

Министерство образования и науки Донецкой Народной Республики  
Государственная организация высшего профессионального образования  
«Донецкий национальный университет экономики и торговли  
имени Михаила Туган-Барановского»

*На правах рукописи*

КАТАНАЕВА ЮЛИЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ  
ЭКСТРАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ОТХОДОВ ТОМАТНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Донецк – 2020

**Диссертация является рукописью.**

Работа выполнена в ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского» Министерства образования и науки Донецкой народной республики.

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент **Соколов Сергей Анатольевич**, ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского», заведующий кафедрой Общественных инженерных дисциплин.

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Пищевой инженерии **Тихонов Сергей Леонидович**, ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет»

кандидат технических наук, доцент кафедры Пищевые технологии и оборудование **Прокопенко Ирина Александровна** ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

**Ведущая организация:** Государственное образовательное учреждение высшего образования ЛНР «Луганский государственный аграрный университет», факультет Пищевых технологий

Защита состоится «25» декабря 2020 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.025.02 при ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского» по адресу: 283055, г. Донецк, пр. Театральный, 28, корпус 3, ауд. 3231, тел: +38(062)304-50-50, e-mail: [dissovet0102502@donnuet.education](mailto:dissovet0102502@donnuet.education).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского» по адресу: 283017, г. Донецк, б. Шевченко, 30 (<http://library.donnuet.education>). Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 01.025.02 к.т.н., доцент



Н.Н. Севаторов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

В настоящее время предприятия пищевой промышленности, занятые переработкой томатов, являются источником значительного количества отходов органического происхождения. Эти отходы являются не только ценным кормовым продуктом, но, как правило, содержат в себе вещества, представляющие большой интерес для последующего использования при производстве функциональных продуктов питания или в качестве адъювантов в лекарственных и фармацевтических препаратах. Переработка томатов - это одна из отраслей, которые производят большие объемы отходов, которые богаты ценными компонентами с большим экономическим интересом. Вопросами изучения и разработки процессов и технологий глубокой переработки и эффективного использования вторичных ресурсов в пищевой промышленности занимались отечественные ученые: Баканов М.И., Денщик М.Т., Евланов Л.Г., Канторович Л.В., Касьянов Г.И., Ларионов А.И., Осипов В.Н., Сайфуллин Р.С., Шахбанов Р.Б., Шеремет А.Д. и др.

Проблемам комплексного использования вторичных материальных ресурсов посвящены научные труды Голиковой Н.В., Комарова В.И., Лебедева Е.И., Лебединского Ю.П., Сизенко Е.И., Сонжаровского В.А., Файвишевского М.Л., Хачатурова Т.Е., и др. Весомый вклад в изучение возможностей повторного использования пищевых отходов внесли иностранные учёные: Карр Ч., Ланкастер К., Хайман Д., Хеддвик К., Хоув Ч., Schaub S. M., Hall G. M., Howe J., Naziri E., Nenadis N., Schieber A., и др.

Таким образом, тема диссертационного исследования, посвященная разработке процессов и технологии ресурсосберегающей переработки отходов томатного производства в компоненты с большой добавленной стоимостью, к которым относятся природные красители - каротиноиды, является актуальной.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Работа содержит результаты исследований, выполненных автором в плане госбюджетной тематики НИР ГО ВПО «ДонНУЭТ» Д-2014-9 «Теоретическое обоснование инновационных методов обработки продуктов питания, сырья и создание технологического оборудования», Д-2018-21 «Разработка инновационной стратегии и моделей массообменных процессов повышенной эффективности для получения экстрактов из растительного сырья», а также хоздоговорной тематики (Договор № 97ХТ/2019 «Разработка системы авторегулирования температуры в камере высокого давления»).

**Цель работы** - определение и развитие научно - технических подходов к получению веществ с высокой добавленной стоимостью за счёт повышения эффективности процессов извлечения экстрактивных веществ из отходов томатного производства.

### **Задачи исследования:**

- провести системный анализ современного состояния в области продовольственных потерь и органических отходов в пищевой промышленности, в общем, и в томатном производстве в частности;

- выполнить сравнительный анализ существующих массообменных процессов, применяемых для извлечения целевых компонентов из растительного сырья;

- на основании анализа и обобщения известных методов экспериментальных исследований принять адаптированную стратегию и тактику собственных экспериментальных исследований с одновременной разработкой соответствующей методики и техники эксперимента;

- на основании изучения возможностей цифровой микроскопии разработать оценочный экспресс-метод определения относительного содержания каротиноидов в исходном сырье;

- адаптировать возможности абсорбционной спектроскопии для определения относительного содержания каротиноидов;

- разработать методику подготовки исходного сырья к конечному этапу извлечения каротиноидов;

- экспериментально изучить процесс получения водных экстрактов каротиноидов за счёт применения субкритической воды в качестве растворителя;

- экспериментально изучить процесс экстрагирования каротиноидов из отходов томатного производства с применением высокого давления в широком диапазоне физических параметров, определить режимы, обеспечивающие извлечение экстрактивных веществ с максимальным выходом;

- разработать аппаратную схему и её отдельные конструктивные элементы для реализации разработанных процессов извлечения каротиноидов из томатного сырья;

- внедрить результаты исследований в практику исследовательских, проектных и производственных предприятий, а также в учебный процесс.

**Объект исследований** - процессы экстрагирования каротиноидов из отходов томатного производства.

**Предмет исследований** - параметры процессов экстрагирования каротиноидов из отходов томатного производства.

**Методы исследования.** При выполнении работы использовался комплекс общепринятых и специальных физических, химических, биохимических, физико-химических, математических методов, адаптированных для использования с пищевыми продуктами и продуктами, полученными в результате экстрагирования, методы математической статистики для обработки и моделирования результатов экспериментальных исследований.

