пастеризации с последующим использованием в кормовых целях.

На втором этапе оценивают кислотное число жировой фазы. При кислотном числе менее 6 миллиграммов гидроксида калия на грамм жира допускается проведение прямой трансэтерификации с целью получения биодизельного топлива. В интервале значений кислотного числа от 6 до 25 миллиграммов гидроксида калия на грамм жира целесообразно применение кислотной стадии переэтерификации с последующей щелочной обработкой. При превышении кислотного числа 25 миллиграммов гидроксида калия на грамм жира дальнейшая переработка жировой фазы рациональна в направлениях мыловарения либо анаэробного сбраживания с получением биогаза.

На третьем этапе анализируют обезжиренные или комбинированные потоки с активной кислотностью в диапазоне от 4,0 до 4,8 и концентрацией уксусной кислоты более 3 граммов на литр. Для таких систем возможны два технологически обоснованных подхода: нейтрализация среды с последующим ведением контролируемого молочнокислого процесса либо сохранение потока в качестве сырья, обогащенного летучими жирными кислотами, преимущественно уксусной и пропионовой.

В случае, если суммарная концентрация летучих жирных кислот превышает 4-5 граммов на литр при активной кислотности ниже 5,0 и отсутствует экономически оправданный спрос на использование данного

потока в качестве источника летучих жирных кислот, рекомендуется внесение щелочного буферного агента и направление сырья в метантенк для совместного анаэробного сбраживания с углеродно-дефицитными сточными водами.

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 трех предприятиях молочной промышленности, что подтверждено актами о внедрении. Интерфейс программного обеспечения оператора управления потоками нереализованной молочной продукции представлен на рис. 5.2.

Загрузить данные по поступившей продукции

	Белки	Жиры	Углеводы	Сухих 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 5.2 – 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. рис. 5.1): 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 втрое

меньший экономический выход (17л СН₄/л субстрата), чем маршрут сепарации жира и получения лактата (см. табл. 5.4).

Таблица 5.4 – Экономическая оценка ферментации обезжиренного субстрата

Показатель	Значение	Пояснение
Стартовая концентрация молочной кислоты	15 г/л (0,167 моль/л)	Молочная кислота уже присутствует в сырье; требуется нейтрализация до рН 5,5–6,0 для ведения контролируемого молочнокислого брожения
Потенциал образования молочной кислоты из лактозы	$33 \text{ г/л} \times 1,05 \approx 35 \text{ г/л}$	При гомоферментативном молочнокислом брожении 1 г лактозы теоретически соответствует образованию 1,05 г молочной кислоты
Теоретическое суммарное содержание молочной кислоты	$\approx 50 \text{ г/л}$	Рассчитано при условии полного сбраживания остаточной лактозы и сохранения стартовой молочной кислоты
Расход карбоната кальция для контроля рН	$0,553 \text{ моль/л} \times 100,1 \text{ г/моль} \approx 55 \text{ г/л}$	Используется для нейтрализации кислоты и стабилизации рН; стоимость CaCO ₃ $\approx 5 \text{ руб./кг}$, что соответствует $\approx 0,28 \text{ руб./л}$
Выход очищенной молочной кислоты	$0,8 \times 50 \approx 40 \text{ г/л}$	Техническая молочная кислота при коэффициенте извлечения около 80 %

Показатель	Значение	Пояснение
Выручка от реализации молочной кислоты	≈ 4,8 руб./л	Исходя из цены технической молочной кислоты ≈ 120 руб./кг, без учета налога на добавленную стоимость
Переменные затраты	CaCO ₃ ≈ 0,28 руб./л; питательная среда ≈ 0,5 руб./л; энергия и фильтрация ≈ 2,0 руб./л; всего ≈ 2,8 руб./л	Учитываются только затраты, напрямую зависящие от объема перерабатываемого сырья
Маржинальная прибыль	≈ 2,0 руб./л	Соответствует приблизительно 42 % по отношению к переменным затратам

Таблица 5.5 – Этапы производства и контроль оптической чистоты L-лактата

Этап	Исходная смесь	Меры для обеспечения ≥ 98 % L-изомера
Субстрат	Брожение протекало без технологического контроля, в результате чего в системе присутствуют как L-, так и D-лактатдегидрогеназы, продуцируемые молочнокислыми бактериями,	Пастеризация при 90 °С в течение 10 с с целью инактивации микроорганизмов – продуцентов D-лактата

Этап	Исходная смесь	Меры для обеспечения ≥ 98 % L-изомера
	дрожжами и уксуснокислыми бактериями; соотношение L:D составляет приблизительно 70:30–80:20	
Ферментация	При повторном засеивании микробное сообщество сохраняет «контаминацию» D-изомером, что не позволяет повысить оптическую чистоту молочной кислоты	Использование гомоферментативных L-продуцирующих штаммов (<i>Lactiplantibacillus plantarum</i> WCFS1, <i>Lacticaseibacillus rhamnosus</i> GG, <i>Lacticaseibacillus casei</i> 12A), генетически лишенных D-лактатдегидрогеназы
Контроль pH	При снижении pH ниже 4,5 активируется аблактатовая рацемаза, что приводит к неферментативному взаимному превращению L- и D-изомеров молочной кислоты	Поддержание pH на уровне 5,5–6,0 с использованием CaCO ₃ или NaOH; ограничение температуры процесса и охлаждение среды ниже 42 °C
Очистка	При осаждении молочной кислоты в форме кальций-лактата оба энантиомера соосаждаются; доля D-формы в твердой фазе может достигать около 20 % по массе	Фракционирование продукта: кристаллизация L-Ca-лактата при 10 °C с накоплением D-изомера в маточном растворе; применение электродиализа в

Этап	Исходная смесь	Меры для обеспечения ≥ 98 % L-изомера
		сочетании с нанофильтрацией (мембраны типа IL100)
Контроль качества	Оптическая чистота исходного продукта нестабильна и не соответствует требованиям высокотехнологичных применений	Аналитический контроль по ISO 11090 методом ВЭЖХ с использованием хиральной колонки; целевая оптическая чистота не ниже 98 % L-изомера (требования для PLA и фармацевтического применения)

Для получения L-лактата с оптической чистотой $\geq 98\%$, необходимой для производства PLA и фармацевтики, требуется комплексный подход, исключающий образование рацемической смеси при спонтанном брожении. Ключевыми этапами являются: пастеризация субстрата для подавления D-продуцирующей микрофлоры, ферментация с использованием селективных гомо-L-штаммов при контролируемом pH, а также хиральное фракционирование на стадии очистки. Данная технология экономически оправдана, если исходная доля D-изомера не превышает 25-30%.

Таблица 5.6 – Актуальные котировки L-молочной кислоты (L-лактата) на июнь 2025 г.

Группа качества	Форма поставки	Диапазон цены*	Источник информации
Пищевая / техническая	Мешки или контейнеры	1,2–1,9 долл. США/кг, что	Коммерческие предложения

Группа качества	Форма поставки	Диапазон цены*	Источник информации
<p>молочная кислота, массовая доля основного вещества около 88 % (поставка навалом, условия FOB, КНР)</p>	<p>типа IBC, масса партии не менее 25 кг</p>	<p>соответствует примерно 120–190 руб./кг</p>	<p>поставщиков на платформе Alibaba по позиции «<i>L-lactic acid</i> 88 %»</p>
<p>Фармакопейная молочная кислота (API-grade) с оптической чистотой L-изомера не менее 85 %, энантиомерный избыток более 98 %</p>	<p>Экспортные партии массой 2–12 т</p>	<p>Около 1,20 долл. США/кг, что соответствует примерно 120 руб./кг; цена зафиксирована в сделках августа 2023 г., без выраженного роста в период 2024 г. – I квартал 2025 г.</p>	<p>Статистика импорта фармацевтических субстанций в Индию, база данных PharmaCompass</p>
<p>Лабораторная молочная кислота с оптической чистотой не менее 99,5 %, мелкая фасовка</p>	<p>Флаконы по 100 г</p>	<p>Около 60 долл. США/кг, что соответствует примерно 6 000 руб./кг (или 529 руб. за 100 г)</p>	<p>Онлайн-каталог поставщика «Пушинские лаборатории»</p>

* цены перечислены без НДС

Оценка экономической эффективности альтернативных технологических решений в перерабатывающей промышленности строится на принципах сравнительного технико-экономического анализа. Суть подхода состоит в сопоставлении затрат и результатов по каждому рассматриваемому варианту с целью выбора оптимального по критерию максимизации прибыли или минимизации издержек при заданном качестве продукции. Применительно к переработке вторичного сырья, каким является возвратная молочная смесь, центральным инструментом становится анализ маржинальной прибыли - разности между выручкой от реализации полученных продуктов и переменными затратами на их производство. Такой подход позволяет отвлечься от условно-постоянных затрат предприятия и оценить непосредственную финансовую целесообразность каждой технологической цепочки.

Принципиальное различие в эффективности рассматриваемых маршрутов объясняется законом возрастающей добавленной стоимости. Технологии простого консервирования или утилизации сырья (сушка, сбраживание в биогаз) создают минимальную добавленную стоимость. Напротив, технологии фракционирования и глубокой переработки с выделением ценных компонентов (жир, оптически чистые изомеры кислот) переводят исходное сырье в продукты с принципиально иными рыночными позициями, что существенно увеличивает маржинальность.

Исходным сырьем для анализа служит возвратная молочная смесь кормового качества со следующими физико-химическими параметрами: содержание жира около 6%, концентрация лактозы около 33 г/л, содержание предобразованной L-молочной кислоты около 15 г/л, pH 3,9. Перед переработчиком стоит стратегический выбор маршрута, определяемый как технической возможностью, так и экономической целесообразностью.

Экономическую привлекательность ряда маршрутов ограничивает совокупность технологических барьеров. Высокое содержание жиров (6%) ведет к образованию корки и требует предварительной обработки субстрата.

Исходная кислотность (рН около 3,9) подавляет метаногенез, что влечет расход реагентов (CaCO_3) на нейтрализацию. Образующиеся соли лактатов создают осмотический стресс для консорциума микроорганизмов, а невысокая агрономическая ценность и повышенная загрязненность дигестата увеличивают затраты на его утилизацию.

