

На правах рукописи



ГОЛОВАЧЕВА ЯНА СЕРГЕЕВНА

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОЙ
ЭКСТРАКЦИИ В СИСТЕМЕ «ТВЕРДОЕ ТЕЛО – ЖИДКОСТЬ»
В ТЕХНОЛОГИИ ВЫДЕРЖКИ ВИСКОВЫХ ДИСТИЛЛЯТОВ**

Специальность – 4.3.3 Пищевые системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово – 2026

Работа выполнена на кафедре «Инженерный дизайн» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кемеровский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бородулин Дмитрий Михайлович

Официальные оппоненты: **Казарцев Дмитрий Александрович**
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)», заведующий кафедрой технологии виноделия, бродильных производств и химии им. Г.Г. Агабальянца

Медриш Марина Эдуардовна
кандидат технических наук, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии - филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи», заведующая испытательной лабораторией технохимического контроля и арбитражных методов анализа

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

Защита состоится «26» июня 2026 г. в 9:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.315.05 при ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» по адресу 650056, г. Кемерово, б-р Строителей, 47, 2 лекц. ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» (<https://kemsu.ru/science/dissertation-councils/diss-24-2-315-05/protects/133242/>), на официальном сайте ВАК Минобрнауки РФ (<https://vak.gisnauka.ru>).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, отправлять по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Красная, 6, Диссертационный совет 24.2.315.05, e-mail: ds24.2.315.05@mail.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Милентьева Ирина Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В течение последнего десятилетия наблюдается насыщение мирового рынка алкогольной продукции многообразием видов дистиллятов, изготовленных из зернового сырья, таких как водка, виски, джин. Наибольшую долю потребительского предпочтения среди крепких алкогольных напитков данной категории занимает виски. При этом традиционно выбор покупателя склоняется в сторону зарубежной продукции, отличающейся устоявшейся технологической культурой производства. Однако, в современных условиях, доступ к ассортименту виски зарубежных производителей становится всё более ограниченным, на фоне изменяющейся внешнеполитической обстановки. Помимо возникновения дефицита импортной алкогольной продукции в розничной торговле, перед отечественной пищевой промышленностью возникают проблемы, связанные с прекращением поставок импортного сырья, а также с ограничением возможности использования зарубежных технологий и оборудования для производства алкогольной продукции.

В этих условиях особую значимость приобретает задача импортозамещения в производстве алкогольных напитков, что предполагает разработку новых технологических решений и модернизацию производственных процессов. Ключевым направлением подобного развития является совершенствование процесса экстракции, исходя из того, что именно на стадии выдержки висковых дистиллятов происходит формирование комплекса соединений, определяющих органолептические свойства напитка. Интенсификация экстракционных процессов влияет на цвет, аромат и вкус виски, в том числе на его соответствие стандарту качества. В связи с этим предприятия, специализирующиеся на выпуске крепких алкогольных напитков, всё чаще проходят комплексное переоснащение как в технологическом, так и в техническом аспектах.

Таким образом, актуальность исследования определяется необходимостью научного обоснования и оптимизации процессов экстракции на стадии выдержки висковых дистиллятов, при производстве виски с высокими показателями качества, повышая конкурентоспособность отечественной алкогольной продукции.

Степень разработанности темы исследования. Область изучения технологии производства крепких алкогольных напитков (коньяк, виски и др.), процессов созревания и получения различных дистиллятов представлена в работах И.М. Абрамовой, А.В. Коростелева, Л.А. Оганесянца, Д.А. Казарцева, Х.Р. Сиюхова, А.Н. Острикова, Н.В. Шелеховой, И.В. Оселедцевой, С.В. Шахова, М.Э. Медриш, С.С. Морозовой, D. Pradal, K.C.A. Rezende, L. Albanese, M.H. Carlsen, T.S. Collins.

Цель работы. Разработка новых технико-технологических решений, способствующих интенсификации процесса экстракции целевых компонентов из дубовой клепки в технологии выдержки висковых дистиллятов.

Задачи исследований:

1. Провести литературно-патентный поиск существующих экстракционных аппаратов и способов повышения интенсивности процесса созревания молодых дистиллятов при экстрагировании целевых компонентов из дубовой древесины для определения направления потенциальных исследований.

2. Разработать лабораторно-экспериментальный стенд, включающий устройство для проведения исследований процесса экстракции целевых компонентов из дубовой клепки.

3. Получить выдержанный висковый дистиллят с использованием дубовой клепки по классической технологии и исследовать его физико-химические свойства согласно ГОСТ Р 70225-2023.

4. Определить рациональные технологические параметры сверхвысокочастотного излучения по предлагаемой технологии для получения выдержанных висковых дистиллятов, соответствующих показателям качества и органолептическим характеристикам согласно ГОСТ Р 70225-2023, критериям безопасности согласно ТР ТС 021/2011.

5. Исследовать кинетические закономерности обогащения молодых висковых дистиллятов экстрактивными веществами с учетом классической технологии и с применением сверхвысокочастотного воздействия на объект обогащения.

6. Провести сравнительный анализ физико-химических и органолептических характеристик выдержанных висковых дистиллятов, полученных по классической технологии и с применением сверхвысокочастотного излучения.

7. Провести промышленные испытания с экономической оценкой разработанной технологии получения выдержанных висковых дистиллятов с применением сверхвысокочастотного излучения на этапе их созревания.

Научная новизна. Выявлен положительный эффект воздействия механического перемешивания и сверхвысокочастотного излучения в процессе выдержки вискового дистиллята на основные показатели его качества.

Установлены рациональные производственные условия для процесса экстракции целевых компонентов на стадии выдержки висковых дистиллятов (далее ВД) со следующими технологическими параметрами: концентрация спирта в дистилляте 60 % об., временем воздействия механического перемешивания 1 раз в 2 дня в течение 7 мин, частотой вращения мешалки 1500 мин⁻¹; воздействием сверхвысокочастотного (далее СВЧ) излучения микроволновой печи – периодичностью 1 раз в 2 дня на протяжении 1 мин при мощности 750 Вт.

Полученные значения количества экстрагируемых компонентов в выдержанных висковых дистиллятах (далее ВВД), подвергшихся воздействию механического перемешивания и СВЧ-излучению в среднем в два раза превышают аналогичные показатели контрольного образца, выдержанного по классической технологии. Показатели для образца ВД, подвергнутому механическому перемешиванию и СВЧ-излучению с концентрацией спирта в

дистилляте 60 % об., равны: содержание сухих веществ $C_v = 0,203$ г, содержание полифенолов $Пф = 1843,3$ мг/дм³. Для контрольного образца с концентрацией спирта в дистилляте 60 % об., $C_v = 0,121$ г, $Пф = 748$ мг/дм³.