**Обоснование и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.**

1. Для экспериментальных работ результаты получены с использованием поверенных измерительных приборов и апробированных методов обработки экспериментальных данных при проведении экспериментов на лабораторных установках:

- для сушки в псевдожиженном слое;

- для экстрагирования высоким гидростатическим давлением;
- для субкритической водной экстракции.

2. Обработка экспериментальных данных проведена корректно, с использованием современных программных средств и приложений для инженерных вычислений.

3. Теоретические исследования включают в себя разработку математических моделей процессов экстрагирования каротиноидов субкритической водой и высоким давлением.

**Научная новизна полученных результатов** заключается в решении научно-прикладной проблемы получения компонентов с высокой добавленной стоимостью за счет применения инновационных процессов экстрагирования субкритической водой и высоким гидростатическим давлением.

В основу теоретических и экспериментальных исследований положена научная концепция, заключающаяся в создании условий проведения процессов экстрагирования, которые способствуют наиболее полному и менее затратному получению целевых компонентов из отходов томатного производства.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований **впервые:**

- разработана методика и техника комплексных исследований влияния высокого гидростатического давления на кинетику извлечения каротиноидов из отходов томатного производства;
- разработан и запатентован экспресс-метод цифровой микроскопии для определения содержания каротиноидов в растительном сырье и способ подготовки образцов для измерений;
- адаптированы возможности абсорбционной спектрофотометрии для определения относительного содержания каротиноидов;
- показано, что процесс экстрагирования высоким гидростатическим давлением возможно интенсифицировать воздействием дополнительных физических факторов за счет создания адиабатических или изотермических условий набора давления и применения звуковых волн.

**получили дальнейшее развитие:**

- представления, касающиеся совокупности явлений, сопровождающих процесс экстрагирования целевых компонентов высоким гидростатическим давлением;

**усовершенствованы:**

- методические приёмы предварительной подготовки сырья для экстрагирования каротиноидов из отходов томатного производства;
- методико-аппаратурное обеспечение для проведения мобильных экспериментов экстрагирования субкритической водой.

**Практическое значение** полученных результатов заключается в разработке и практическом применении процесса экстрагирования каротиноидов на основе результатов экспериментов, в рамках которых **впервые:**

- даны практические рекомендации по использованию возможностей цифровой микроскопии и абсорбционной спектрофотометрии в проведении экспресс-анализа содержания каротиноидов в растительном сырье;
- разработана аппаратурно-технологическая схема линии экстрагирования каротиноидов из отходов томатного производства с использованием субкритической водной экстракции;
- разработана аппаратурно-технологическая схема линии экстрагирования каротиноидов из отходов томатного производства с использованием высокого гидростатического давления;
- для очистки томатного сырья от магнитных примесей разработан магнитно-ленточный сепаратор, конструкция которого обеспечивает необходимую производительность и селективность выделения различных по магнитным свойствам фракций из вязко-пластичных пищевых масс;

Результаты научных исследований защищены патентами на полезную модель:

- Пат. 41762 Україна, МПК В03С 1/08. Магнітно-стрічковий сепаратор / О.І.Баришев, **Ю.О.Катанаєва**; заявник і власник Донецьк. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – № u200814215 заявл. 10.12.2008; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 11. – 4 с. : іл.

- Пат. 117916 Україна, МПК (2017.01) G01N 33/02, G01N 21/00, G01N 21/25, G01J 3/46. Експрес-метод визначення вмісту каратеноїдів у плодах томату / Гура О.А., Соколов С.А., Севаторов М.М., Декань О.О., **Катанаєва Ю.О.**, Букіна Я.Г.; заявник і власник Гура О.А., Соколов С.А., Севаторов М.М., Декань О.О., **Катанаєва Ю.О.**, Букіна Я.Г. – № u 201701431 ; заявл. 15.02.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. №13. – 3 с.

Научные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, рекомендованы для использования в научно-исследовательских и проектно-конструкторских учреждениях пищевого машиностроения, а также в учреждениях высшего профессионального образования, которые занимаются подготовкой специалистов в области разработки и эксплуатации оборудования пищевых производств.

**Реализация результатов работы.** Внедрение научно-технических и технологических разработок осуществлено в производственных условиях на предприятиях Донецкой Народной Республики: ООО «Фирма «ВИ-ВА» (г. Донецк, акт от 20.12.2019); ООО «ТЕРМ» (г. Донецк, акт от 11.09.2020); ООО «Завод Амплитуда» (г. Донецк, акт от 12.06.2020).

**Личный вклад соискателя заключается:** в разработке основной концепции диссертационной работы, критическом анализе материалов, касающихся традиционных и современных процессов извлечения целевых компонентов из растительного сырья, постановке цели и формулировке задач исследований, проведении экспериментальных исследований, обработке и анализе экспериментальных данных, определении закономерностей процессов экстрагирования каротиноидов из отходов томатного производства, подготовке к публикации материалов исследований, разработке теоретических положений и их экспериментальной проверке,

разработке научно-обоснованных способов переработки вторичных сырьевых ресурсов консервного производства с использованием физических и биохимических приемов с целью извлечения ценных компонентов, анализе эмпирических результатов, формулировании выводов и рекомендаций по использованию материалов работы в практике, осуществлении мероприятий по внедрению полученных результатов.