В рамках анализа были рассмотрены три принципиальных технологических маршрута:

- Маршрут I: физическое обезвоживание (вакуум-упарка и распылительная сушка) с получением стандартизированного сухого кормового продукта.
- Маршрут II: механо-химико-биологическая переработка: сепарация жира с последующей биохимической конверсией лактозы в L-молочную кислоту и ее выделением в качестве целевого продукта.
- Маршрут III: биохимическая конверсия всей органической матрицы сырья в биогаз (метан) методом анаэробного сбраживания

В качестве критерия сравнительной оценки была выбрана маргинальная прибыль на единицу объема перерабатываемого сырья (1 литр), выраженная в российских рублях для корректности расчетов в условиях конкретной экономической среды. Анализ данных свидетельствует о полной экономической несостоятельности маршрута прямого высушивания смеси в кормовой продукт. Высокая энергоемкость процесса удаления воды приводит к тому, что переменные затраты (4,74 руб/л) значительно превышают возможную выручку от продажи сухого порошка (1,90 руб/л), формируя убыток в размере 2,84 руб на каждый литр переработанного сырья.

Анаэробное сбраживание, обеспечивая положительную маргинальную прибыль в 1,97 руб/л, остается технологией с относительно низкой рентабельностью. Это объясняется невысокой удельной стоимостью конечного продукта – биометана, несмотря на умеренный уровень

эксплуатационных затрат. Данный маршрут может рассматриваться как резервный или утилизационный.

Наибольшая экономическая эффективность достигается при реализации маршрута глубокой переработки, направленного на сепарацию жира и биоконверсию лактозы в L-молочную кислоту. При относительно невысоких переменных затратах (2,61 руб/л) технология позволяет получить два продукта с более высокой добавленной стоимостью, обеспечивая валовую выручку в 8,43 руб/л. В результате маржинальная прибыль составляет 5,82 руб/л, что практически в 3 раза превышает показатель биогазового направления и кардинально отличается от убыточного сценария сушки.

Таблица 5.7 – 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)

Маршрут	Выручка, руб/л	Переменные затраты, руб/л	Прибыль, руб/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

Таким образом, программа позволяет проводить комплексный анализ и принимать взвешенные решения, направленные на оптимизацию использования ресурсов и минимизацию экологических рисков при переработке молочной продукции с истекающим сроком годности. Программа написана на языке JavaScript

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 нереализованной 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 11 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 ($32\text{ }^{\circ}\text{C}$, 0–144 ч, что соответствует $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$) проявляется как вторичный,

вызывая подкластеризацию внутри продуктовых 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, что подтверждает необходимость первичной сортировки отходов по типу продукта. При разработке глубоких схем рециклинга так же следует руководствоваться степенью деградации поступающих на переработку пищевых продуктов. 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/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 ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Г. В. Научные основы создания ресурсосберегающих процессов и аппаратов абразивной переработки пищевого сырья: автореф. дисс. ... докт. техн. наук.: 05.18.12 / – Санкт-Петербург, 2002. – 38 с.
2. Алексеев Г. В. Современные подходы к рациональному использованию ресурсов при первичной обработке пищевого сырья / Г. В. Алексеев, Е. И. Верболоз // Вестник Международной академии холода. – 2003. – №. 4. – С. 35-39.
3. Антюшина А. В. Исследование проблемы утилизации пищевых отходов / А. В. Антюшина, И. А. Антюшин, Л. И. Ковалева // III Лужские научные чтения. Современное научное знание: теория и практика: материалы международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22 мая 2015 года / Ленинградский государственный университет имени А.С. Пушкина. – Санкт-Петербург: Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина, 2015. – С. 18-22.
4. Ахмедзянова Р. Р. Использование отходов масложировой промышленности в качестве сырья для биоконверсии / Р. Р. Ахмедзянова, Р. Т. Валеева, Д. В. Тунцев // Интеграция науки, общества, производства и промышленности: проблемы и возможности: Сборник статей Международной научно-практической конференции, Иркутск, 20 августа 2022 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", 2022. – С. 5-7.
5. Бабаев В. Н. Энергетический потенциал метанообразования при мезофильном анаэробном разложении органической составляющей отходов /

В. Н. Бабаев, Н. П. Горох, И. В. Коринько // Восточно-Европейский Журнал Передовых Технологий. –2011. – Т. 6 (52). С. 59-65.

6. Бабанин И. В. Раздельный сбор отходов - миссия выполнима / И. В. Бабанин // Твердые бытовые отходы. – 2007. – № 2(8). – С. 8-11.

7. Балабанова М. Ю. Математическое моделирование процесса химико-термической переработки целлюлозосодержащих отходов / М. Ю. Балабанова, Е. В. Складнев, С. Ю. Панов // Химическая промышленность. – 2014. – Т. 91. – № 1. – С. 11-14.

8. Быкова С. Ф. Альтернативы технологий реализации энергетической конверсии отходов лузги подсолнечных семян / С. Ф. Быкова, А. А. Бобровник // Масложировая промышленность. – 2016. – № 2. – С. 38-39.

9. Василевская С. П. Разработка и обоснование методов утилизации растительных отходов бродильных производств: автореф. дис. ... канд. техн. наук.: 05.18.12 – Оренбург, 2006. – 20 с.

10. Василевская С. П. Техника и технология переработки неоднородных систем / С. П. Василевская, В. П. Ханин // Оренбургский государственный университет. – Оренбург : Профессиональная наука, 2021. – 131 с.

11. Волкова Г. С. Исследование процессов ферментации отходов переработки сельскохозяйственного сырья с помощью кислотообразующих бактерий для получения молочной кислоты и ее производных: автореф. дисс. ... канд. техн. наук.: 05.18.07 – Москва, 2002. – 21 с.

12. Галстян А. Г. / А. Г. Галстян, Л. М. Аксенова, А. Б. Лисицын, Л. А. Оганесянц, А. Н. Петров // Современные подходы к хранению и эффективной переработке сельскохозяйственной продукции для получения высококачественных продуктов питания // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. №. 2. С. 211-213. doi.org/10.31857/S0869-5873895539-542.

13. Галстян А. Г. К вопросу о расширении области оценочных критериев качества пищевых продуктов / А. Г. Галстян, В. К. Семипятный // Актуальные вопросы индустрии напитков. – 2017. – № 1. – С. 27-29.

14. Главатских Н. Г. Эффективные методы переработки отходов пищевых и перерабатывающих производств / Н. Г. Главатских, К. В. Анисимова // Научное и кадровое обеспечение АПК для продовольственного импортозамещения: материалы Всероссийской научно-практической конференции. 16-19 февраля 2016 года, г. Ижевск. В 3 т.–Ижевск: ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА, 2016. –Т. 2.–354 с.

15. Гордеева Л. Н. Перспективы использования твердых отходов виноделия в кормопроизводстве / Л. Н. Гордеева // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. – 2001. – № 2. – С. 607.

16. Гришаева А. Р. Контролируемые параметры при биоконверсии отходов пищевых производств / А. Р. Гришаева // Современная наука: теоретический и практический взгляд: материалы Международной (заочной) научно-практической конференции, 2018. – С. 29-33.

17. Денис А. В. Пищевые отходы: проблемы и пути решения / А. В. Денис, О. А. Степанова // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – №. 4-5. – С. 716-718.

18. Жукова Е. С. Утилизация пищевых отходов на объектах экономики: современная ситуация в России и за рубежом / Е. С. Жукова, И. В. Журилкина // Экономика и управление: новые вызовы и перспективы. – 2011. – № 2. – С. 379-381.

19. Жучков А. В. Математическое моделирование тепло и массообменных процессов в реакторе анаэробного сбраживания / А. В. Жучков, И. Е. Шабанов, А. А. Чернецкая, Ю. Н. Смолко // Вестник ВГУИТ. – 2013. – №4 (58).

20. Занина И. А. Анализ технологий биоконверсии органических субстратов / И. А. Занина, Д. В. Кундрюков, А. Ю. Сачко // Научная весна - 2022. Технические науки: Сборник научных трудов: научное электронное издание, Шахты, 16–20 мая 2022 года / Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ в г. Шахты. – Шахты: Институт сферы

обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ в г. Шахты, 2022. – С. 68-77.

21. Канакина А. С. Экология пищевых производств / А. С. Канакина, О. А. Савватеева // Рациональное природопользование: традиции и инновации: Материалы III Международной конференции, Москва, 20–22 октября 2022 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "Науку", 2022. – С. 373-375.

22. Капнинова О. С., Полянин А. В. Грамотная утилизация отходов пищевой промышленности, как основа экологической безопасности / О. С. Капнинова, А. В. Полянин // Прогнозирование инновационного развития национальной экономики в рамках рационального природопользования. – 2015. – С. 194-198.

23. Ким В. В. Продовольственные потери и пищевые отходы на потребительском рынке РФ / В. В. Ким, Е. А. Галактионова, К. В. Антоневиц // International agricultural journal. – 2020. – №. 4. – С. 1-20.

24. Кузьмина Р.И., Штыков С.Н., Панкин К.Е., Иванова Ю.В., Панина Т.Г. Высокотемпературная переработка пищевых отходов // Пищевая промышленность. – 2010. – №7.

25. Курочкин А. А., Фролов Д. И., Шабурова Г. В. Совершенствование технологии переработки биологических отходов // Пищевые инновации и биотехнологии. – 2017. – С. 79-80.

26. Курынцева П. А., Бикташева, Л. Р., Галицкая, П. Ю., Селивановская С. Ю. Оценка эффективности анаэробного сбраживания смесей органических отходов // Биотехнология 2014. 30(5). – С. 78-80.

27. Массеров Д. А., Кустов М. В. Мировые достижения валоризации органических отходов для экологически устойчивого развития территорий // Отходы и ресурсы. – 2021. – Т. 8. – №. 2.

28. Математический метод планирования эксперимента по влиянию рН пищевых отходов на возможность их биоконверсии с помощью

вермикультуры / А. А. Ганджалова, А. В. Голубь, В. Е. Костин, Н. А. Соколова // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 4. – С. 45-46.

29. Молев М. Д. Современные подходы к утилизации техногенных ресурсов с использованием микробной конверсии / М. Д. Молев, И. А. Занина, Н. И. Стуженко. - Текст: непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень: (научно-технический журнал). - 2017. - № 3. - С. 155-160.

30. Массеров Д. А. Мировые достижения валоризации органических отходов для экологически устойчивого развития территорий / Д. А. Массеров, М. В. Кустов // Отходы и ресурсы. – 2021. – Т. 8. – № 2. – DOI 10.15862/06ECOR221.

31. Михеева Э. Р., Катраева И. В., Ворожцов Д. Л., Литти Ю. В., Ножевникова А. Н. Эффективность двухфазного анаэробного сбраживания и физико-химические свойства органической фракции твердых коммунальных отходов, предобработанных в аппарате вихревого слоя // Прикладная Биохимия И Микробиология. – 2020. – № 56(6). <https://doi.org/10.31857/S0555109920060112>.