Исследована кинетика процесса экстракции целевых компонентов из дубовой клепки в зависимости от времени созревания и количества экстрагируемых веществ (сухие вещества, полифенолы) в ВД, позволяющая при помощи математического моделирования рассчитать скорость экстракции.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в обосновании кинетических закономерностей спиртовой экстракции целевых компонентов из дубовой клепки на стадии выдержки ВД. Практическая значимость – разработка экстракционного аппарата и способа интенсификации процесса экстракции целевых компонентов на стадии выдержки ВД, который может применяться отечественными производителями для получения качественных висковых дистиллятов. Практическая часть работы состоит в определении рациональных параметров работы устройства для осуществления способа интенсификации процесса экстракции на стадии выдержки ВД, а также комплекса исследований, направленных на определение физико-химических и органолептических показателей качества висковых дистиллятов и их соответствие ГОСТ Р 70225-2023 и ТР ТС 021/2011. Проведены опытно-промышленные испытания способа производства виски с усовершенствованной стадией выдержки висковых дистиллятов в количестве 100 литров на ООО «Бирлайн» (акт промышленных испытаний № 1 от 23.11.2023). Прогнозируемый экономический эффект от производства выдержанных висковых дистиллятов в объеме 600 литров в год составил 1 129 240 руб.

Методология и методы исследования. Методологическая концепция исследований включает формулирование исходной проблематики, системный анализ научно-технических источников и реализацию экспериментального подхода. Используемые методы ориентированы на определение рациональных технологических параметров экстракционного оборудования и разработку инновационных способов интенсификации стадии выдержки висковых дистиллятов путём воздействия на них механического перемешивания и СВЧ-излучения; построение и анализ кинетических кривых для определения скорости массопереноса в процессе экстрагирования, на основе применения регрессионного анализа. Показатели качества ВВД определяли согласно ГОСТ Р 70225-2023, соответствие критериям безопасности согласно ТР ТС 021/2011.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты комплексных исследований процесса экстракции на стадии выдержки висковых дистиллятов по физико-химическим и органолептическим показателям висковых дистиллятов.
2. Промышленная апробация результатов исследования опытной партии выдержанных висковых дистиллятов.
3. Экстракционный аппарат и способ интенсификации процесса экстракции целевых компонентов из дубовой клепки на стадии выдержки висковых дистиллятов, подвергшихся сверхвысокочастотному излучению.

Соответствие темы диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа соответствует п. п. 15, 19, 20, 21 и 23 паспорта специальности 4.3.3 Пищевые системы.

Степень достоверности и апробация результатов.

Степень достоверности результатов данной работы подтверждается неоднократной повторностью измерений при выполнении экспериментальных исследований с применением лабораторного и опытно-промышленного оборудования.

По основным материалам исследований опубликовано 16 работ, в том числе 4 публикации в центральных изданиях, рекомендованных ВАК РФ (K1 и K2), 2 публикации в WoS/Scopus, 1 патент РФ, 1 раздел коллективной монографии. Материалы диссертации обсуждены на Всероссийских студенческих научно-технических конференциях: «Пищевые инновации и биотехнологии» (Кемерово, 2024), «Пищевая технология и биотехнология» (Казань, 2021), «Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продовольствия – 2025» (Москва, 2025); на Международных студенческих научно-технических конференциях: «Пищевая индустрия: инновационные процессы, продукты и технологии» (Москва, 2025), «Пищевая технология и биотехнология» (Кемерово, 2022); «Современный процесс в пищевом производстве и инновационная технология в обеспечении качественных показателей пищевой продукции» (Керчь, 2021); «Пищевая инновация и биотехнология» (Кемерово, 2021).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, литературно-патентного обзора, глав с аппаратурным обеспечением, исследовательской частью и промышленной реализацией. Также в работе представлены заключение и основные выводы. Диссертация состоит из 169 страниц, содержит 14 таблиц, 51 рисунок и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена характеристика современного состояния отрасли по производству крепких алкогольных напитков, обоснована актуальность темы, а также ключевые проблемы, с которыми сталкивается данная отрасль промышленности. Соответственно предложены конкретные решения, изложенные в виде задач, которые поставлены в рамках данного исследования. Теоретические и экспериментальные исследования выполнены в научно-исследовательских лабораториях ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», и они полностью соответствуют поставленным задачам.

Общая схема проведения исследований в данной работе представлена на Рисунке 1.

В Главе 1 «Литературно-патентный обзор» рассмотрены теоретические аспекты процесса экстрагирования, проанализированы современные методы, позволяющие интенсифицировать данный процесс, а также проведен патентный обзор на технологическое оборудование, осуществляющее процесс экстракции с их преимуществами и недостатками.