**Апробация результатов диссертации.** Положения и выводы диссертации апробированы в ходе научно-практической деятельности автора. Основные результаты по теме диссертационной работы докладывались на: ежегодных научных конференциях Донецкого национального университета экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского в 2016-2020 годах; I-IV Международные научно-технические конференции «Современные процессы в пищевых производствах и инновационные технологии обеспечения качества пищевых продуктов» в 2016-2020 годах; X Международной научной конференции студентов и аспирантов «Техника и технология пищевых производств» (г. Могилев, 2016 г.); Международной научно-технической конференции, посвящённой 105-летию со дня рождения А. Н. Плановского (г. Москва, 2016 г.); Международная научно-техническая конференция, посвящённая 100-летию со дня рождения М.Х. Кишиневского «Явления переноса в процессах и аппаратах химических и пищевых производств» (г. Воронеж, 2016г.); Международная молодёжная научная конференция "XIV Королёвские чтения", посвящённая 110-летию со дня рождения академика С. П. Королёва, 75-летию КуАИСГАУ-СамГУ-Самарского университета и 60-летию со дня запуска первого искусственного спутника Земли (г. Самара, 2017); Материалы международной научно-практической конференции, посвящённой 25-летию факультета технологии и товароведения Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I «Производство и переработка сельскохозяйственной продукции: менеджмент качества и безопасности» (г. Воронеж, 2018 г.); II-й Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы биоразнообразия и природопользования» (г. Керчь, 2019г.); IV Международной научной конференции «Донецкие чтения 2019: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности» (г. Донецк, 2019 г.); Пуле научно-практических конференций (г. Сочи, 2020 г.).

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 23 научных работы, в том числе: 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, утвержденных МОН ДНР, 9 статей в утвержденных журналах РИНЦ, 1 – в издании Scopus, 2 патента Украины на полезную модель, 6 тезисов докладов и материалов конференций, 1 монография.

**Структура диссертации.** Основное содержание работы изложено на 136 страницах машинописного текста, который состоит из 6 разделов и 5 приложений. Диссертация проиллюстрирована 42 рисунками и содержит 12 таблиц. Список использованной литературы содержит 260 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, на основании чего сформулирована цель и определены задачи исследования. Представлена связь с научными программами, планами и темами, определены объект, предмет и методы исследований, дано обоснование достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, приведены научное и практическое значения работы, представлена апробация, структура и количество публикаций по теме диссертации.

В первом разделе **«Современные принципы получения компонентов с высокой добавленной стоимостью из отходов пищевой промышленности»** выполнен аналитический обзор существующих методов экстрагирования биологически активных веществ. Определено, что в настоящее время в области получения компонентов с высокой добавленной стоимостью из отходов пищевой промышленности использование сочетания новейших технологий в целях переработки бросового сырья представляет экономическую альтернативу традиционным методам экстрагирования в соответствии с возрастающими экологическими требованиями.

Проведенный анализ применения в пищевых технологиях инновационных процессов переработки отходов пищевой промышленности показал, что в них господствуют представления, сделанные на основании большого количества разнообразных теоретических и экспериментальных исследований. Эти выводы отражают общепринятые понятия и показывают преимущества и ограничения использования инновационных методов интенсифицирующих процессов экстрагирования в пищевых технологиях.

Разработка высокоинтенсивных, экологически чистых, энергосберегающих технологий, обеспечивающих высокий уровень комплексного, безотходного использования отходов томатного производства, является важной научно-практической проблемой, решение которой невозможно без всестороннего экспериментального исследования влияния технологических факторов на процесс извлечения каротиноидов из отходов томатного производства.

На основании проведенных аналитических исследований сделаны выводы, определившие дальнейшую структуру комплекса научных исследований по изучению экстрагирования каротиноидов из отходов томатного производства (рис. 1).

Во **втором разделе «Методико-аппаратурное обеспечение исследований в области разработки технологии переработки отходов томатного производства»** дана исчерпывающая картина имеющихся методов исследования в данной области, даны схемы и приведена стратегия собственных исследований, определённых поставленными задачами. Рассмотрены виды каротиноидных пигментов плодов томата, их свойства, химическая и пространственная структуры, методы их определения. Изучены общепринятые и адаптированные к задачам работы методы исследований свойств сырья и получаемых экстрактов.



Рисунок 1 – Структурно-логическая схема исследований

Предложена методика эксперимента по определению общей фракции каротиноидов, а также проведены исследования по адаптации возможностей цифровой микроскопии и абсорбционной спектрофотометрии для определения относительного содержания каротиноидов.

Разработаны методические приёмы предварительной подготовки сырья для экстрагирования каротиноидов с использованием сушки томатных выжимок на сушильной установке с циркуляционным контуром, а также сушилке с псевдооживленным слоем. Предложено методико-аппаратурное обеспечение исследований экстрагирования субкритической водой и высоким гидростатическим давлением, а также программные продукты и компьютерные технологии, используемые при проведении исследований и статистической обработке экспериментальных данных.

В третьем разделе «**Разработка методов количественной оценки применимости исходного сырья для последующего извлечения каротиноидов**» приведены результаты экспериментальной отработки экономически рентабельных методов определения содержания каротиноидов в образцах плодов томата различных сортов и степени их зрелости и в продуктах их переработки. Для проведения сравнительного анализа по содержанию каротиноидов и отработки техники эксперимента были исследованы плоды томата, перца и арбуза, доминирующим цветом мякоти которых является красный цвет. Поскольку подготовленные для измерений образцы представляют собой однородные полидисперсные многофазные системы, микроизображения которых являются двумерными распределениями цветового сигнала, отображающего фазовый состав и структуру пигментированных микрообъектов в исследуемом поле зрения, то измеряемой величиной является цвет. При анализе микроизображений решалась задача обнаружения и разделения отдельных фаз в поле зрения образца и определение их процентного содержания в пределах кадра изображения размером 12 мегапикселей. *In vivo* каротиноиды находятся в клетках в ассоциации с липидами или белками и на микроизображении представляют собой пигментированные образования, состоящие из микрообъектов, имеющих разветвленную границу раздела фаз.