32. Михеева Э. Р., Катраева И. В., Ворожцов Д. Л., Моралова Е. А. Переработка органической фракции ТКО с помощью твердофазного анаэробного сбраживания. Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и на сопредельных территориях : Материалы VIII Международной научной конференции, Белгород, 22–25 октября 2019 года / Под редакцией М.А. Польшиной. – Белгород: Издательский дом "Белгород", 2019. – С. 299-302.

33. Осадчий Н. К. Анализ ключевых вопросов сокращения образования пищевых отходов: Международный и Российский опыт // Современная экономика: проблемы и решения. – 2020. – № 7. – С. 29–47. <https://doi.org/10.17308/meps/2078-9017/2022/7/29-47>.

34. Османьян Р. Г. Пища и биологическая безопасность России [Проблема биологической безопасности пищевых продуктов и здоровье

населения в России] / Р. Г. Османьян // Экологическая безопасность в АПК. Реферативный журнал. – 1999. – № 4. – С. 756.

35. Панов С. Ю., Чернецкая А. А., Жучков А. В., Рязанов А. Н. Разработка научных основ технологии утилизации пищевых отходов методом анаэробного сбраживания // Вестник ВГУИТ. 2013. №4 (58).

36. Панфилова Ю. С. Переработка органических отходов пищевых производств / Ю. С. Панфилова, М. Н. Иванцова, И. С. Селезнева // Успехи современной науки. – 2016. – Т. 2. – № 10. – С. 26-33.

37. Польшяева М. А. О технологии обработки влагосодержащих пищевых отходов // " XXI century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus. – 2016. – С. 79.

38. Пульповая переработка пищевых отходов / А. М. Гонопольский, Б. Г. Покусаев, Е. В. Зинякина [и др.]. Московский политехнический университет. – Москва: Издательство "Перо", 2016. – 126 с.

39. Ромалийский В. С. Углеводно-белковый корм на основе растительного сырья / В. С. Ромалийский, С. Г. Карташов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2015. – № 4(20). – С. 15-18.

40. Рязанцева А. С. Технология микробиологической биоконверсии как метод снижения образования отходов производства в пищевых отраслях / А. С. Рязанцева, А. Е. Ковалева // Проблемы конкурентоспособности потребительских товаров и продуктов питания: сборник научных статей 2-й Международной научно-практической конференции, Курск, 13 апреля 2020 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 342-346.

41. Сабетова Л. А. Направления использования вторичных отходов свеклосахарного производства / Л. А. Сабетова, М. В. Девина // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2017. – № 5(19). – С. 132-141.

42. Савушкина Е. Ю., Орлов Н. В., Нораева А. Г. Компостирование как оптимальный метод переработки пищевых отходов // Лучшая студенческая статья 2020. – 2020. – С. 251-263.
43. Семипятный В. К. Формирование научных основ мониторинга качества пищевых продуктов / В. К. Семипятный, Р. Р. Вафин // Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти Василия Матвеевича Горбатова. – 2018. – № 1. – С. 233-234.
44. Семипятный В. К., Галстян А. Г., Харитонов Д. В., Цыганков Г. Е. Производственная система: инструмент повышения конкурентоспособности // Переработка молока. - 2013. - С. 44-47.
45. Сидоренко О. Д. Борисенко Е. Г., Ванькова А. А., Войно Л. И. «Микробиология». Изд-во НИЦ ИНФРА-М.- 2020. - 286 с.
46. Систер В. Г. Инновационные технологии переработки отходов / В. Г. Систер, В. К. Животов, С. В. Коробцев [и др.] // Известия МГТУ МАМИ. – 2013. – Т. 2. – № 3(17). – С. 105-109.
47. Смирнова В. Д. Интенсификация процесса биоконверсии отходов пищевой промышленности в дрожжевую биомассу кормового назначения / В. Д. Смирнова, И. В. Балакирев, Е. В. Башашкина [и др.] // Химическая промышленность сегодня. – 2010. – № 8. – С. 10-15.
48. Смоленова А. Д., Черепанова Е. В. Альтернативная система утилизации пищевых отходов // Инноватика: разработка инновационных проектов для развития отраслей жизнедеятельности общества. – 2018. – С. 119-123.
49. Степанова, Л. П. Научные основы управления отходами производства / Л. П. Степанова, А. В. Таракин, Е. А. Коренькова. Том Часть 3. – Орел: Орловский государственный аграрный университет. – 2011. – 192 с.
50. Субракова Л.К. Экономика обращения с пищевыми отходами в России. // Вестник ВГУ. Серия: Экономика и управление. – 2021. №1. С. 37-47.

51. Титов И. Н. Вермикультура: переработка органической фракции отходов / И. Н. Титов // Твердые бытовые отходы. – 2008. – № 8(26). – С. 18-25.
52. Фетисов Е. А. Планирование и анализ результатов технологических экспериментов / Е. А. Фетисов, В. К. Семипятный, А. Н. Петров, А. Г. Галстян. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, 2015. – 98 с.
53. Филонов А. В., Крампит М. А., Романенко В. О. Современное состояние и перспективные направления использования вторичных материальных ресурсов пищевой промышленности //Фундаментальные исследования. – 2017. – №. 5. – С. 215-219.
54. Фоменко И. А. Биоконверсия растительных отходов в кормовые и пищевые дрожжевые препараты / И. А. Фоменко, Г. М. Керимова // Новые технологии. – 2022. – Т. 18. – № 1. – С. 78-85. – DOI 10.47370/2072-0920-2022-18-1-78-85.
55. Хабибуллин, Р. Э. Оптимизация биотехнологических процессов переработки отходов агропромышленного комплекса: Монография / Р. Э. Хабибуллин, Г. О. Ежкова, О. А. Решетник. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2016. – 199 с.
56. Холов Ш. Е. Совершенствование производства пектиновых полисахаридов на основе современных компьютерных технологий / Ш. Е. Холов. – Душанбе : Издательства ТТУ имени академика М.С. Осими, 2021. – 132 с.
57. Цавкелова Е. А., Егорова М. А., Петрова Е. В., Нетрусов А. И. Образование биогаза микробными сообществами при разложении целлюлозы и пищевых отходов / Е. А. Цавкелова, М. А. Егорова, Е. В. Петрова, А. И. Нетрусов // Прикладная биохимия и микробиология. – 2012. – Т. 48. – № 4. – С. 417.

58. Чижикова О. Г. Пищевая ценность и использование отходов переработки свежих плодов и овощей / О. Г. Чижикова // М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Тихоокеанский гос. экономический ун-т. – Владивосток: Изд-во ТГЭУ, 2007. – 119 с.
59. Шамцян М. М. и др. Биотехнологическая переработка отходов сельского хозяйства и пищевой промышленности // Российский химический журнал. – 2011. – Т. 55. – №. 1. – С. 17-25.
60. Abouelenien F. Dry anaerobic ammonia-methane production from chicken manure / F. Abouelenien, Y. Kitamura, N. Nishio, Y. Nakashimada // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2017. – Vol. 82(4). P. 757–764. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-1881-3>
61. Ahmad J. Synthesis of char-based acidic catalyst for methanolysis of waste cooking oil: An insight into a possible valorization pathway for the solid by-product of gasification / J. Ahmad, U. Rashid, F. Patuzzi [at al.] // Energy Conversion and Management. – 2018. – Vol. 58. – P. 186–192. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.059>.
62. Alexander P. Losses, inefficiencies and waste in the global food system / P. Alexander, C. Brown, A. Arneith [at al.] // Agricultural Systems. – 2017. – V. 153. – P. 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.014>.
63. Arise A. K. Influence of processing methods on the antinutrients, morphology and in-vitro protein digestibility of jack bean / A. K. Arise, M. S. Abiodun, C. Ihuoma Cynthia [at al.] // Food Chemistry Advances. – 2022. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100078>
64. Assandri D. Suitability of Composting Process for the Disposal and Valorization of Brewer’s Spent Grain / D. Assandri, N. Pampuro, G. Zara, [at al.] // Agriculture. – 2020. – Vol. 11(1). – Article 1. <https://doi.org/10.3390/agriculture11010002>

65. Das B. K., Hoque S. M. N. Assessment of the Potential of Biomass Gasification for Electricity Generation in Bangladesh / B. K. Das, S. M. N. Hoque // *Journal of Renewable Energy*. – 2014. Vol. – 1–10. doi:10.1155/2014/429518
66. Awasthi S. K. Changes in global trends in food waste composting: Research challenges and opportunities / S. K. Awasthi, S. Sarsaiya, M. K. Awasthi [at al.] // *Bioresource Technology*. –2020. – Vol. 299, 122555. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122555>
67. Aycan dümenci N. Identifying the maturity of co-compost of olive mill waste and natural mineral materials: Modelling via ANN and multi-objective optimization / Aycan dümenci N., Cagcag yolcu O., Aydin temel F. [at al.] // *Bioresource Technology*. – 2020. – Vol. 338, 125516. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125516>
68. Base matrices – invariant digital identifiers of food products / L. A. Oganesyants, S. A. Khurshudyan, A. G. Galstyan [et al.] // *Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук*. – 2018. – Vol. 6. – No 432. – P. 6-15. – DOI 10.32014/2018.2518-170X.30.
69. Bekiroglu H. Determination of rheological, melting and sensorial properties and volatile compounds of vegan ice cream produced with fresh and dried walnut milk / H. Bekiroglu, H. Goktas, D. Karaibrahim, [et al.] // *International Journal of Gastronomy and Food Science*. – 2022. – Vol. 28, 100521. <https://doi.org/10.1016/J.IJGFS.2022.100521>
70. Beyene H. D. Current updates on waste to energy (WtE) technologies: A review / H. D. Beyen, A. A. Werkneh, T. G. Ambaye // *Renewable Energy Focus*. – 2022. – Vol. 4. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2017.11.001>
71. Cai Y. High-Yield Hypocrellin A Production in Solid-State Fermentation by *Shiraia* sp. SUPER-H168 / Y. Cai, X Liang, X. Liao [et al.] // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. – 2010. – Vol. 160(8). – P. 2275–2286. <https://doi.org/10.1007/s12010-009-8728-3>
72. Carboué Q. Experimental design and solid state fermentation: A holistic approach to improve cultural medium for the production of fungal secondary

metabolites / Carboué Q., Claeys-Bruno M., Bombarda I. [et al.] // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. – 2010. – Vol. 176. – P. 101–107. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2018.03.011>

73. Chavan S. Bioconversion of organic wastes into value-added products: A review / S. Chavan, B. Yadav, A. Atmakuri [et al.] // *Bioresource Technology*. – 2022. – Vol. 344, 126398. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126398>