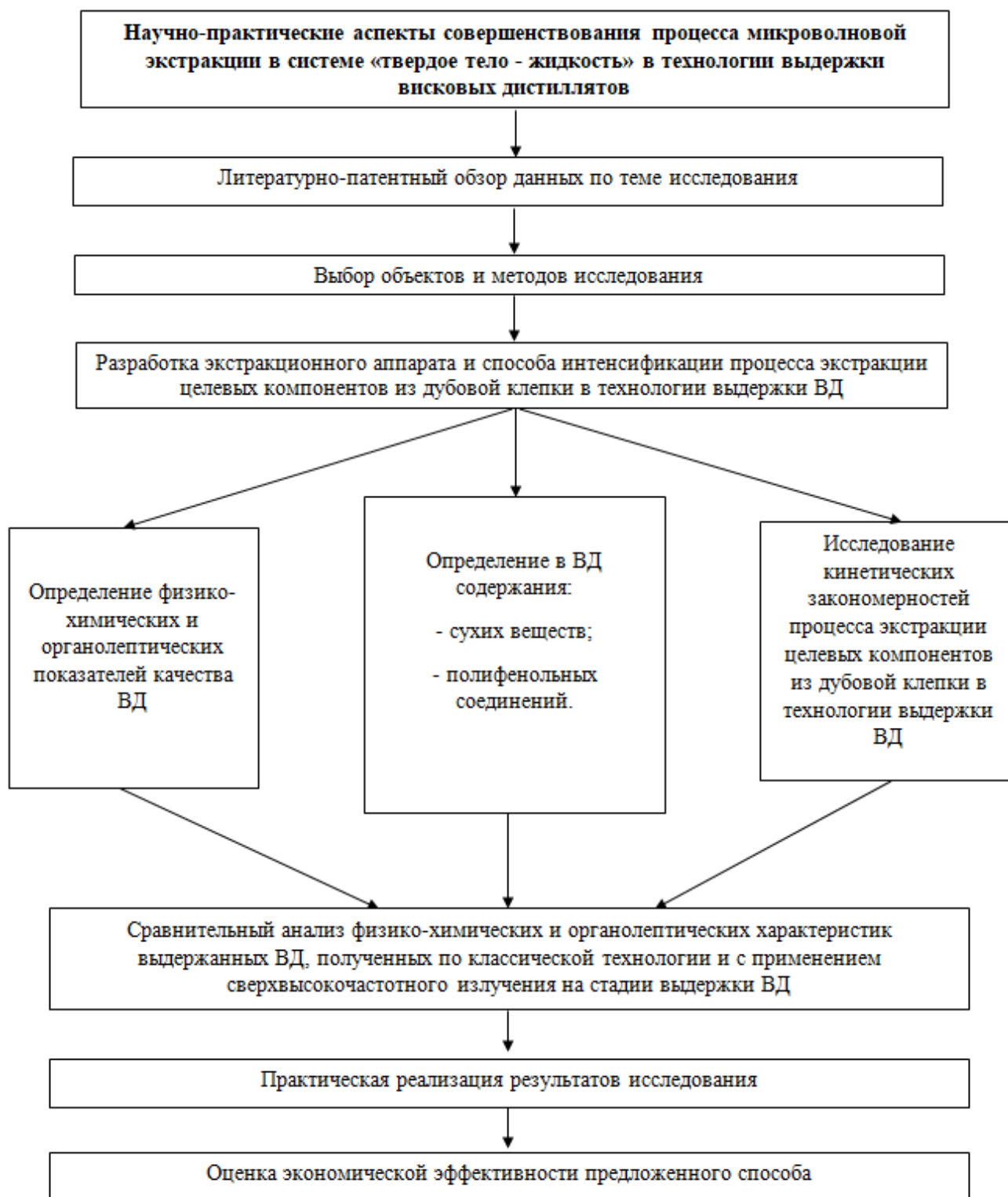


Рисунок 1 – Общая схема проведения исследований

В Главе 2 «Методика исследований» представлен лабораторно-экспериментальный стенд, описаны экстракционный аппарат и способ, совершенствующий процесс экстракции целевых компонентов из дубовой клепки на стадии выдержки ВД при воздействии на них СВЧ-излучением.

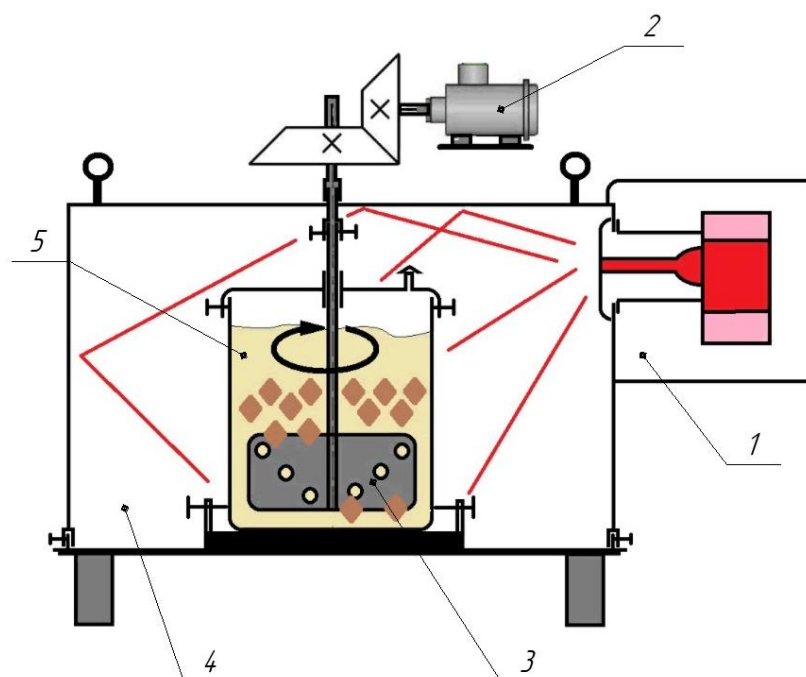


Рисунок 2 – Устройство для интенсификации процесса экстракции целевых компонентов из дубовой клепки на стадии выдержки ВД:

1 – микроволновая печь; 2 – электрический привод; 3 – механическая мешалка;
4 – рабочая камера; 5 – емкость для ВД

Предлагаемый способ предусматривает приготовление вискового молодого дистиллята, полученного по классической технологии, который разбавляют дистиллированной водой и помещают в емкость для висковых дистиллятов 5 вместе с дубовой клепкой. Затем в два этапа осуществляется их выдержка внутри рабочей камеры 4 микроволновой печи 1. На первом этапе до воздействия СВЧ-излучения осуществляется предварительное перемешивание ВД с клепкой механической мешалкой 3. Движение которой происходит от электрического привода 2. На втором этапе продолжается процесс перемешивания ВД с клепкой с одновременным воздействием на них СВЧ-излучения. По завершении процесса созревания ВВД извлекают из рабочей камеры 4 микроволновой печи 1, затем отделяют его от дубовой клепки, подготавливают к фильтрации и дальнейшему розливу в потребительскую тару. В результате этого сокращается время выдержки ВД в три раза и ускоряется процесс извлечения целевых компонентов из дубовой клепки фактически в два раза по сравнению с классической технологией выдержки ВД.

В Главе 3 «Исследовательская часть» представлены исследования по определению рациональных технико-технологических решений процесса экстракции целевых компонентов из дубовой клепки на стадии выдержки ВД.

На первом этапе исследования получили молодые ВД с концентрацией спирта (C_c) в них равной $C_c = 40\%$ об., $C_c = 50\%$ об., $C_c = 60\%$ об. Затем литровые ёмкости заполнили данными дистиллятами и добавили в них дубовую клепку сильного обжига (10 г клепки на 1 дм³ раствора) с размером 10×10×10 мм, для осуществления процесса экстракции на стадии выдержки дистиллятов.

Молодые ВД с дубовой клепкой были разделены на 4 группы. Три группы образцов молодых ВД были подвержены воздействию механического перемешивания 1 раз в 2 дня в течение 3 мин, с частотой вращения мешалки 1500 мин^{-1} . Затем они подвергались воздействию СВЧ-излучения в течение 1 раза в 2 дня по 1, 2, 3 мин соответственно при мощности микроволновой печи 750 Вт. Четвертая группа не подвергалась воздействию механического перемешивания и микроволн, выдерживалась по классической технологии и служила контрольным образцом. Продолжительность исследований составила 365 дней.

Распределение образцов в зависимости от концентрации спирта в них и времени воздействия микроволн представлено в Таблице 1.

Таблица 1 – Распределение образцов в ходе экспериментального исследования

Группа	Концентрация спирта в ВД (Сс), % об	Время воздействия СВЧ-излучения на ВД, мин	Наименование образца
Первая группа	40	1	Образец 1-1
		2	Образец 1-2
		3	Образец 1-3
Вторая группа	50	1	Образец 2-1
		2	Образец 2-2
		3	Образец 2-3
Третья группа	60	1	Образец 3-1
		2	Образец 3-2
		3	Образец 3-3
Четвертая группа	40	Без воздействия	Образец 4-1
	50		Образец 4-2
	60		Образец 4-3

Для оценки качественных показателей ВВД применяли известные методы. Содержание сухих веществ относительно продолжительности выдержки висковых дистиллятов в исследуемых образцах, подвергавшихся воздействию механического перемешивания и СВЧ-излучения представлено на Рисунке 3.

Сравнив полученные результаты выхода сухих веществ в «Образцах 3-1 и 4-3» (Рисунок 3-г) видно, что их максимальное содержание наблюдается в «Образце 3-1» и составляет 0,203 г, что в 1,7 раз превышает их в контрольном «Образце 4-3» ВД (0,121 г), это свидетельствует о положительном воздействии СВЧ-обработки на процесс экстракции целевых компонентов из дубовой клепки в висковый дистиллят на стадии его выдержки.

При сравнении количественного содержания сухих веществ, во всех выдержанных образцах ВД, с крепостью дистиллята 40, 50 и 60 % об., можно отметить, что их максимальные значения наблюдались в «Образцах 1-1 = 0,201 г;

2-1 = 0,171 г; 3-1 = 0,203 г», подвергавшихся СВЧ-излучению в течение 1-й минуты.