Примеры микрофотографий образцов мякоти плода томата, перца и арбуза представлены на рис.2

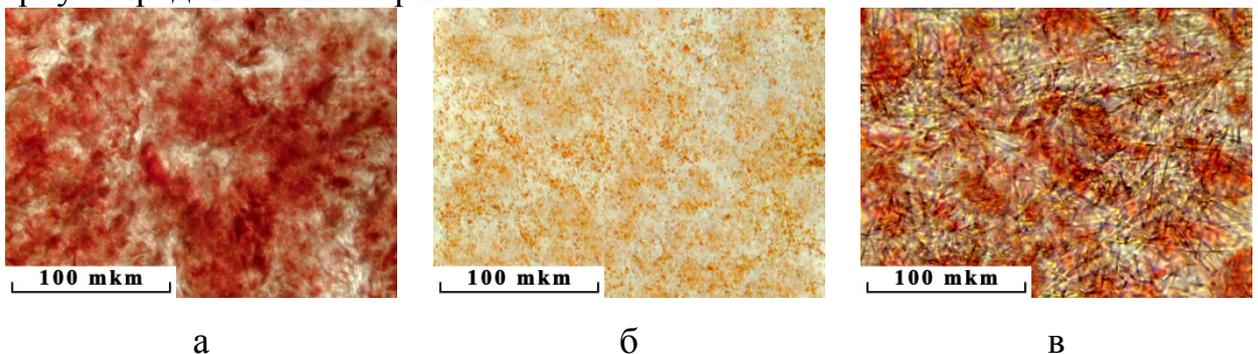


Рисунок 2 - Микрофотографии образцов мякоти плода томата (а), перца (б) и арбуза (в)

На первом этапе обработки микрофотографий проводили фильтрацию изображений по цвету исследуемой фазы, пигментированной каротиноидами. Для этого сначала разлагали цвет каждого пикселя цифрового изображения на значения трех основных цветов в цветовой модели RGB: R (красного), G (зеленого) и B (синего) и определяли величину диапазона основных цветов, соответствующих цвету измеряемой фазы. Далее, проводили фильтрацию фаз на изображении, в результате которой тем пикселям, у которых значения трех основных цветов находятся вне диапазона основных цветов исследуемой фазы, присваивали белый цвет, а цвет пикселей исследуемой фазы оставляли без изменения. Полученное изображение переводили в оттенки серого и проводили выравнивание значений цветовых составляющих. Три цветовых составляющих приравнивали к наибольшему из значений цветовой схемы. В результате модификации метода выравнивания значений цветовых составляющих пикселя, изображения в оттенках серого обладают большей контрастностью, которая играет существенную роль для последующей обработки микрофотографий. После этого проводили бинаризацию полученных изображений, совпадающих с исследуемой фазой в пределах одного поля зрения. На рис. 3 приведены полученные таким образом бинарные изображения микрофотографий образцов мякоти томата, перца и арбуза. На последнем этапе, используя специально разработанную автоматизированную систему анализа растровых микроскопических изображений, подсчитывали количество черных пикселей и определяли их процентное содержание в пределах кадра изображения. В результате для микрофотографий на рис.3, процентное содержание каротиноидов в образцах мякоти составляет: 43,4 % – для плода томата, 22,1 % – для перца и 41,6 % – для арбуза.

Для расчета погрешности определения количества каротиноидов в одном поле зрения при фокусировке на разных слоях образца, использовали микрофотографии мякоти томата. На рис.4 схематично показано расположение слоев в образце, на которые проводилась фокусировка при микроскопическом фотографировании:

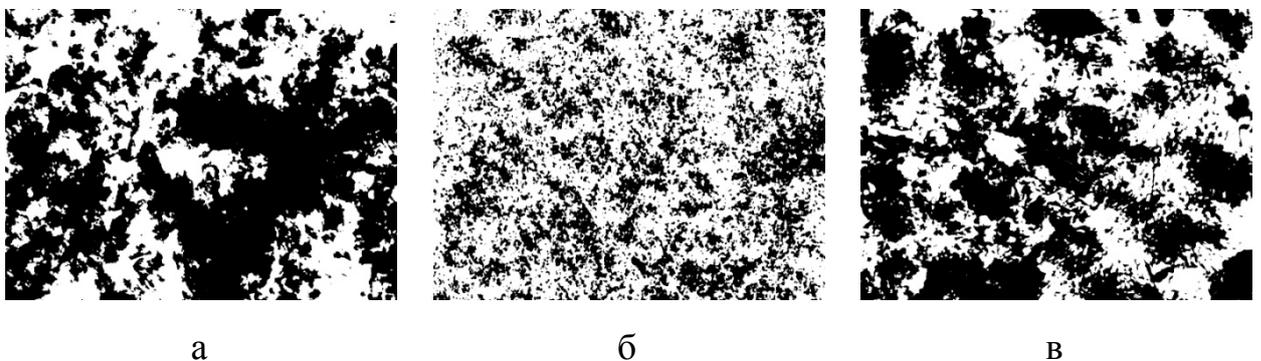


Рисунок 3 - Бинарные изображения микрофотографий образцов мякоти плода томата (а), перца (б) и арбуза (в)