74. Chen D. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review / D. Chen, L. Yin, H. Wang, P. He // *Waste Management*. – 2014. – Vol. 34(12). – P. 2466–2486. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.004>

75. Chen H. An innovative waste-to-energy system integrated with a coal-fired power plant / Chen H., Zhang M., Xue K. [et al.] // *Energy*. - 2020. – Vol. 194. - P. 116893. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116893>

76. De Clercq D. A review of global strategies promoting the conversion of food waste to bioenergy via anaerobic digestion / D. De Clercq D., Z. Wen, Z., O. Gottfried [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 194. - P. 204–221. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.047>

77. Dong J. Effect of Operating Parameters and Moisture Content on Municipal Solid Waste Pyrolysis and Gasification / J. Dong, Y. Ch, Y. Tang, [et al.] // *Energy & Fuels*. – 2017. – Vol. 30(5). – P. 3994–4001. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00042>

78. Etim A. O. A green process synthesis of bio-composite heterogeneous catalyst for the transesterification of linseed-marula bi-oil methyl ester / A. O. Etim, P. Musonge, A. C. Eloka-Eboka A. C. // *Results in Engineering*. – 2017. – Vol. 16, 100645. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100645>

79. Fonseca G.G. The yeast *Kluyveromyces marxianus* and its biotechnological potential / Fonseca, G.G., Heinzle, E., Wittmann, C. [et al.] // *Appl Microbiol Biotechnol*. – 2008. - Vol. 7. – P. 339–354 <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1458-6>

80. Funke A. Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering / A. Funke, F. Ziegler //

Biofuels, Bioproducts and Biorefining. – 2010. – Vol. 4(2). - P. 160–177.
<https://doi.org/10.1002/bbb.198>

81. Garlapalli R. K. Pyrolysis of hydrochar from digestate: Effect of hydrothermal carbonization and pyrolysis temperatures on pyrochar formation / R. K. Garlapalli, B. Wirth, M. T. Reza // *Bioresource Technology*. – 2016. – Vol. 220. – P. 168–174. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.071>

82. Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention; study conducted for the International Congress Save Food / J. Gustavsson, C. Cederberg, U. Sonesson, R. Van Otterdijk, A. Meybeck // *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. – 2011.

83. Gohain M. Musa balbisiana Colla peel as highly effective renewable heterogeneous base catalyst for biodiesel production / M. Gohain, A. Devi, D. Deka // *Industrial Crops and Products*. – 2017. – Vol. 109. - P. 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.08.006>

84. Guo X. Worldwide Hotspot Analysis on Food Loss and Waste, Associated Greenhouse Gas Emissions, and Protein Losses / X. Guo, J. Broeze, J. Groot [et al.] // *Sustainability*. – 2010. – Vol. 12. –P. 7488. <https://doi.org/10.3390/su12187488>

85. Gustavsson J. Definitional framework for food waste–Full report. Project report FUSIONS / J. Gustavsson, H. Bos-Brouwers, T. Timmermans // SIK - The Swedish Institute for Food and Biotechnology. – 2014. – 134 p.

86. Hegde S. Sustainable waste-to-energy technologies: fermentation / Trabold & C. W. Babbitt (Eds.) // *Sustainable Food Waste-To-energy Systems*. - Academic Press, Chapter 5. – 2018. - P. 69–88 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811157-4.00005-X>

87. Hoffmann J. Conceptual design of an integrated hydrothermal liquefaction and biogas plant for sustainable bioenergy production / J. Hoffmann, S. Rudra, S. S. Toor // *Bioresource Technology*. – 2013. – Vol. 129. – P. 402–410. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.11.051>

88. Kambo H. S. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications / H. S. Kambo, A. Dutta // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 45. – P. 359–378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.050>
89. Kan T. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters / Kan T., Strezov V., Evans T. J. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 5. – P. 1126–1140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.185>
90. Kassim F. O. Integrated conversion technologies for sustainable agri-food waste valorization: A critical review / F. O. Kassim, C. L. P. Thomas, O. O. D. Afolab // *Biomass and Bioenergy*. – 2022. – Vol. 156. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106314>
91. Kazemi Shariat Panahi H. Bioethanol production from food wastes rich in carbohydrates / H. Kazemi Shariat Panahi, M. Dehhaghi, G. Guillemin // *Current Opinion in Food Science*. – 2022. – Vol. 43. – P. 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.11.001>
92. Kayode A. Biochar: An Imperative Amendment for Soil and the Environment / A. Kayode // *BoD – Books on Demand*. – 2019. – 127 p.
93. Kong X. Efficient l-lactic acid production from corncob residue using metabolically engineered thermo-tolerant yeast / X. Kong, B. Zhang, Y. Hua // *Bioresource Technology*. – 2022. – Vol. 273. – P. 220–230. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.018>
94. Kosseva M. R. Chapter 11 - Modeling, Monitoring, and Process Control for Intelligent Bioprocessing of Food Industry Wastes and Wastewater / In M. R. Kosseva, C. Webb // *Food Industry Wastes*. – 2013. (Academic Press. – P. 191–213. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391921-2.00011-1>
95. Kritzer P. An assessment of supercritical water oxidation (SCWO): Existing problems, possible solutions and new reactor concepts / P. Kritze, E. Dinjus // *Chemical Engineering Journal*. – 2001. – Vol. 83(3). – P. 207–214. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(00\)00255-2](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(00)00255-2)

96. Kruse A. Hydrothermal gasification of biomass: Consecutive reactions to long-living intermediates / A. Kruse, P. Bernolle, N. Dahmen [et al.] // *Energy & Environmental Science*. – 2022. – Vol. 3(1). – P. 136–143. <https://doi.org/10.1039/B915034J>

97. Kuczman O. Food waste anaerobic digestion of a popular restaurant in Southern Brazil / O. Kuczman, M. V. D. Gueri, De Souza [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 196. – P. 382–389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.282>

98. Kuo W.-T. Use of washed municipal solid waste incinerator bottom ash in pervious concrete / W.-T. Kuo, C.-C. Liu, D.-S. Su // *Cement and Concrete Composites*. – 2018. – Vol. 37. – P. 328–335. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.001>

99. Larios-Cruz R. Valorization of Grapefruit By-Products as Solid Support for Solid-State Fermentation to Produce Antioxidant Bioactive Extracts / R. Larios-Cruz, J. Buenrostro-Figueroa, Prado-Barragán [et al.] // *Waste and Biomass Valorization*. – 2018. – Vol. 10(4). – P. 763–769. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0156-y>

100. Le Quéré C. Global carbon budget 2014 / C. Le Quéré, R. Moriarty, R. M. Andrew [et al.] // *Earth System Science Data*. – 2015. – Vol. 7(1). – P. 47–85. <https://doi.org/10.5194/essd-7-47-2015>

101. Lee J. Recent achievements in platform chemical production from food waste / J. Lee, W.-H. Chen, Y.-K. Park // *Bioresource Technology*. – 2022. – Vol. 366, 128204. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128204>

102. Liang C.-H. Influences of carbon and nitrogen source addition, water content, and initial pH of grain medium on hispidin production of *Phellinus linteus* by solid-state fermentation / C.-H. Liang, C.-Y. Wu, W.-J. Ho, Z.-C. Liang // *Journal of Bioscience and Bioengineering*. – 2022. – Vol. 130(6). – P. 616–621. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2020.08.002>

103. Lu X. Effects of waste sources on performance of anaerobic co-digestion of complex organic wastes: Taking food waste as an example / X. Lu,

W. Jin, S. Xue, X. Wang // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 7(1). - Article 1.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-16068-z>

104. Mao C. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion / C. Ma, Y. Feng, X. Wang, G. Ren // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 45. – P. 540–555.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>

105. McKendry P. Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies / P. McKendry // *Bioresource Technology*. – 2002. – Vol. 83(1). – P. 47–54. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5)

106. Meena A. Composting: Phases and Factors Responsible for Efficient and Improved Composting / A. Meena, M. Karwal, D. Dutta, R. P. Mishra// - 2021. – Vol. 3. - Issue 01. – P. 85-90. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13546.95689>

107. Mendez-Carmona J. Y. Solid-state fermentation for recovery of carotenoids from tomato waste / J. Y. Mendez-Carmona, K. N. Ramírez-Guzman, J. A. Ascacio-Valdes [et al.] // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. – 2022. – Vol. 80. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103108>

108. Mohamad Asri N. Low molecular weight peptides generated from palm kernel cake via solid state lacto-fermentation extend the shelf life of bread / N. Mohamad Asri, B. J. Muhialdin, Zarei, M., Saari, N. // *LWT*. – 2020. – Vol. 134, 110206. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110206>

109. Molino A. Biomass gasification technology: The state of the art overview / A. Molino, S. Chianese, D. Musmarra // *Journal of Energy Chemistry*. - 2020. – Vol. 25(1). - P. 10–25. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2015.11.005>

110. Murdoch W. Interpretable machine learning: Definitions, methods, and applications / W. J Murdoch, C. Singh, K. Kumbier [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2022. – Vol. 116(44). – P. 22071–22080. <https://doi.org/10.1073/pnas.1900654116>

111. Odude V. O. Application of Agricultural Waste-Based Catalysts to Transesterification of Esterified Palm Kernel Oil into Biodiesel: A Case of Banana Fruit Peel Versus Cocoa Pod Husk / V. O. Odude, A. J. Adesina, O. O. Oyetunde [et

al.] // Waste and Biomass Valorization. - 2019. – Vol. 10(4). - P. 877–888.
<https://doi.org/10.1007/s12649-017-0152-2>

112. Oh E. J. Enhanced xylitol production through simultaneous co-utilization of cellobiose and xylose by engineered *Saccharomyces cerevisiae* / Oh E. J., Ha S.-J., Rin Kim S. [et al.] // Metabolic Engineering. – 2019. – Vol. 15. – P. 226–234. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2012.09.003>

113. Oh S. T. Thermodynamic equilibrium model in anaerobic digestion process / S. T. Oh, A. D. Martin // Biochemical Engineering Journal. -2015. Vol. 15. 34(3). - P. 256–266. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2006.12.011>

114. S. Papanikolaou Biotechnological conversion of waste cooking olive oil into lipid-rich biomass using *Aspergillus* and *Penicillium* strains / S. Papanikolaou, A. Aggelis, A. Dimou, S. Fakas [et al.] // Journal of Applied Microbiology. - 2011. doi/full/10.1111/j.1365-2672.2011.04961.x

115. Paritosh K. Organic Fraction of Municipal Solid Waste: Overview of Treatment Methodologies to Enhance Anaerobic Biodegradability / K. Paritosh, M. Yadav, S. Mathur [et al.] // Frontiers in Energy Research. - 2018. - Vol. 6. – Article 7.