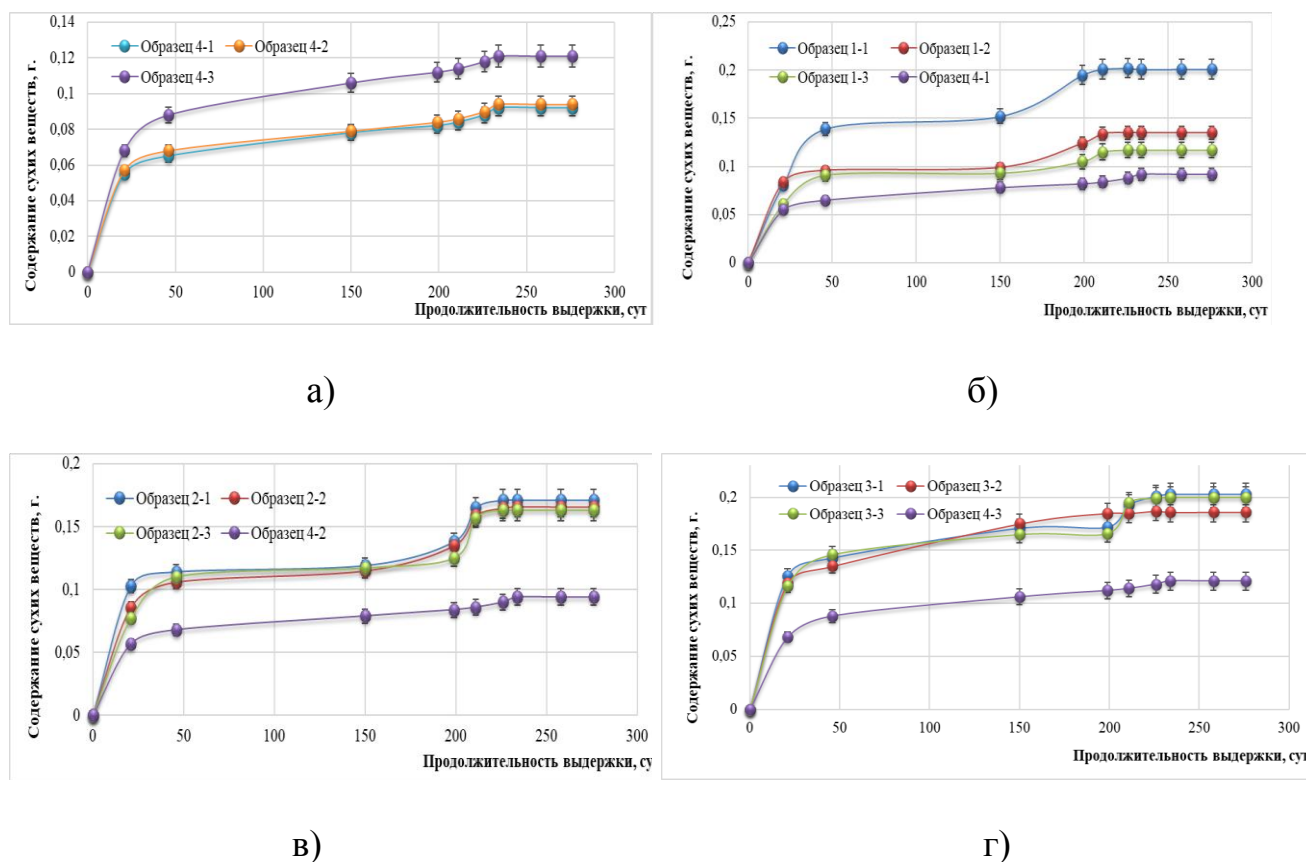


Рисунок 3 – Содержание сухих веществ в образцах:

а – контрольные образцы без воздействия СВЧИ 4-1, 4-2, 4-3; б – образцы 1-1, 1-2, 1-3;
в – образцы 2-1, 2-2, 2-3; г – образцы 3-1, 3-2, 3-3

На следующем этапе рассмотрели зависимость скорости протекания процесса выдержки ВД от концентрации в них сухих веществ. Для математического описания процесса скорости экстракции получены зависимости содержания сухих веществ в спиртовом экстракте $C_{с.в.}(г)$ и продолжительность процесса (Рисунки 4 и 5).

Результаты исследования представлены в виде кривых экстракции, аппроксимированные полиномом 4-й степени:

дистиллят крепостью 40 % об., излучение 1 мин/2 сут.

$$C_{с.в.} = -7,263 \cdot 10^{-10}T^4 + 4,005 \cdot 10^{-7}T^3 - 7,422 \cdot 10^{-5}T^2 + 0,0056T + 0,00212; \quad (1)$$

дистиллят крепостью 60 % об., излучение 1 мин/2 сут.

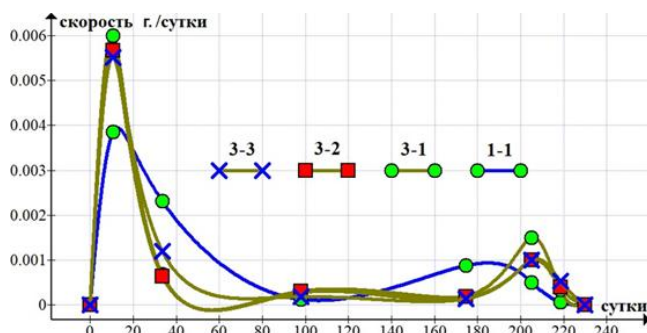
$$C_{с.в.} = -6,288 \cdot 10^{-10}T^4 + 3,720 \cdot 10^{-7}T^3 - 7,469 \cdot 10^{-5}T^2 + 0,0059T + 0,00818; \quad (2)$$

дистиллят крепостью 60 % об., излучение 2 мин/2 сут.

$$C_{с.в.} = -5,700 \cdot 10^{-10}T^4 + 3,375 \cdot 10^{-7}T^3 - 6,823 \cdot 10^{-5}T^2 + 0,0056T + 0,00795; \quad (3)$$

дистиллят крепостью 60 % об., излучение 3 мин/2 сут.

$$C_{с.в.} = -5,443 \cdot 10^{-10}T^4 + 3,351 \cdot 10^{-7}T^3 - 7,032 \cdot 10^{-5}T^2 + 0,0059T + 0,00568. \quad (4)$$



Обозначения: 1-1 – воздействие СВЧ 1 мин/2 дня; 3-1 – воздействие СВЧ 1 мин/2 дня; 3-2 – воздействие СВЧ 2 мин/2 дня; 3-3 – воздействие СВЧ 3 мин/2 дня

Рисунок 4 – Кривые скорости экстракции в зависимости от продолжительности процесса выдержки