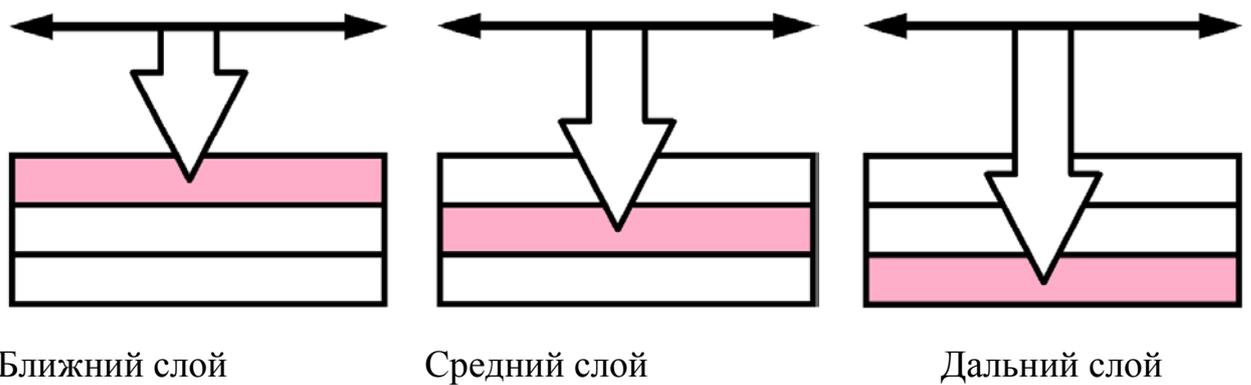


Рисунок 4 - Расположение слоев в образце для фокусировки

Погрешность определения содержания количества каротиноидов (среднеквадратичное отклонение  $\sigma$ ) в одном поле зрения при фокусировке на разных слоях образца рассчитывали по формуле (1):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество измерений содержания каротиноидов,  $x_i$  – содержание каротиноидов найденное в текущем измерении,  $\bar{x}$  – среднееарифметическое содержание каротиноидов, определенное по результатам  $n$  измерений.

В результате проведенного расчета получили, что среднееарифметическое содержание каротиноидов в одном поле зрения при фокусировке на разных слоях образца составляет  $\bar{x} = 46,13\%$  с погрешностью определения (среднеквадратичное отклонение)  $\sigma = \pm 0,85\%$ .

Для определения относительного содержания каротиноидов были использованы возможности абсорбционной спектрофотометрии. Исследования проводили в диапазоне длин волн от 3500 до 10000 Å. Поскольку *in vivo* образцы мякоти плодов томата являются полидисперсными многофазными системами, состоящими из рассеивающих и поглощающих свет центров с произвольной формой и различными размерами, то строгий учет процессов рассеяния света представляет собой чрезвычайно сложную задачу. Закон Бугера-Ламберта-Бера применим к системам с коллоидной степенью дисперсности при невысоких концентрациях и малых толщинах слоя, что вполне соответствует исследуемым *in vivo* образцам мякоти плодов томата. В случае, когда образец представляет собой плоскопараллельный и однородный слой вещества, то часть светового потока отражается еще и от поверхности границ раздела. Интенсивность светового потока, прошедшего через плоскопараллельный и однородный слой светорассеивающего и светопоглощающего вещества, мы представляли как разность между интенсивностью излучения, падающего на слой вещества и суммой интенсивностей излучений поглощенного,

отраженного от границы раздела и рассеянного веществом в произвольных направлениях.

Таким образом, в простейшем случае спектральную зависимость оптической плотности  $D_k(\lambda)$ , обусловленную светорассеянием, можно аппроксимировать эмпирическим выражением в виде линейной функции:

$$D_k(\lambda) = a + b \cdot \lambda \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты, не зависящие от длины волны  $\lambda$ .

Спектральные зависимости натуральной оптической плотности  $D$  образцов рассчитывали по измеренным спектрам пропускания. Результат расчета показан на рис.5.

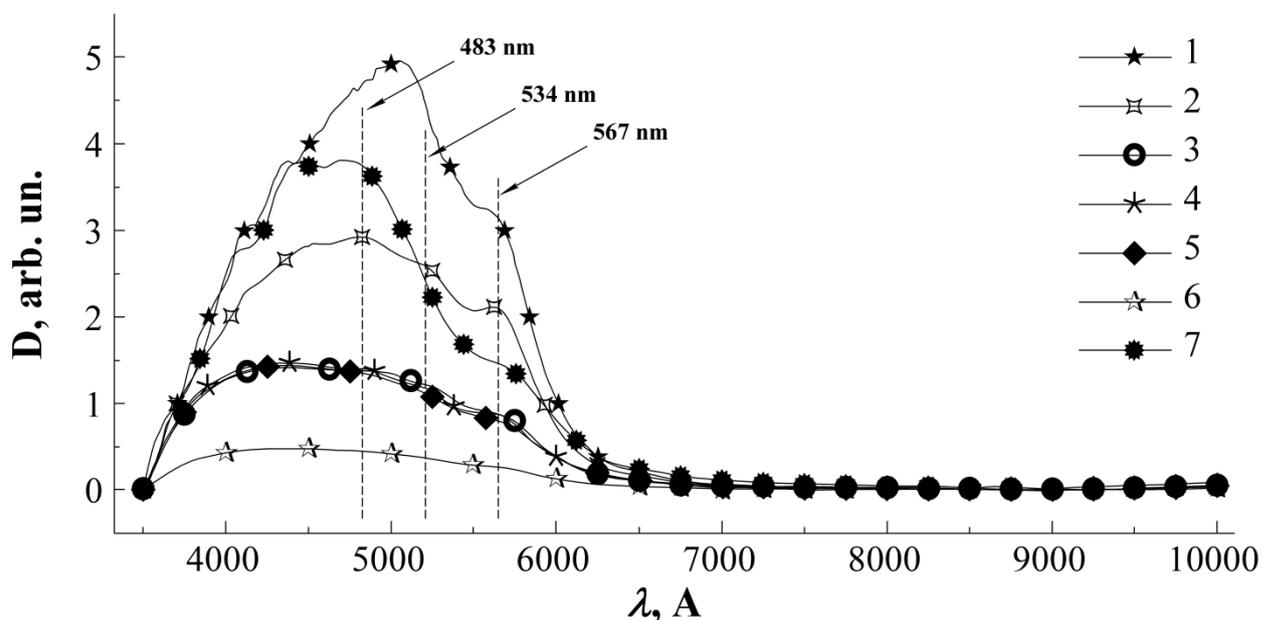


Рисунок 5 - Спектральные зависимости натуральной оптической плотности  $D$  образцов: сушеной мякоти плода томата (1), мякоти плодов томата различной степени зрелости в порядке убывания (2-6), томатной пасты (7)