116. Parthiba Karthikeyan O. Pretreatment of food waste for methane and hydrogen recovery: A review / O. Parthiba Karthikeyan, E. Trably, S. Mehariya // Bioresource Technology. – 2018. - Vol. 249.- P. 1025–1039. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.105>

117. Patra J. Bioconversion of Municipal Solid Wastes for Bioethanol Production / J. Patra, A. Basu, A. Mishra, N. K. Dhal // Biosciences Biotechnology Research Asia. – 2017. - Vol. 14(3). - P. 1151–1157. <https://doi.org/10.13005/bbra/2554>

118. Pecchi M. Coupling anaerobic digestion with gasification, pyrolysis or hydrothermal carbonization: A review / M. Pecchi, M. Baratieri // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - Vol. 105. - P. 462–475. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.003>

119. Pleissner D. Food waste as nutrient source in heterotrophic microalgae cultivation / D. Pleissner, W. C. Lam, Z. Sun, C. S. K. Lin // *Bioresource Technology*. - 2013. - Vol. 137. - P. 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.088>
120. Qiao W. Evaluation of biogas production from different biomass wastes with/without hydrothermal pretreatment / W. Qiao, X. Yan, A. Ye [et al.] // *Renewable Energy*. - 2017. - Vol. 36(12). - P.3313–3318. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.002>
121. Rahman W. U. Biodiesel synthesis from eucalyptus oil by utilizing waste egg shell derived calcium based metal oxide catalyst / W. U. Rahman, A. Fatima, A. H. Anwer [et al.] // *Process Safety and Environmental Protection*. -Vol. 122. - P. 313–319. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.12.015>
122. Reijnders L. Disposal, uses and treatments of combustion ashes: A review / L. Reijnders // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2005. - Vol.43(3). - P. 313–336. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.06.007>
123. Reza M. T. Hydrothermal carbonization: Fate of inorganics / M. T. Reza, J. G. Lynam, M. H. Uddin, C. J. Coronella // *Biomass and Bioenergy*. – 2013. -Vol. 49. - P. 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.12.004>
124. Sadh P. K. Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: A review / P. K. Sadh, S. Duhan, J. S. Duhan, // *Bioresources and Bioprocessing*. – 2018. - Vol. 5(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0187-z>
125. Saeed S. Production of Gallic Acid Under Solid-State Fermentation by Utilizing Waste from Food Processing Industries / S. Saeed, S. Aslam, T. Mehmood [et al.] // *Waste and Biomass Valorization*. – 2021. - Vol. 12(1). – P. 155–163. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-00980-z>
126. Sharma P. Biotransformation of food waste into biogas and hydrogen fuel – A review / P. Sharma, A. Bano, S. P. Singh [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. - 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.081>

127. Siskin M. Reactivity of Organic Compounds in Superheated Water: General Background / M. Siskin, A. R. Katritzky // *Chemical Reviews*. – 2001. - Vol. 101(4). – P. 825–836. doi:10.1021/cr000088z

128. Smith A. M. Fate of inorganic material during hydrothermal carbonisation of biomass: Influence of feedstock on combustion behaviour of hydrochar / Smith A. M., Singh, S., & Ross, A. B. // *Fuel*. – 2016. - Vol. 169. – P. 135–145. doi.org/10.1016/j.fuel.2015.12.006

129. Smith P. How much land-based greenhouse gas mitigation can be achieved without compromising food security and environmental goals? / Smith P., Haberl H., Popp, A. [et al.] // *Global Change Biology*. - 2016. - Vol. 19(8). – P. 2285–2302. doi.org/10.1111/gcb.12160

130. Soltanian S. A critical review of the effects of pretreatment methods on the exergetic aspects of lignocellulosic biofuels / Soltanian, S., Aghbashlo, M., Almasi, F. [et al.] // *Energy Conversion and Management*. - 2020. - Vol. 212, 112792. doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112792

131. Spang E. Food Loss and Waste: Measurement, Drivers, and Solutions / Spang, E., Achmon, Y., Donis-Gonzalez, I. [et al.] // *Annual Review of Environment and Resources*. – 2020. - Vol. 44. doi.org/10.1146/annurev-environ-101718-033228

132. Susastriawan A. A. P. Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review / Susastriawan A. A. P., Saptoadi, H., & Purnomo. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. - 2017. - Vol. 76. – P. 989–1003. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.112>

133. Tomczyk A. Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects / Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. // *(Reviews in Environmental Science and BioTechnology)*. - 2020. - Vol. 19(1). – P. 191–215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>

134. Tonini D. Environmental impacts of food waste: Learnings and challenges from a case study on UK / D. Tonini, P. F. Albizzati, T. F. Astrup // *Waste*

Management. – 2018. - Vol. 76. – P. 744–766.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.032>

135. Torri C. Biochar enables anaerobic digestion of aqueous phase from intermediate pyrolysis of biomass / C. Torri, D. Fabbri // *Bioresource Technology*. – 2018. - Vol. 172.- P. 335–341. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.021>

136. Uçkun Kiran E. Bioconversion of food waste to energy: A review / E. Uçkun Kiran, A. P. Trzcinski, Ng, Y. Liu // *Fuel*. – 2014. - Vol 134. – P. 389–399. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.05.074>

137. E. Uçkun Kiran Microbial oil produced from biodiesel by-products could enhance overall production / E. Uçkun Kiran, A. Trzcinski, C. Webb // *Bioresource Technology*. – 2013. - Vol. 129. – P. 650–654. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.11.152>

138. Wan X. Machine learning framework for intelligent prediction of compost maturity towards automation of food waste composting system. / Wan, X., Li, J., Xie, L., Wei, Z. [et al.] // *Bioresource Technology*. – 2022. - Vol. 365, 128107. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128107>

139. Watson J. Gasification of biowaste: A critical review and outlooks / Watson, J., Zhang, Y., Si, B. [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. - Vol. 83. – P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.003>

140. Xue W. A fast and easy method for predicting agricultural waste compost maturity by image-based deep learning / Xue, W., Hu, X., Wei, Z., [et al.] // *Bioresource Technology*. – 2019. - Vol. 290, 121761. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121761>

141. Yadav V. Interval-valued facility location model: An appraisal of municipal solid waste management system / Yadav, V., Karmakar, S., Dikshit, A. K., & Bhurjee, A. K. // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. - Vol. 171. – P. 250–263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.233>

142. Zahan K. A. Monascorubin production by *Penicillium minioluteum* ED24 in a solid-state fermentation using sesame seed cake as substrate / Zahan, K.

A., Ismail, N. S., Leong, C. R. [et al.] // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. - Vol. 31. – P.127–135. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.347>

143. Zeng X. Production of natamycin by *Streptomyces gilvosporeus* Z28 through solid-state fermentation using agro-industrial residues / Zeng, X., Miao, W., Zeng, H. [et al.] // *Bioresource Technology*. – 2019. - Vol. 273. – P. 377–385. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.009>

144. Zhang, B. Simultaneous fermentation of glucose and xylose at elevated temperatures co-produces ethanol and xylitol through overexpression of a xylose-specific transporter in engineered *Kluyveromyces marxianus* / Zhang, B., Zhang, J., Wang, D. [et al.] // *Bioresource Technology*. -2020. - Vol. 216. – P. 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.068>

145. Zhang D. Q. Municipal solid waste management in China: Status, problems and challenges / Zhang, D. Q., Tan, S. K., & Gersberg, R. M. // *Journal of Environmental Management*. – 2010. - Vol. 91(8). – P. 1623–1633. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.03.012>

146. Zhang L. Improving green waste composting by addition of sugarcane bagasse and exhausted grape marc / Zhang L., Sun X. // *Bioresource Technology*. – 2022. – 218, 335–343. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.097>

147. The state of food and agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction [Электронный ресурс]. <https://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf>. 10.11.2022.

148. Food wastage footprint full-cost accounting: Final report. [Электронный ресурс]. <https://www.fao.org/3/i3991e/i3991e.pdf>

149. К 2030 году численность населения мира увеличится на миллиард человек. Департамент по экономическим и социальным вопросам ООН [Электронный ресурс]. <https://www.un.org/development/desa/ru/news/population/world-population-prospects-2017.html>. 15.11.2022.

150. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года. [Электронный ресурс].

<http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=10279228>.
10.11.2022.

151. Реализация иерархии обращения с пищевыми отходами и потерями продовольствия в России. [Электронный ресурс]. https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/faoweb/RussianFederation/pdf/Т.Нагорская_FoodWaste_25.01.2022.pdf. 1.10.2022.

152. Food wastage footprint. Climate Change. [Электронный ресурс]. www.fao.org/3/a-bb144e.pdf. 1.10.2022.

153. Какие отходы 2.0: глобальный снимок управления твердыми отходами до 2050 года. [Электронный ресурс]. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>. 15.10.2022.

154. Перспективы мирового народонаселения на 2022 год. [Электронный ресурс]. <https://population.un.org/wpp/>

155. Создание устойчивого продовольственного будущего. [Электронный ресурс]. https://files.wri.org/s3fs-public/creating-sustainable-food-future_2.pdf. 1.10.2022.

156. Обеспечение устойчивых моделей потребления и производств. [Электронный ресурс]. <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg>. 12. 15.10.2022.