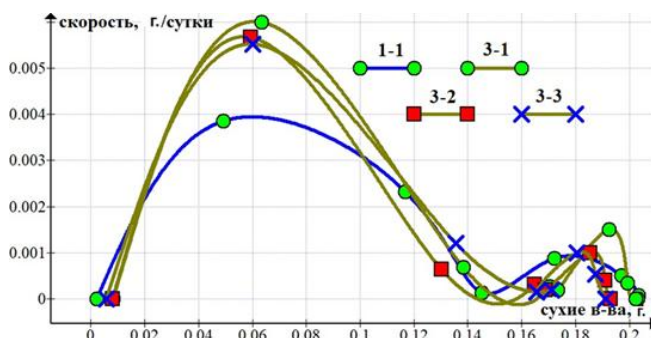


Рисунок 5 – Кривые скорости экстракции в зависимости от концентрации сухих веществ

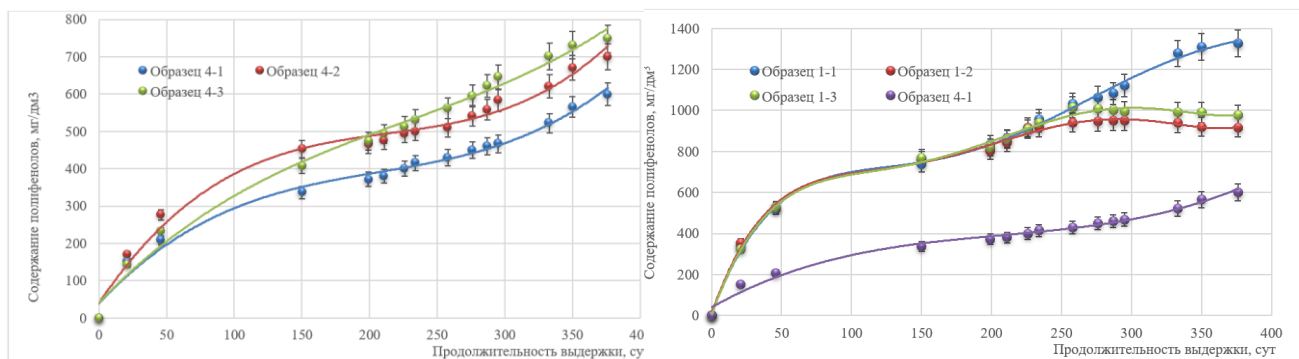
Анализ результатов показывает, что воздействие механического перемешивания и СВЧ-излучения позволяет в ускоренном режиме извлечь целевые компоненты из дубовой клепки, тем самым достичь максимальной концентрации сухих веществ в дистилляте за 234 дня (Рисунок 4), так как по истечении этой длительности выдержки количественное содержание сухих веществ не изменяется.

Далее определили содержание полифенольных соединений в образцах ВД крепостью 40, 50 и 60 % об., с временем воздействия СВЧ-излучения соответственно в течение 1, 2 и 3 мин, а также в контрольных образцах, не подвергавшихся периодическому воздействию на них СВЧ-излучения. Графически результаты приведены на Рисунке 6.

При сравнении значений выхода полифенольных соединений, определенных в течение года, во всех выдержанных образцах ВД, можно отметить, что их максимальные показатели наблюдались в «Образцах 1-1, 2-1 и 3-1» (1326,7 мг/дм³, 1679,7 мг/дм³ и 1843,3 мг/дм³), подвергавшихся сверхвысокочастотному излучению в течение 1 мин.

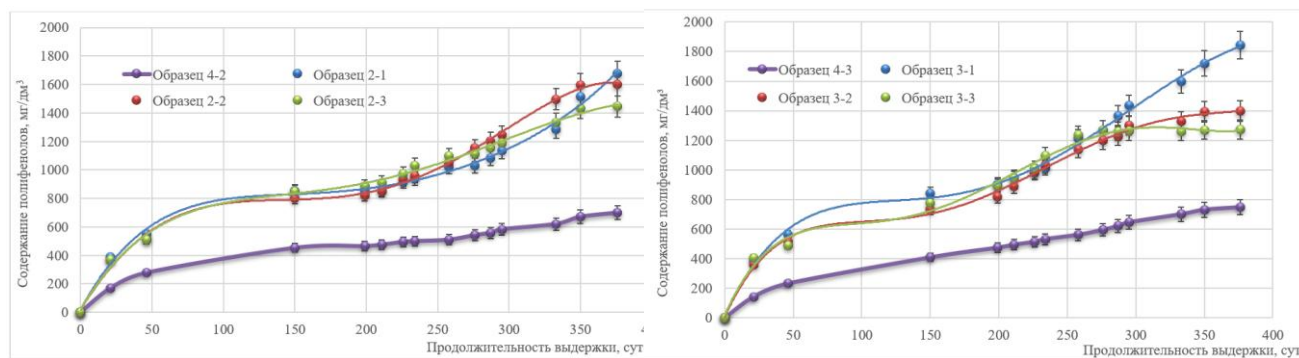
Из полученных данных (Рисунок 6) видно, что кратковременное воздействие СВЧ-излучения оказывает благоприятные условия для извлечения целевых компонентов из дубовой клепки, на стадии выдержки ВД. Дальнейшее увеличение времени воздействия СВЧ-излучения на ВД приводит к значительному уменьшению количества полифенольных соединений в исследуемых дистиллятах в зависимости от крепости ВД. При кратковременном воздействии СВЧ-излучения в течение 1 мин раз в два дня

продолжительностью 365 дней содержание полифенольных соединений достигло своего максимального значения в ВД крепостью 60 % об.



а)

б)



в)

г)

Рисунок 6 – Содержание полифенолов в образцах:

а – контрольные образцы без воздействия СВЧИ 4-1, 4-2, 4-3; б – образцы 1-1, 1-2, 1-3; в – образцы 2-1, 2-2, 2-3; г – образцы 3-1, 3-2, 3-3

Далее проведены исследования кинетики экстрагирования целевых компонентов из дубовой клепки. Для этого рассмотрели зависимость скорости протекания процесса выдержки ВД от концентрации в них полифенольных соединений. Для математического описания процесса скорости экстракции получены зависимости степени насыщения ВД полифенолами C_x по истечении одного года, их аппроксимация представлена на Рисунке 7:

$$C_x = -5,122T^4 \cdot 10^{-7} + 0,00044T^3 - 0,125T^2 + 15,582T; \quad (5)$$

$$C_x = -3,093T^4 \cdot 10^{-7} + 0,000344T^3 - 0,118T^2 + 16,492T; \quad (6)$$

$$C_x = -6,626T^4 \cdot 10^{-7} + 0,000572T^3 - 0,1578T^2 + 18,442T. \quad (7)$$

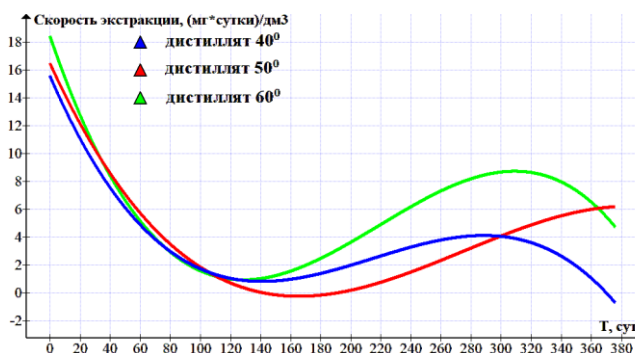


Рисунок 7 – Аппроксимированные кинетические зависимости степени насыщения ВД полифенолами по истечении одного года при воздействии на них СВЧ-излучением в течение 1 минуты раз в два дня



Рисунок 8 – Расчетная и аппроксимированная зависимости $\frac{dC_x}{dT} = f(n)$ для ВД крепостью 60 % об.