Как видно на рис. 5, в диапазоне длин волн от 3500 до 6500 Å наблюдается широкая составная полоса поглощения, являющаяся результатом суперпозиции полос поглощения отдельных каротиноидных пигментов, входящих в состав *in vivo* образцов мякоти плодов томата. На рисунке также видна ярко выраженная зависимость интенсивности полосы поглощения от степени зрелости плодов томата, что связано с изменением количества каротиноидов в плодах томата в процессе их созревания. Так, образцу мякоти самого спелого плода томата (кривая 2 на рис.5), в котором содержится наибольшее количество каротиноидов, соответствует и наибольшая интенсивность полосы поглощения. Поскольку широкая составная полоса поглощения в диапазоне длин волн от 3500 до 6500 Å является суперпозицией полос поглощения отдельных каротиноидных пигментов, входящих в состав *in vivo* образцов мякоти плодов томата, то в

соответствии с законом аддитивности оптической плотности  $D$ , площадь под кривыми представляет собой величину, прямо пропорциональную толщине слоя  $d$  и суммарной концентрации каротиноидов  $C_{\text{Сумм}} = \sum_{i=1}^N C_i$ . Результаты

расчета относительной суммарной концентрации каротиноидов  $C_{\text{Сумм}}^{\text{Отн}} = \frac{\sum_{i=1}^N C_i}{C_{\text{Сумм}}^{\text{Макс}}}$  в исследованных образцах сведены в таблицу 1.

Таблица 1 - Результаты расчета относительной суммарной концентрации каротиноидов  $C_{\text{Сумм}}^{\text{Отн}}$  в образцах сушеной мякоти плода томата (1), мякоти плодов томата различной степени зрелости (2-6) и томатной пасты (7)

Образец	$C_{\text{Сумм}}^{\text{Отн}}$	$C_{\text{Сумм}}^{\text{Отн}} \cdot 100, \%$
1	1,00000	100
2	0,11150	11,150
3	0,05876	5,876
4	0,05876	5,876
5	0,05724	5,724
6	0,01909	1,909
7	0,12686	12,686

**В четвертом разделе «Экспериментальная отработка технологических режимов экстрагирования субкритической водой»** приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований. В последнее десятилетие для экстракции и химической модификации биологически активных соединений предложено использовать субкритическую воду (перегретая вода под давлением при температурах от 100°C до 374°C). Замена токсичных органических растворителей, парниковых и сжиженных газов экологически чистой субкритической водой позволяет уменьшить экономические и экологические последствия их использования в качестве экстрагента.

Для подготовки исходного сырья к конечному этапу извлечения каротиноидов - собственно экстрагированию субкритической водой, необходимо используемое сырьё (жмых от производства томатного сока, дроблёные томаты и прочие некондиционные составляющие) подвергнуть сушке для последующего измельчения. Известно, что процесс сушки не требует каких-либо сложных устройств и специальной тары. Однако сушка является одним из наиболее энергоёмких процессов пищевых производств. При постоянном росте цен на энергоносители, производство часто становится нерентабельным. Поэтому актуальной становится задача подбора сушильного оборудования, а также проведение процесса при оптимальных

технологических параметрах, что должно обеспечить необходимое качество продукции при минимуме энергозатрат.

Был проведен цикл экспериментов по высушиванию томатных выжимок с целью подготовки сырья для последующего экстрагирования. Сушку исходного сырья проводили на двух установках, в результате сравнения результатов экспериментов и с учётом специфики исходного сырья и имеющихся возможностей в качестве основного способа сушки томатных выжимок нами был применён метод сушки в сушилке с псевдооживленным слоем (ПОС). В сушилках ПОС достигается интенсивное перемешивание материала, ускоренный тепло- и массообмен, благодаря чему можно использовать сушильный агент при повышенных температурах без значительной потери качества конечного продукта.

Томатные выжимки представляют собой высоковлажный термолабильный полидисперсный материал. Наличие поверхностной влаги, полидисперсность и несферичность частиц представляют большие трудности при аналитическом исследовании явлений гидродинамики ПОС. Нами были проведены экспериментальные исследования по оценке кинетики сушки томатных выжимок в условиях ПОС. По полученным экспериментальным данным были построены кривые сушки (рисунок 6).

Анализ кривых скорости сушки показал, что для их математического описания с достаточной степенью точности может быть использована модель А.В. Лыкова, предусматривающая замену действительной кривой скорости сушки во втором периоде прямой. На основе полученных данных определены диапазоны рациональных технологических и конструктивных параметров сушилок ПОС.