Приложение

Листинг программы по определению целесообразности переработки молочной продукции с остаточным сроком годности

```
function _1(md){return(
md`# Определение целесообразности переработки молочной продукции с
остаточным сроком годности`
)}}

function _2(md){return(
md`---

## 1. Выбор весов признаков целесообразности переработки

<br>

### Признаки целесообразности

- (S) Экономическая целесообразность
- (T) Технологическая оснащенность
- (E) Экологическое воздействие

Точками отмечены веса, указанные экспертами при опросе`
)}}

```

```
function _weights(ternarySlider){return(
ternarySlider({
value: [0.25, 0.2, 0.55],
labels: ["S", "T", "E"]
})
)}
```

```
function _4(d3,weights,md){return(
md`Выбраны веса:
```

```
- ${d3.format(".2f")(weights[0])} для Экономической целесообразности
- ${d3.format(".2f")(weights[1])} для Технологической оснащённости
- ${d3.format(".2f")(weights[2])} для Экологического воздействия`
)}
```

```
function _5(md){return(
md`---
```

```
## 2. Установка критериев желательности`
)}
```

```
function _6(crits,md){return(
```

```
md`### Критерии желательности
```

```
|№| Критерий | Экономическая целесообразность | Технологическая  
оснащенность | Экологическое воздействие | Содержательное описание  
критерия| Базовый показатель желательности|
```

```
|--|---|---|---|---|
```

```
|1|${crits[0]}|+|+|+|67%|0.8|
```

```
|||||50%|0.37|
```

```
|2|${crits[1]}|+|+|5|0.8|
```

```
|||||2|0.37|
```

```
|3|${crits[2]}|+|+|1000 млн руб.|0.8|
```

```
|||||100 млн руб.|0.37|
```

```
|4|${crits[3]}|+|+|5|0.99|
```

```
|||||2|0.63|
```

```
|5|${crits[4]}|+|+|1000 млн руб.|0.99|
```

```
|||||100 млн руб.|0.63|
```

```
|6|${crits[5]}|+|+|1000 млн руб.|0.8|
```

```
|||||10 000 млн руб.|0.37|
```

```
|7|${crits[6]}|+|+|8 баллов| 0.8|
```

```
|||||3 балла|0.37|`
```

```
)}
```

```
function _7(md){return(
md`### Выбор соответствия значений критериев с показателями
желательности`
)}
```

```
function _crit1(Inputs,crits,interval){return(
Inputs.form({
label: `${crits[0]}, % согласных экспертов`,
option1: interval([0, 100], {
label: "Значения",
step: 0.01,
value: [50, 67],
format: ([start, end]) => `${start}% ... ${end}%`
}),
option2: interval([0.01, 0.99], {
label: "Желательность ",
step: 0.01,
value: [0.37, 0.8],
format: ([start, end]) => `${start} ... ${end}`
})
})
})
})
```

```

function _crit2(Inputs,crits,interval){return(
Inputs.form({
label: `${crits[1]}`,
option1: interval([0, 10], {
label: "Значения",
step: 1,
value: [2, 5],
format: ([start, end]) => `${start} ... ${end}`
}),
option2: interval([0.01, 0.99], {
label: "Желательность",
step: 0.01,
value: [0.37, 0.8],
format: ([start, end]) => `${start} ... ${end}`
})
})
)}

```

```

function _crit3(Inputs,crits,interval){return(
Inputs.form({
label: `${crits[2]}, млн руб.`,
option1: interval([0, 1500], {

```

```

label: "Значения",
step: 0.1,
value: [100, 1000],
format: ([start, end]) => `${start} ... ${end}`
}),
option2: interval([0.01, 0.99], {
label: "Желательность ",
step: 0.01,
value: [0.37, 0.8],
format: ([start, end]) => `${start} ... ${end}`
})
})
})
})

```

```

function _crit4(Inputs,crits,interval){return(
Inputs.form({
label: `${crits[3]}`,
option1: interval([0, 10], {
label: "Значения",
step: 1,
value: [2, 5],
format: ([start, end]) => `${start} ... ${end}`

```

```

    }),
    option2: interval([0.01, 0.99], {
      label: "Желательность ",
      step: 0.01,
      value: [0.63, 0.99],
      format: ([start, end]) => `${start} ... ${end}`
    })
  })
})
})

```

```

function _crit5(Inputs,crits,interval){return(
Inputs.form({
  label: `${crits[4]}, млн руб.`,
  option1: interval([0, 1500], {
    label: "Значения",
    step: 0.1,
    value: [100, 1000],
    format: ([start, end]) => `${start} ... ${end}`
  }),
  option2: interval([0.01, 0.99], {
    label: "Желательность ",
    step: 0.01,

```

```

    value: [0.63, 0.99],
    format: ([start, end]) => `${start} ... ${end}`
  })
})
}}
```

```

function _crit6(Inputs,crits,interval){return(
Inputs.form({
  label: `${crits[5]}, млн руб.`,
  option1: interval([0, 15000], {
    label: "Значения",
    step: 1,
    value: [1000, 10000],
    format: ([start, end]) => `${start} ... ${end}`
  }),
  option2: interval([0.01, 0.99], {
    label: "Желательность ",
    step: 0.01,
    value: [0.37, 0.8],
    format: ([start, end]) => `${start} ... ${end}`
  })
})
})
```

```
)}
```

```
function _crit7(Inputs,crits,interval){return(  
Inputs.form({  
  label: `${crits[6]}, баллов`,  
  option1: interval([0, 10], {  
    label: "Значения",  
    step: 1,  
    value: [3, 8],  
    format: ([start, end]) => `${start} ... ${end}`  
  }),  
  option2: interval([0.01, 0.99], {  
    label: "Желательность ",  
    step: 0.01,  
    value: [0.37, 0.8],  
    format: ([start, end]) => `${start} ... ${end}`  
  })  
})  
})  
})
```

```
function _15(md){return(  
md`---
```

3. Расчет критериев желательности и интегрального показателя целесообразности для продукта`

}}

```
function _16(tex,md){return(
```

```
md`### Формула для расчета интегрального показателя целесообразности
```

- $\{tex`S\}$ — вес признака Экономическая целесообразность

- $\{tex`T\}$ — вес признака Технологическая оснащенность

- $\{tex`E\}$ — вес признака Экологическое воздействие

- $\{tex`d_i(x)\}$ — значение функции желательности для $\{tex`i\}$ -го критерия, $\{tex`x\}$ — абсолютное значение критерия

- $\{tex`w_{Xl}\}$ — вес критерия $\{tex`l\}$ в интегральном показателе желательности для признака $\{tex`X\}$

Функция Харрингтона с линейной функцией соответствия в общем виде:

```
 $\{tex.block\}$ 
```

```
 $d(x) = e^{\{e^{-a(x - b)}\}}$ ,  $\backslash,\backslash,x \in \mathbb{R}$ 
```

```
`}
```

Интегральный показатель для определения целесообразности переработки продукта:

```
#{tex.block`
```

```
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}}}
```

```
`}
```

```
)}
```

```
function _17(md){return(
md`### Показатели для продукта`
)}
```

```
function _form(Inputs){return(
Inputs.form({
name: Inputs.text({
label: "Название продукта",
```

```
value: "Кисломолочный продукт"
}),
crit1: Inputs.range([0, 100], {
  label: "% экспертов, считающих переработку целесообразной",
  value: 50
}),
crit2: Inputs.range([0, 10], {
  label: "Количество перспективных способов утилизации",
  step: 1,
  value: 3
}),
crit3: Inputs.range([0, 1000], {
  label: "Объем нереализованной продукции, млн руб.",
  step: 1,
  value: 300
}),
crit4: Inputs.range([0, 10], {
  label: "Сколькими способами продукт перерабатывается сейчас",
  step: 1,
  value: 2
}),
crit5: Inputs.range([0, 1000], {
```

```

label: "Перспективы рынка переработки, млн руб.",
step: 1,
value: 400
}),
crit6: Inputs.range([0, 15000], {
label: "Требуется средств для перерабатывающей инфраструктуры",
step: 1,
value: 3000
}),
crit7: Inputs.range([0, 10], {
label: "Оценка текущего экологического ущерба",
step: 1,
value: 4
})
})
})
})

function _19(d3,integral,md){return(
md`Интегральный уровень желательности: ${d3.format(".2f")(integral)}
(${integral > 0.5 ? "Переработка целесообразна" : "Переработка
нецелесообразна"})`
)}

```

```
function _20(chart,points){return(
chart(points)
)}
```

```
function _21(md){return(
md`<br>
<br>
<br>
```

Текущий перечень потенциальной перерабатываемой продукции:

- Молоко
- Молоко сухое
- Молочные консервы
- Мороженое
- Сыры
- Сливочное масло
- Творог и творожные продукты
- Сливки
- Ацидофилин
- Биолакт
- Варенец
- Йогурт

- Кефир
- Простокваша
- Ряженка
- Сметана`

)}

```
function _22(md){return(
md`<br>
<br>
<br>
### Appendix`
)}
```

```
function _experts(){return(
[
[ '0.18', '0.14', '0.68' ],
[ '0.20', '0.19', '0.61' ],
[ '0.12', '0.28', '0.60' ],
[ '0.14', '0.21', '0.65' ],
[ '0.17', '0.29', '0.54' ],
[ '0.14', '0.26', '0.60' ],
[ '0.17', '0.19', '0.64' ],
```

```

    [ '0.12', '0.19', '0.69' ],
    [ '0.13', '0.25', '0.62' ],
    [ '0.13', '0.28', '0.59' ]
  ]
})

```

```

function _27($0,d3,experts,projectX,projectY)
{
  // Augment the chart with proportions from whiskey sour recipe data

  let svg = $0;

  d3.select(svg)

    // Bind and insert data elements using a data-join

    .selectAll("circle.data")

    .data(experts)

    .join("circle")

    .attr("class", "data")

    // `projectX` and `projectY` compute coordinates in [-1, 1] for
    // an input composition.

    .attr("cx", (d) => svg.R projectX(svg.corners, d))

    .attr("cy", (d) => svg.R projectY(svg.corners, d))

    // Apply visual properties

    .attr("r", 1)

```

```

.attr("stroke", "#fff")

.attr("fill", "#000")

// Move the data elements below the drag surface

.lower();

}

function _crits(){return(

[

"Наличие экспертного мнения",

"Количество способов утилизации",

"Объемы нереализованной продукции",

"Текущие способы утилизации",

"Рынок сбыта переработанной продукции",

"Инвестиции в перерабатывающую инфраструктуру",

"Текущий экологический ущерб"

]

)}

function _harrington(){return(

function harrington({ a, b }, x) {

return Math.exp(-Math.exp(-a (x - b)));

}

}

```

```
)}
```

```
function
```

```
_harr_calc(harrington,crit1ps,crit2ps,crit3ps,crit4ps,crit5ps,crit6ps,crit7ps){return(
```

```
function (form) {
```

```
return [
```

```
harrington(crit1ps, form.crit1),
```

```
harrington(crit2ps, form.crit2),
```

```
harrington(crit3ps, form.crit3),
```

```
harrington(crit4ps, form.crit4),
```

```
harrington(crit5ps, form.crit5),
```

```
harrington(crit6ps, form.crit6),
```

```
harrington(crit7ps, form.crit7)
```

```
];
```

```
}
```

```
)}
```

```
function _longitude(d3,Plot,points){return(
```

```
d3
```

```
.scalePoint(new Set(Plot.valueof(points, "key")), [180, -180])
```

```
.padding(0.5)
```

```
.align(1)
```

```
)}
```

```

function _points(crits,form,harr){return(
crits.map((e, i) => ({
  name: form.name,
  key: e,
  value: harr[i]
}))
)}