Из полученных кривых скорости экстракции (Рисунок 7) можно проследить наличие трех характерных участков проведения массообменного процесса, которые для лучшей наглядности и корректного анализа лучше всего представить в координатах $\frac{dC_x}{dT} \sim n$. Данную графическую конфигурацию можно получить, используя зависимости 1, 2, 3, так как все они в качестве аргумента имеют одну и ту же величину – продолжительность процесса T . Взяв производную $\frac{dC_x}{dT} = f(T)$ для первых трех уравнений, можно получить зависимость скорости экстракции от продолжительности массообменного процесса. Зависимости $\frac{dC_x}{dT} = f(T)$ для дистиллятов крепостью 40, 50 и 60 % об., соответственно:

$$\frac{dC_x}{dT} = -20,488T^3 \cdot 10^{-7} + 0,00132T^2 - 0,25T + 15,582; \quad (8)$$

$$\frac{dC_x}{dT} = -12,372T^3 \cdot 10^{-7} + 0,00102T^2 - 0,236T + 16,492; \quad (9)$$

$$\frac{dC_x}{dT} = -26,504T^3 \cdot 10^{-7} + 0,00174T^2 - 0,316T + 18,442. \quad (10)$$

На Рисунке 8 представлена графическая зависимость $\frac{dC_x}{dT} \sim n$ для ВД с максимальным выходом полифенольных веществ с Сс 60 % об., которую аппроксимировали полиномом 6 степени.

Выбрав аргумент в виде конкретной величины для него, можно рассчитать значения как $\frac{dC_x}{dT}$, так и для n и, далее построить искомую зависимость $\frac{dC_x}{dT} = f(n)$ для образца ВД с максимальным выходом полифенольных веществ с Сс в дистилляте 60 % об.:

$$\frac{dC_x}{dT} = 8,7921n^6 \cdot 10^{-10} - 1,9792n^5 \cdot 10^{-7} + 1,0439n^4 \cdot 10^{-5} + 0,00038n^3 - 0,03554n^2 + 0,1771n + 18,3682. \quad (11)$$

Кинетические исследования процесса экстракции целевых компонентов из дубовой клепки на стадии выдержки ВД показали наличие трех характерных периодов проведения процесса:

первый участок на кривой в диапазоне $0 \% < n < 45 \%$, показывает снижение скорости процесса экстракции, что вызвано уменьшением количества экстрагируемых веществ на поверхности дубовой клепки;

второй участок на кривой в диапазоне $45 \% < n < 75 \%$, показывает возобновление роста скорости экстракции, что связано со снижением сопротивления переносу экстрагируемых веществ, ввиду полного смачивания дубовой клепки и соответственно смены в капиллярных объемах насыщенного раствора на обедненный раствор;

третий участок на кривой в диапазоне $75 \% < n < 100 \%$, указывающий на снижение скорости экстракции, что связано с прекращением выхода экстрагируемых веществ, наличие которых было изначально ограничено химическим составом используемой дубовой клепки.

Таким образом, полученные данные количественного содержания сухих веществ и полифенолов в образцах ВД, выдержанных по предлагаемой технологии, в среднем в два раза превышают показатели контрольного образца. Данный вывод подтверждает интенсификацию процесса экстракции целевых компонентов из дубовой клепки в ВД с использованием механического перемешивания и СВЧ-излучения.

Исследования показали, что максимальное содержание экстрагируемых веществ в выдержанных висковых дистиллятах с концентрацией спирта 60 % об. (образец 3-1) достигается при предварительном механическом перемешивании 1 раз в 2 дня в течение 3 мин с последующим перемешиванием и воздействием на ВД сверхвысокочастотным излучением в течение 1 мин 1 раз в 2 дня продолжительностью до 365 дней.

На состав и концентрацию отдельных групп примесей в выдержанных висковых дистиллятах оказывает влияние сырье, вид дрожжей, температура брожения и технология приготовления суслу и дистиллята. Дополнительное воздействие на стадии выдержки висковых дистиллятов СВЧ-излучения также оказывает влияние на количественное содержание примесей в исследуемых образцах.

Количественное содержание отдельных групп примесей для образца 3-1 и нормы ГОСТ Р 70225-2023 представлены в Таблице 2.

Фактические концентрации групп примесей после обработки висковых дистиллятов СВЧ-излучением находятся в допустимых пределах требований ГОСТ Р 70225-2023. По содержанию метанола в ВВД образец соответствует требованиям ТР ТС 021/2011.

Таблица 2 – Количественное содержание отдельных групп примесей в исследуемых образцах

Наименование показателя	Норма (ГОСТ Р 70225-2023)	Результаты
		Образец 3-1
Крепость, %, об.	не <40,0	52,0±0,1
Массовая концентрация фурфурола в 1 дм ³ безводного спирта, мг	-	-
Массовая концентрация альдегидов в 1 дм ³ безводного спирта, мг	10-350	47,99±7,20
Массовая концентрация сивушного масла в 1 дм ³ безводного спирта, мг	500–6000	3859,41±578,91
Массовая концентрация сложных эфиров в 1 дм ³ безводного спирта, мг	50–1500	105,40±15,81
Массовая концентрация железа в 1 дм ³ безводного спирта, мг	не >1,0	0,78
Объемная доля метилового спирта в пересчете на безводный спирт, %	не >0,05	0,0089±0,0013

В Главе 4 «Промышленная реализация» представлены результаты промышленных испытаний, для проведения которых разработана технологическая линия (Рисунок 9), на которой получены ВВД. Физико-химические показатели дистиллятов определяли при помощи метода газовой хроматографии.



Рисунок 9 – Технологическая линия производства выдержанных висковых дистиллятов

Также в главе приведен прогноз экономической эффективности на предприятии ООО «Бирлайн» при реализации предложенного способа

интенсификации процесса экстракции целевых компонентов из дубовой клепки на стадии выдержки ВД.

Промышленная линия состоит из котла для приготовления сусла, ректификационного аппарата, промышленного миксера и промышленной микроволновой печи. В промышленных условиях на данной линии провели процесс экстракции целевых компонентов из дубовой клепки на стадии выдержки ВД, крепостью не менее 60 % об., при воздействии на него механического перемешивания, а именно в течение 7 мин с частотой вращения промышленного миксера 1500 мин^{-1} , и кратковременного воздействия СВЧ-излучения – в течение 1 мин при мощности промышленной микроволновой печи 750 Вт, в течение трех месяцев.

Хроматограммы молодого и выдержанного ВД, полученные на ООО «Бирлайн» представлены на Рисунке 10.