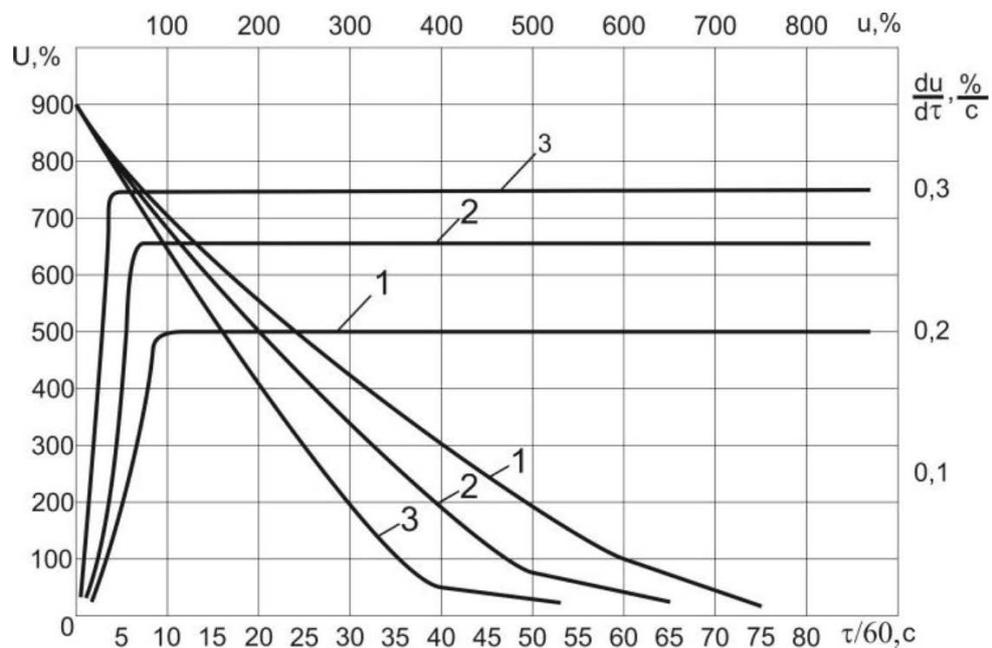


Рисунок 6 - Зависимость кривых сушки и кривых скорости сушки от температуры теплоносителя.

1 -  $t = 50^{\circ}\text{C}$ ; 2 -  $t = 60^{\circ}\text{C}$ ; 3 -  $t = 70^{\circ}\text{C}$ ;

Экстракцию каротиноидов из томатного жмыха проводили двумя методами: традиционным химическим и с применением воды в субкритическом состоянии. Химическую экстракцию проводили с использованием четыреххлористого углерода. Полученную водно-органическую смесь отделяли от нерастворившегося остатка растительного сырья, органическую фазу высушивали под вакуумом. Одну часть полученного сухого остатка проанализировали методом ИК-спектроскопии в матрице KBr. Другую часть сухого осадка перерастворили в  $CCl_4$  и проанализировали методом УФ-спектроскопии на спектрофотометре Agilent Cary. Экстракцию с применением субкритической воды проводили на установке, разработанной и изготовленной в лаборатории флюидных технологий ГО ВПО «ДонНУЭТ им. Михаила Туган-Барановского».

Методика проведения экстракции водой в субкритическом состоянии заключалась в автоклавировании стеклянных запаянных ампул с предварительно подготовленным образцом жмыха. При этом обеспечивалось условие объемного соотношения воздух-вода ( $2/3$  воды и  $1/3$  воздуха) как в ампуле с образцом, так и в самом автоклаве.

Предварительная подготовка образца к автоклавированию заключалась в насыщении сухой массы томатного жмыха водой. В работе были исследованы образцы, выдержанные в автоклаве при температуре 25, 100 и 120°C в течении 60 минут. Массовое соотношение сырья и экстрагента составляло 1:5.

Обработку полученных спектров и расчет общего содержания каротиноидов в образцах осуществляли с помощью программного обеспечения Origin 5.0. Обработку результатов проводили обычным образом с использованием коэффициента Стьюдента и вычислением доверительного интервала. Доверительную вероятность принимали равной 0,95.

На ИК-спектрах обоих экстрактов идентифицируются характеристические полосы в диапазоне частот колебаний  $1650-650\text{ см}^{-1}$ , являющиеся наиболее характерными для области колебаний двойных связей:  $1650-1580\text{ см}^{-1}$  колебания двойной связи  $C=C$  полиенов,  $1450-1400\text{ см}^{-1}$  - деформационные колебания  $CH_2$ - связи алкенов,  $1100-950\text{ см}^{-1}$  - неплоские деформационные колебания связи  $HC=$  и наконец  $618\text{ см}^{-1}$  можно отнести к колебанию связи  $R-C =$ .

Полученные результаты ИК-спектроскопического анализа дают основание также предположить, что в экстрактах доминирующим каротиноидом является ликопин. В таблице 2 приведено содержание каротиноидов в водном экстракте. Из таблицы 2 видно, что применение воды в субкритическом состоянии увеличивает содержание каротиноидов в экстракте на порядок. Таким образом, были получены и исследованы водные растворы томатного жмыха с применением технологий экстрагирования субкритической водой.