```

```

function _harr(harr_calc,form){return(
harr_calc(form)
)}

```

```

function _calculateHarringtonParameters(){return(
function calculateHarringtonParameters([p1, p2], [d1, d2]) {
  const ln_ln_d1 = Math.log(-Math.log(d1));
  const ln_ln_d2 = Math.log(-Math.log(d2));

  const a = -(ln_ln_d1 - ln_ln_d2) / (p1 - p2);
  const b = p1 + ln_ln_d1 / a;
  return { a, b };
}
)}

```

```
)}
```

```
function _crit1ps(calculateHarringtonParameters,crit1){return(  
calculateHarringtonParameters(crit1.option1, crit1.option2)  
)}
```

```
function _crit2ps(calculateHarringtonParameters,crit2){return(  
calculateHarringtonParameters(crit2.option1, crit2.option2)  
)}
```

```
function _crit3ps(calculateHarringtonParameters,crit3){return(  
calculateHarringtonParameters(crit3.option1, crit3.option2)  
)}
```

```
function _crit4ps(calculateHarringtonParameters,crit4){return(  
calculateHarringtonParameters(crit4.option1, crit4.option2)  
)}
```

```
function _crit5ps(calculateHarringtonParameters,crit5){return(  
calculateHarringtonParameters(crit5.option1, crit5.option2)  
)}
```

```
function _crit6ps(calculateHarringtonParameters,crit6){return(
calculateHarringtonParameters(crit6.option1, crit6.option2)
)}
```

```
function _crit7ps(calculateHarringtonParameters,crit7){return(
calculateHarringtonParameters(crit7.option1, crit7.option2)
)}
```

```
function _chart(Plot,d3,longitude,svg){return(
(points, faceted = false) => {
  const newfacet = faceted ? { facet: { data: points, y: "name" } } : {};
  return Plot.plot({
    width: 600,
    marginLeft: 50,
    inset: 50,
    projection: {
      type: "azimuthal-equidistant",
      rotate: [0, -90],
      // Note: 0.625° corresponds to max. length (here, 0.5), plus enough room for the
      labels
      domain: d3.geoCircle().center([0, 90]).radius(1.1)()
    },
    facet: faceted ? { data: points, y: "name" } : {},
```

```
color: {  
  legend: true,  
  scheme: "Sinebow"  
},  
marks: [  
  // grey discs  
  Plot.geo([0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0], {  
    geometry: (r) => d3.geoCircle().center([0, 90]).radius(r()),  
    stroke: "black",  
    fill: "black",  
    strokeOpacity: 0.3,  
    fillOpacity: 0.03,  
    strokeWidth: 0.5  
  }),  
  
  // white axes  
  Plot.link(longitude.domain(), {  
    x1: longitude,  
    y1: 90 - 1,  
    x2: 0,  
    y2: 90,  
    stroke: "white",
```

```
strokeOpacity: 0.5,  
strokeWidth: 2.5  
}),  
  
// tick labels  
Plot.text([0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0], {  
  x: 180,  
  y: (d) => 90 - d,  
  dx: 2,  
  textAnchor: "start",  
  text: (d) => d,  
  fill: "currentColor",  
  stroke: "white",  
  fontSize: 8  
}),  
  
// axes labels  
Plot.text(longitude.domain(), {  
  x: longitude,  
  y: 90 - 1.1,  
  text: Plot.identity,  
  lineWidth: 5,
```

```
fontSize: 14

}),

// areas

Plot.area(points, {

  x1: ({ key }) => longitude(key),

  y1: ({ value }) => 90 - value,

  x2: 0,

  y2: 90,

  fill: "name",

  stroke: "name",

  curve: "cardinal-closed"

}),

// points

Plot.dot(points, {

  x: ({ key }) => longitude(key),

  y: ({ value }) => 90 - value,

  fill: "name",

  stroke: "white"

}),
```

```

// interactive labels

Plot.text(

  points,

  Plot.pointer({

    x: ({ key }) => longitude(key),

    y: ({ value }) => 90 - value,

    text: (d) => `${(100 * d.value).toFixed(0)}%: ${d.name}`,

    textAnchor: "start",

    dx: 4,

    fill: "currentColor",

    stroke: "white",

    maxRadius: 10

  })

),

```

```

// interactive opacity on the areas

```

```

() =>

```

```

svg`<style>

```

```

  g[aria-label=area] path {fill-opacity: 0.1; transition: fill-opacity .2s;}

```

```

  g[aria-label=area]:hover path:not(:hover) {fill-opacity: 0.05; transition: fill-
opacity .2s;}

```

```

  g[aria-label=area] path:hover {fill-opacity: 0.3; transition: fill-opacity .2s;}

```

```

,

```

```
    ]  
  });  
}  
}}
```

```
function _integral(weights, masspow) {return(  
  weights[0] masspow(1, 3, 5, 6) +  
  weights[1] masspow(1, 2, 4, 6) +  
  weights[2] masspow(1, 3, 4, 7)  
)}
```

```
function _masspow(harr) {return(  
  function (...nums) {  
    return nums.reduce((acc, curr) => acc * Math.pow(harr[curr - 1], 1 / 4), 1);  
  }  
)}
```

```
function _45(harr) {return(  
  harr  
)}
```

```
function _46(masspow) {return(  
  masspow
```

```
masspow(1, 3, 5, 6)
```

```
}}
```

```
export default function define(runtime, observer) {
```

```
  const main = runtime.module();
```

```
  main.variable(observer()).define(["md"], _1);
```

```
  main.variable(observer()).define(["md"], _2);
```

```
  main.variable(observer("viewof weights")).define("viewof weights",  
["ternarySlider"], _weights);
```

```
  main.variable(observer("weights")).define("weights", ["Generators", "viewof  
weights"], (G, _) => G.input(_));
```

```
  main.variable(observer()).define(["d3","weights","md"], _4);
```

```
  main.variable(observer()).define(["md"], _5);
```

```
  main.variable(observer()).define(["crits","md"], _6);
```

```
  main.variable(observer()).define(["md"], _7);
```

```
  main.variable(observer("viewof crit1")).define("viewof crit1",  
["Inputs","crits","interval"], _crit1);
```

```
  main.variable(observer("crit1")).define("crit1", ["Generators", "viewof crit1"], (G,  
_) => G.input(_));
```

```
  main.variable(observer("viewof crit2")).define("viewof crit2",  
["Inputs","crits","interval"], _crit2);
```

```
  main.variable(observer("crit2")).define("crit2", ["Generators", "viewof crit2"], (G,  
_) => G.input(_));
```

```

main.variable(observer("viewof      crit3")).define("viewof      crit3",
["Inputs","crits","interval"], _crit3);

main.variable(observer("crit3")).define("crit3", ["Generators", "viewof crit3"], (G,
_) => G.input(_));

main.variable(observer("viewof      crit4")).define("viewof      crit4",
["Inputs","crits","interval"], _crit4);

main.variable(observer("crit4")).define("crit4", ["Generators", "viewof crit4"], (G,
_) => G.input(_));

main.variable(observer("viewof      crit5")).define("viewof      crit5",
["Inputs","crits","interval"], _crit5);

main.variable(observer("crit5")).define("crit5", ["Generators", "viewof crit5"], (G,
_) => G.input(_));

main.variable(observer("viewof      crit6")).define("viewof      crit6",
["Inputs","crits","interval"], _crit6);

main.variable(observer("crit6")).define("crit6", ["Generators", "viewof crit6"], (G,
_) => G.input(_));

main.variable(observer("viewof      crit7")).define("viewof      crit7",
["Inputs","crits","interval"], _crit7);

main.variable(observer("crit7")).define("crit7", ["Generators", "viewof crit7"], (G,
_) => G.input(_));

main.variable(observer()).define(["md"], _15);

main.variable(observer()).define(["tex","md"], _16);

main.variable(observer()).define(["md"], _17);

main.variable(observer("viewof form")).define("viewof form", ["Inputs"], _form);

```

```

main.variable(observer("form")).define("form", ["Generators", "viewof form"],
(G, _) => G.input(_));

main.variable(observer()).define(["d3","integral","md"], _19);

main.variable(observer()).define(["chart","points"], _20);

main.variable(observer()).define(["md"], _21);

main.variable(observer()).define(["md"], _22);

const child1 = runtime.module(define1);

main.import("ternarySlider", child1);

const child2 = runtime.module(define1);

main.import("projectX", child2);

main.import("projectY", child2);

const child3 = runtime.module(define2);

main.import("interval", child3);

main.variable(observer("experts")).define("experts", _experts);

main.variable(observer()).define(["viewof
weights","d3","experts","projectX","projectY"], _27);

main.variable(observer("crits")).define("crits", _crits);

main.variable(observer("harrington")).define("harrington", _harrington);

main.variable(observer("harr_calc")).define("harr_calc",
["harrington","crit1ps","crit2ps","crit3ps","crit4ps","crit5ps","crit6ps","crit7ps"],
_harr_calc);

main.variable(observer("longitude")).define("longitude", ["d3","Plot","points"],
_longitude);

```

```

main.variable(observer("points")).define("points", ["crits","form","harr"],
_points);

main.variable(observer("harr")).define("harr", ["harr_calc","form"], _harr);

main.variable(observer("calculateHarringtonParameters")).define("calculateHarrin
gtonParameters", _calculateHarringtonParameters);

main.variable(observer("crit1ps")).define("crit1ps",
["calculateHarringtonParameters","crit1"], _crit1ps);

main.variable(observer("crit2ps")).define("crit2ps",
["calculateHarringtonParameters","crit2"], _crit2ps);

main.variable(observer("crit3ps")).define("crit3ps",
["calculateHarringtonParameters","crit3"], _crit3ps);

main.variable(observer("crit4ps")).define("crit4ps",
["calculateHarringtonParameters","crit4"], _crit4ps);

main.variable(observer("crit5ps")).define("crit5ps",
["calculateHarringtonParameters","crit5"], _crit5ps);

main.variable(observer("crit6ps")).define("crit6ps",
["calculateHarringtonParameters","crit6"], _crit6ps);

main.variable(observer("crit7ps")).define("crit7ps",
["calculateHarringtonParameters","crit7"], _crit7ps);

main.variable(observer("chart")).define("chart", ["Plot","d3","longitude","svg"],
_chart);

main.variable(observer("integral")).define("integral", ["weights","masspow"],
_integral);

main.variable(observer("masspow")).define("masspow", ["harr"], _masspow);

```

```
main.variable(observer()).define(["harr"], _45);  
main.variable(observer()).define(["masspow"], _46);  
return main;  
}
```