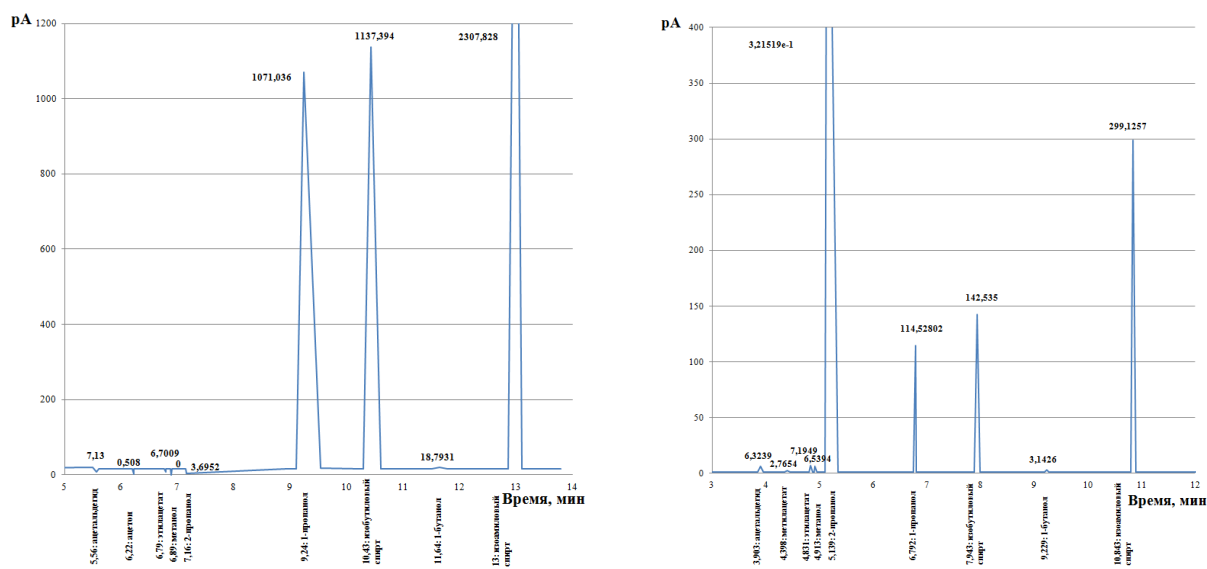


Рисунок 10 – Хроматограммы молодого и выдержанного ВД

На Рисунке 11 представлены физико-химические показатели качества молодого и выдержанного ВД в количественном соотношении друг к другу.

Анализ физико-химических показателей (Рисунок 11) молодого и выдержанного дистиллятов позволяет утверждать, что полученные ВД полностью соответствуют требованиям стандарта ГОСТ Р 70225-2023 и ТР ТС 021/2011.

Таким образом, соответствие показателям качества и безопасности ВВД по отношению к нормативной документации достигается при следующих рациональных технологических параметрах: периодичность – 1 раз в день механическое перемешивание дистиллята с дубовой клепкой в течение 7 мин, частота вращения мешалки 1500 мин^{-1} ; СВЧ-излучение – в течение 1 мин, при мощности микроволновой печи 750 Вт.

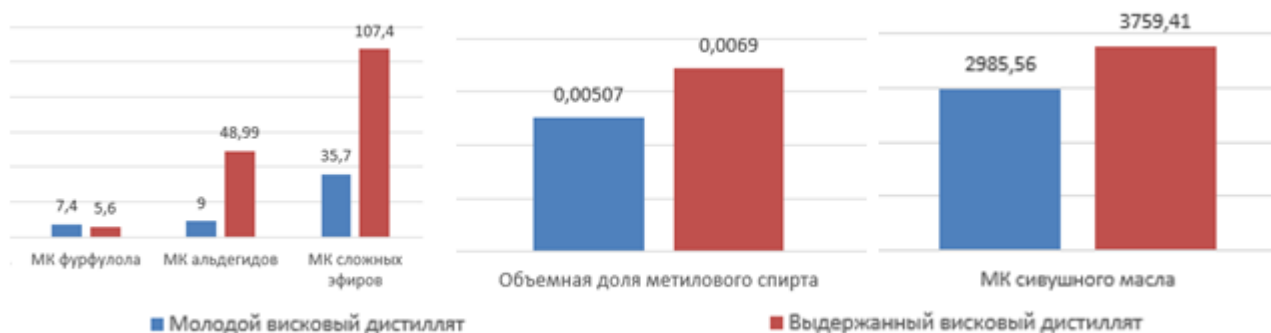


Рисунок 11 – Содержание отдельных групп примесей (мг/дм³ б.с.) в молодом и выдержанном ВД:

МК – массовая концентрация, б.с. – безводный спирт

Апробация по получению ВВД на ООО «Бирлайн» с предложенным способом интенсификации процесса экстракции целевых компонентов из дубовой клепки является экономически эффективной, поскольку расчетная прибыль составила 1 129 240 рублей при производстве 600 литров в год.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Литературно-патентный обзор существующего оборудования (экстракторов системы «твердое тело – жидкость») и способов процесса экстрагирования позволил сформулировать цель и задачи исследований, решение которых позволит сократить время процесса экстракции целевых компонентов из дубовой клепки при выдержке висковых дистиллятов.

2. Разработан экстракционный аппарат и способ интенсификации процесса экстракции целевых компонентов из дубовой клепки, совершенствующий стадию выдержки висковых дистиллятов с помощью совместного воздействия на них механического перемешивания и сверхвысокочастотного излучения (подана заявка на патент РФ), позволяющий сократить время созревания напитка в 3 раза.

3. Определены рациональные технологические параметры для проведения процесса экстракции целевых компонентов из дубовой клепки на стадии выдержки по усовершенствованной технологии: мощность микроволновой печи – 750 Вт; частота вращения механической мешалки – 1500 мин⁻¹; время механического перемешивания на первом (предварительном) этапе – 3 мин; совместное воздействие механического перемешивания и сверхвысокочастотного излучения – 1 мин с периодичностью 1 раз в 2 дня; концентрация спирта в молодом дистилляте на начальном этапе стадии выдержки – 60 % об.

4. Анализ кинетических зависимостей процесса экстракции на стадии выдержки висковых дистиллятов показал наличие трех периодов кривых скоростей во всех исследуемых образцах. В первом периоде скорость процесса экстракции уменьшается, что вызвано снижением количества экстрактивных веществ на поверхности дубовой клепки; во втором периоде за счёт активного

проникновения спиртов в твердую фазу скорость процесса выдержки ВД возрастает, а в третьем периоде снижается за счёт падения разности концентраций полифенолов и сухих веществ в дубовой клепке и дистилляте. Полученные, на основе уравнений регрессии, кинетические зависимости скорости процесса выдержки от его продолжительности, адекватно описывают процесс созревания висковых дистиллятов.

5. Анализ показателей качества выдержанных ВД с концентрацией спирта в них 60 % об. показал, что в контрольном образце содержание сухих веществ и полифенолов составило $S_v = 0,121$ г, $P_f = 748$ мг/дм³; а в образце ВД, подвергнутому сверхвысокочастотному излучению, эти же показатели равны $S_v = 0,203$ г, $P_f = 1843,3$ мг/дм³. Анализ полученных численных значений показателей подтвердил эффективность процесса экстракции целевых компонентов из дубовой клепки на стадии выдержки висковых дистиллятов с применением сверхвысокочастотного излучения. Полученный ВВД соответствует требованиям качества ГОСТ Р 70225-2023 и показателю безопасности согласно ТР ТС 021/2011.

6. Проведена промышленная апробация производства ВВД на ООО «Бирлайн» по предложенному способу, которая признана экономически эффективной. Расчетная прибыль при производстве 600 литров ВВД в год составила 1 129 240 рублей, что в 5 раз больше, чем при получении висковых дистиллятов, выдержанных по классической технологии.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

Статьи в изданиях, входящих в наукометрические базы Scopus

1. Borodulin, D. M. Influence of microwave radiation on whiskey distillate quality indicators / D. M. Borodulin, M. V. Prosin, A. V. Shalev, **Ya. S. Golovacheva** // Bioscience Biotechnology Research Communications. – 2021. – Vol. 14. – No 4. С. 1701–1713. – DOI: 10.21786/bbrc/14.4.48 – Q2.

2. Borodulin, D. M. Determination of the kinetic regularities of the process of extraction of soluble wood compounds with whiskey distillate during its maturation with artificial oxygen supply / D. M. Borodulin, I. Y. Aleksanyan, A. H. Nugmanov, M. V. Prosin, **Ya. S. Golovacheva** // International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES). – 2022. – Vol. 12. – No 4. – P. 409–420. – DOI: 10.31407/ijeess12.452 – Q4.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ

3. Бородулин, Д. М. Исследование совместного влияния сверхвысокочастотного излучения и кислорода на процесс экстрагирования в технологии получения спиртных напитков / Д. М. Бородулин, И. Ю. Резниченко, М. В. Просин, А. В. Шалев, М. Н. Потапова, **Я. С. Головачева** // Пиво и напитки – 2020. – № 2. – С. 15–19. – DOI: 10.24411/2072-9650-2020-10012 - K2.

4. Бородулин, Д. М. Исследование эффективности работы новой конструкции экстракционного аппарата в технологической линии по производству виски / Д. М. Бородулин, Е. А. Сафонова, М. В. Просин, **Я. С. Головачева** // XXI век: Итоги прошлого и проблемы настоящего плюс, 2022. – Т. 11. – № 3 (59). – С. 122–127. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0018 – К2.

5. Бородулин, Д. М. Исследование воздействия механоактивированной воды на состав молодых висковых дистиллятов / Д. М. Бородулин, И. Ю. Сергеева, Л. В. Пермякова, **Я. С. Головачева** // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2023. – № 4 (393). – С. 76–82. – DOI: 10.26297/0579-3009.2023.4.13 – К1.

6. Бородулин, Д. М. Определение содержания сухих веществ в висковых дистиллятах, подвергавшихся воздействию сверхвысокочастотного излучения / Д. М. Бородулин, М. В. Просин, **Я. С. Головачева** // Вестник КрасГАУ. – 2026. – № 2. – С. 215–225. – DOI: 10.36718/1819-4036-2026-2-215-225 – К1.

Патенты РФ

7. Патент РФ на изобретение RU 2783232 С12. Способ получения виски / Д. М. Бородулин, М. В. Просин, **Я. С. Головачева**, Е. А. Сафонова, А. В. Шалев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО КемГУ. – № 2021116763; заявл. 07.06.2021; опубл. 10.11.2022.

Раздел в коллективной монографии, изданной в ведущем российском научном издательстве

8. Бородулин, Д. М. Определение содержание полифенолов в выдержанных висковых дистиллятах с дубовыми кубиками, подвергавшихся воздействию сверхвысокочастотного излучения / Д. М. Бородулин, М. В. Просин, **Я. С. Головачева** // Пищевые системы: новые виды ресурсов, инновационные технологии хранения и переработки, управление качеством: монография. – Майкоп: Майкопский государственный технологический университет, 2023. – С. 119–130.

Материалы конференций, симпозиумов

9. Бородулин, Д. М. Способ приготовления виски с применением сверхвысокочастотного излучения / Д. М. Бородулин, Е. А. Сафонова, **Я. С. Головачева** // Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продовольствия: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. – 2020. – С. 740–742.

10. Просин, М. В. Влияние внутренней структуры растительного сырья на извлечение целевых компонентов экстракторами различных конструкций / М. В. Просин, Д. М. Бородулин, **Я. С. Головачева**, А. В. Шалев // XVII Всероссийская конференция молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием «Пищевые технологии и биотехнологии» (г. Казань, 20–23 апреля 2021 года). Технологическое оборудование, процессы и аппараты

пищевых производств / под ред. А. С. Сироткина; Минобрнауки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2021. – С. 73–84.

11. Бородулин, Д. М. Перспективы развития экстракционного оборудования для созревания висковых дистиллятов / Д. М. Бородулин, **Я. С. Головачева**, А. В. Шалев // Сборник тезисов докладов участников пула научно-практических конференций / под общ. ред. Е. П. Масюткина; Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского; Луганский государственный педагогический университет; Керченский государственный морской технологический университет. – Керчь, 2021. – С. 76–79.

12. Бородулин, Д. М. Создание и апробирование лабораторного стенда для совершенствования процесса созревания висковых дистиллятов / Д. М. Бородулин, **Я. С. Головачева**, А. В. Шалев // Сборник тезисов IX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Кемерово, 2021. – С. 40.

13. Бородулин, Д. М. Перспективы развития способов созревания висковых дистиллятов / Д. М. Бородулин, **Я. С. Головачева**, М. В. Просин, С. С. Комаров, С. Р. Хашимов // Агротехнологии XXI века: стратегия развития, технологии и инновации: материалы Всероссийской научно-практической конференции; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова», 2022. – С. 136–137.

14. Горбунова, А. А. Механоактивация технологической воды для производства напитков / А. А. Горбунова, **Я. С. Головачева**, Л. В. Пермякова // Пищевые инновации и биотехнологии: сборник тезисов XII Всероссийской (национальной) научной конференции студентов, аспирантов, молодых ученых. – Кемерово, 2024. – С. 24–25.

15. Бородулин, Д. М. Перспективные методы интенсификации процесса экстракции целевых компонентов из дубовой клепки в висковые дистилляты / Д. М. Бородулин, М. В. Просин, **Я. С. Головачева** // Сборник статей III Международной научно-практической конференции «Научные открытия и инновационные стратегии – М.: Международные центр «Новые научные исследования», 2025. – С. 14–18.

16. Бородулин, Д. М. Способ приготовления виски с применением механического активирования молодых висковых дистиллятов / Д. М. Бородулин, М. В. Просин, **Я. С. Головачева** // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продовольствия – 2025». – М., 2025. – С. 99–103.

Список сокращений и условных обозначений

Б.с. – безводный спирт	Пф – содержание полифенолов, мг/дм ³
ВД – висковый дистиллят	Св – содержание сухих веществ, г
ВВД – выдержанный висковый дистиллят	С _{с.в.} – кинетическая зависимость содержания сухих веществ, г
ООО – общество с ограниченной ответственностью	С _х – кинетическая зависимость содержания полифенолов, мг/дм ³
СВЧ-излучение – сверхвысокочастотное излучение	Т – продолжительность процесса экстрагирования, сутки
Сс – концентрация спирта в дистилляте, % об.	п – частота вращения, мин ⁻¹
Д – оптическая плотность, ед.	
t – время, мин	