Листинг программы для определения оптимальных значений PV и AV

```
(*Модели как ранее*)
data = {{1, 0, 0, 0.8, 0.7}, {1, 0, 72, 3.8, 1.6}, {1, 0, 144, 6.8, 2.5}, {0, 1, 0, 1.0, 1.0},
        {0, 1, 72, 4.2, 1.8}, {0, 1, 144, 7.4, 2.6}, {0, 0, 0, 0.7, 0.5},
        {0, 0, 72, 4.5, 1.4}, {0, 0, 144, 8.3, 2.3}, {0.5, 0, 0, 0.75, 0.6},
        {0.5, 0, 72, 4.25, 1.4}, {0.5, 0, 144, 7.75, 2.2}, {0, 0.5, 0, 0.85, 0.75},
        {0, 0.5, 72, 4.35, 1.55}, {0, 0.5, 144, 7.85, 2.35}, {0.5, 0.5, 0, 0.90, 0.85},
        {0.5, 0.5, 72, 4.40, 1.65}, {0.5, 0.5, 144, 7.90, 2.45}};

modelPV = LinearModelFit[data[[All, {1, 2, 3, 4}]], {x, y, t, x^2, y^2, t^2, x*y, x*t, y*t},
        {x, y, t}];
modelAV = LinearModelFit[data[[All, {1, 2, 3, 5}]], {x, y, t, x^2, y^2, t^2, x*y, x*t, y*t},
        {x, y, t}];

mixes = {"Сметана", 1, 0}, {"Кефир", 0, 1}, {"Сливки", 0, 0},
        {"50/50 сметана+кефир", 0.5, 0.5}};

pvCurves = Table[Table[{t, modelPV[mixes[[i, 2]], mixes[[i, 3]], t}], {t, 0, 144, 1}],
        {i, Length[mixes]}};

avCurves = Table[Table[{t, modelAV[mixes[[i, 2]], mixes[[i, 3]], t}], {t, 0, 144, 1}],
        {i, Length[mixes]}};

ListLinePlot[pvCurves, PlotLegends -> mixes[[All, 1]], PlotRange -> All,
        AxesLabel -> {"Время, ч", "PV"}, ImageSize -> Large,
        PlotLabel -> "Динамика PV для различных смесей"]

ListLinePlot[avCurves, PlotLegends -> mixes[[All, 1]], PlotRange -> All,
        AxesLabel -> {"Время, ч", "AV"}, ImageSize -> Large,
        PlotLabel -> "Динамика AV для различных смесей"]

(*PV для t=72 ч*)
pv72 = Plot3D[modelPV[x, y, 72], {x, 0, 1}, {y, 0, 1 - x}, PlotRange -> All,
        AxesLabel -> {"Сметана", "Кефир", "PV, \nмэкв/кг"}, PlotLabel -> "PV, t=72 ч",
        ImageSize -> Large, BaseStyle -> 14]

(*PV для t=144 ч*)
pv144 = Plot3D[modelPV[x, y, 144], {x, 0, 1}, {y, 0, 1 - x}, PlotRange -> All,
        AxesLabel -> {"Сметана", "Кефир", "PV, \nмэкв/кг"}, PlotLabel -> "PV, t=144 ч",
        ImageSize -> Large, BaseStyle -> 14]

(*AV для t=72 ч*)
av72 = Plot3D[modelAV[x, y, 72], {x, 0, 1}, {y, 0, 1 - x}, PlotRange -> All,
        AxesLabel -> {"Сметана", "Кефир", "AV, \nмг КОН/г"}, PlotLabel -> "AV, t=72 ч",
        ImageSize -> Large, BaseStyle -> 14]

(*AV для t=144 ч*)
av144 = Plot3D[modelAV[x, y, 144], {x, 0, 1}, {y, 0, 1 - x}, PlotRange -> All,
        AxesLabel -> {"Сметана", "Кефир", "AV, \nмг КОН/г"}, PlotLabel -> "AV, t=144 ч",
        ImageSize -> Large, BaseStyle -> 14]
```

Общество с ограниченной ответственностью «Промконсервы»

Юридический адрес: 214015, г. Смоленск, ул. Парковая, д.2; Адрес обособленного подразделения: 216790, Смоленская обл., г. Рудня, пос. Молкомбината; ОГРН 1037728000452; ИНН 7728276053, КПП 673201001; КПП присвоенный обособленному подразделению: 671332001, Р/с 40702810659180000543 в Смоленском ОСБ №8609 г. Смоленск, к/с 3010181000000000632; БИК 046614632

Утверждаю



Генеральный директор ООО «Промконсервы»

Иванова Наталья Егоровна

промышленной апробации цифрового стандарта организации

Настоящим актом подтверждается проведение промышленной апробации цифрового стандарта организации СТО 0023498–022–2025 «Технологическая схема утилизации варьiruемой по составу молочной продукции с предельным сроком годности» в условиях действующего предприятия молочной промышленности.

Апробация осуществлялась в период 1 по 4 апреля 2025 г. на базе ООО «Промконсервы» (адрес Смоленская обл., г. Рудня, пос. Молкомбината), с участием специалистов предприятия и разработчика цифрового стандарта, аспиранта ФГАНУ «ВНИМИ» Рыскина Д. С.

В рамках апробации был внедрен и эксплуатировался программный комплекс контроля потоков некондиционной молочной продукции, реализующий положения цифрового СТО 0023498–022–2025. Программный комплекс обеспечивал:

- регистрацию и классификацию поступающих партий молочной продукции с предельным или истекшим сроком годности;
- формирование цифрового профиля образцов на основе данных о составе, категории продукции, факторах хранения и степени отклонения от нормативных показателей;
- автоматизированное определение приоритетного маршрута утилизации (переработки) для каждого образца в соответствии с иерархической схемой, заложенной в СТО;
- прослеживаемость принятых решений и формирование отчетных материалов для технологической и экономической оценки.

В ходе промышленной апробации программный комплекс был использован для анализа и маршрутизации 176 образцов некондиционной молочной продукции, включая: молоко питьевое, сливки, кисломолочные продукты, творожные изделия, молочные консервы. Для каждого образца определялся рациональный путь утилизации с учетом технологической реализуемости и экологической целесообразности.

По результатам апробации установлено, что цифровой СТО 0023498–022–2025 и реализующий его программный комплекс позволяют:

- систематизировать принятие решений по утилизации варьируемых по составу потоков молочной продукции;
- снизить долю субъективных экспертных решений при выборе маршрутов переработки;
- повысить прозрачность и воспроизводимость технологических схем утилизации;
- адаптировать решения к изменяющемуся составу входящего сырья без необходимости корректировки базовой технологической схемы.

Комиссия отмечает, что программный комплекс стабильно функционировал в условиях опытно-промышленной эксплуатации, корректно обрабатывал входные данные и формировал технологически обоснованные рекомендации по утилизации некондиционной молочной продукции.

По результатам промышленной апробации рекомендуется использование цифрового стандарта организации СТО 0023498–022–2025 «Технологическая схема утилизации варьируемой по составу молочной продукции с предельным сроком годности» и соответствующего программного комплекса в практике управления потоками некондиционной молочной продукции на предприятиях молочной промышленности.



Старший технолог _____ Рыбакова Алёна Сергеевна

Старший научный сотрудник
ФГАНУ «ВНИМИ»,
доктор технических наук _____ Семипятный В.К.

Аспирант ФГАНУ «ВНИМИ» _____ Рыскин Д.С.



Россия, 394016, г. Воронеж, ул. 45-ой Стрелковой Дивизии, 259
(473) 242-53-39 – приемная, (473) 242-53-82 - факс/автомат,
(473) 206-68-00(доб.3418) – отдел региональных продаж (473) 206-68-00(доб.1204) – отдел
розничных продаж

ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО МОЛОЧНЫЙ КОМБИНАТ «ВОРОНЕЖСКИЙ»

АКТ промышленной верификации результатов исследования на исторических производственных данных

Настоящим актом подтверждается проведение промышленной верификации результатов научного исследования и цифрового стандарта организации СТО 0023498–022–2025 «Технологическая схема утилизации варьируемой по составу молочной продукции с предельным сроком годности» на основе анализа исторических данных действующего предприятия молочной промышленности.

Верификация проводилась в период с 12 мая по 23 мая 2025 г. на базе Молочного Комбината Воронежский (наименование организации) с использованием архивных данных предприятия за период с **2010 по 2023** гг., характеризующих образование, состав и фактические направления утилизации некондиционной молочной продукции.

В рамках верификации был применен программный комплекс контроля и маршрутизации потоков некондиционной молочной продукции, реализующий положения цифрового СТО 0023498–022–2025. В программный комплекс были загружены обезличенные исторические данные о партиях молочной продукции, не подлежащих реализации, включая сведения о категории продукции, объемах, условиях хранения, показателях качества и фактически реализованных на предприятии способах утилизации.

Для каждой партии программным комплексом в ретроспективном режиме был определен рациональный маршрут утилизации в соответствии с иерархической технологической схемой, заложенной в цифровом СТО. Полученные рекомендованные маршруты были сопоставлены с фактически применявшимися на предприятии решениями.

По результатам промышленной верификации установлено, что:

- для значительной части архивных партий некондиционной молочной продукции программный комплекс рекомендовал более технологически и экономически обоснованные маршруты утилизации по сравнению с фактически реализованными;
- в ряде случаев была выявлена преждевременная ориентация на энергетическую утилизацию или списание продукции при наличии технологической возможности ее вторичной переработки;
- использование цифрового СТО позволило ретроспективно идентифицировать недоиспользованный ресурсный потенциал молочной продукции, связанный с извлечением жировой фазы и биоконверсии.

Ретроспективные расчеты, выполненные на основе архивных данных предприятия, показали, что при использовании рекомендованных маршрутов утилизации дополнительный средний выход извлекаемой жировой фазы составил 9–13 % за счет перераспределения потоков обезжиренных и высокожировых продуктов, а удельные потери от утилизации некондиционной продукции снижались в среднем на 11–17 % в расчете на 1 т входящего потока.

Суммарный потенциальный экономический эффект при масштабировании решений цифрового СТО на годовой объем некондиционной молочной продукции предприятия оценен в диапазоне 653 тыс. руб./год, что соответствует относительному улучшению экономических показателей при утилизации на 12–18 % по сравнению с фактически достигнутым уровнем в анализируемый период.

Комиссия отмечает, что промышленная верификация на исторических данных подтверждает воспроизводимость и устойчивость цифровой модели принятия решений, а также ее применимость для экономически обоснованного управления потоками некондиционной молочной продукции в условиях реального производства.

Главный технолог, Д.Т.Н., Профессор



Е.И. Мельникова