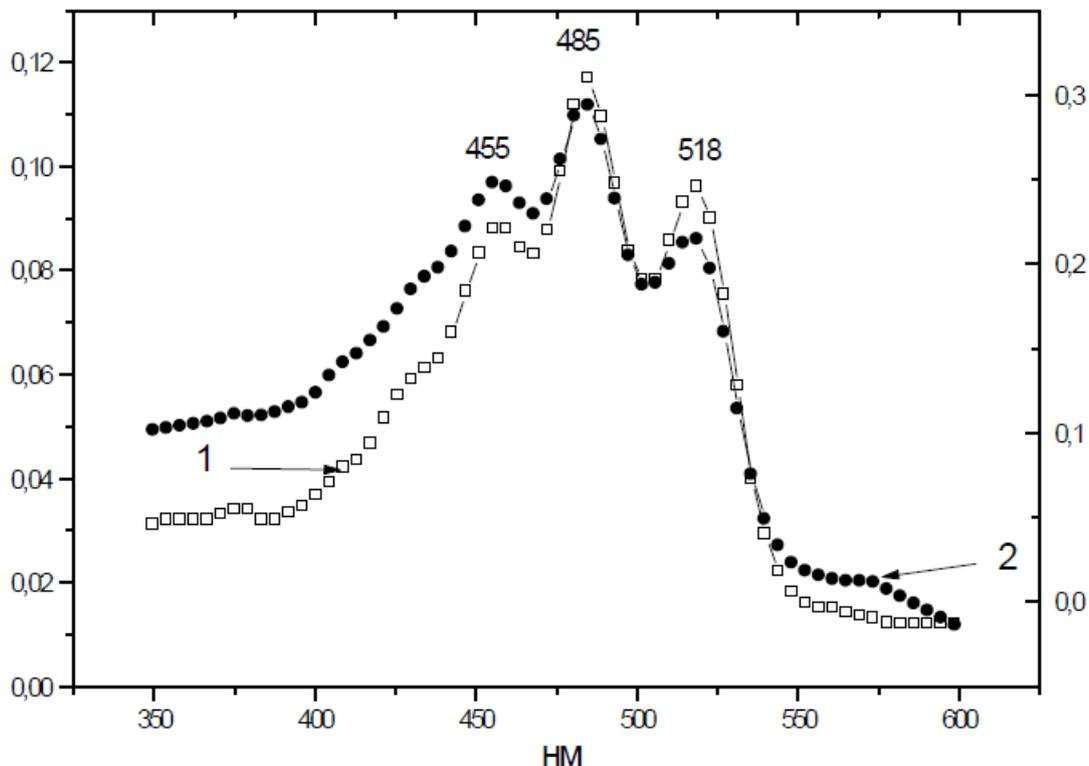


Рисунок 7 - УФ-спектры экстракта сухого жмыха томата, полученные с использованием сверхкритической воды – спектр 1; с использованием раствора метанол:CCl<sub>4</sub> – спектр 2

Таблица 2 - Содержание каротиноидов в водном экстракте, полученном с использованием субкритической воды

Температура, °С	Содержание каротиноидов, мг/дм <sup>3</sup>	$R^2 = 0.998$ $p = 0,041$
25	0,224 ± 0,011	
100	1,764 ± 0,088	
120	2,028 ± 0,101	

В качестве сравнения были получены экстракты из сухих томатов с применением органических растворителей. Показано, что применение субкритической воды в технологиях экстрагирования позволяет получать водные растворы неполярных веществ, например ликопинов, что значительно расширяет область применения ликопинов как природных антиоксидантов.

**В пятом разделе «Экстрагирование каротиноидов высоким давлением»** рассмотрены теоретические и экспериментальные аспекты по изучению возможности применения высокого давления для интенсификации процесса экстрагирования каротиноидов из отходов томатного производства.

Экстрагирование высоким давлением (ЭВД) каротиноидов из отходов томатного производства проводилось на автоматизированной установке высокого давления (АУВД), которая была разработана в Донецком

национальном университете экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского. Установка предназначена для лабораторного исследования влияния высокого гидростатического давления и температуры на физические и оптические параметры твердых, жидких и вязкопластичных материалов, используемых в различных отраслях, в том числе и в пищевой промышленности.

Для оценки эффективности экстрагирования высоким давлением было проведено экстрагирование в тех же условиях (температура растворителя 40°C), но при атмосферном давлении 0,1 МПа. Полученные результаты показаны на рис.8. Анализируя полученную экспериментальную кривую, можно сделать предварительное заключение о том, что в диапазоне от 30 до 90 минут процесс происходит при практически неизменной скорости. Считаем, что максимальным временем проведения «классического» экстрагирования будет время 90 мин.

Для полученной экспериментальной кривой программными средствами был подобрана математическая зависимость процесса экстрагирования каротиноидов при атмосферном давлении.

$$y = 0,17 + 0,0077x - \sqrt{(-0,155 + 0,0077x)^2 + 0,069^2} \quad (3)$$

в результате статистической обработки получили:

Корректированный  $R^2 = 0,998$ ;

Стандартная ошибка 0,0028

Критерий Фишера 406,12.

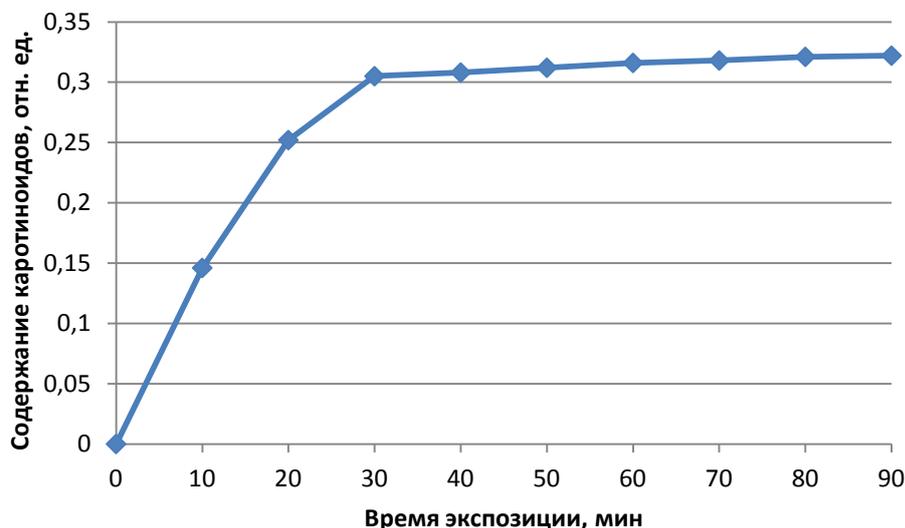


Рисунок 8 - Выход каротиноидов при ТЖЭ

Далее была проведена серия экспериментальных исследований с применением высокого давления. Эксперименты проводились с трёхкратным повторением. Контролировались давление процесса  $P$ , (МПа), температура  $t$ , (°C), время экспозиции  $\tau$ , (мин) и концентрация каротиноидов. Результаты проведенного цикла показали, что при повышении давления от 300 до 900

МПа существенного прироста выхода каротиноидов не наблюдается. Выход на «плато» происходит, в среднем, при времени экспозиции от 10 до 20 мин для всех рассмотренных значений давления. На рисунке 9 приведены результаты экспериментальных исследований со следующими параметрами процесса: диапазон давлений 100...300 МПа, время экспозиции 0...20 мин, температура процесса 40°C.

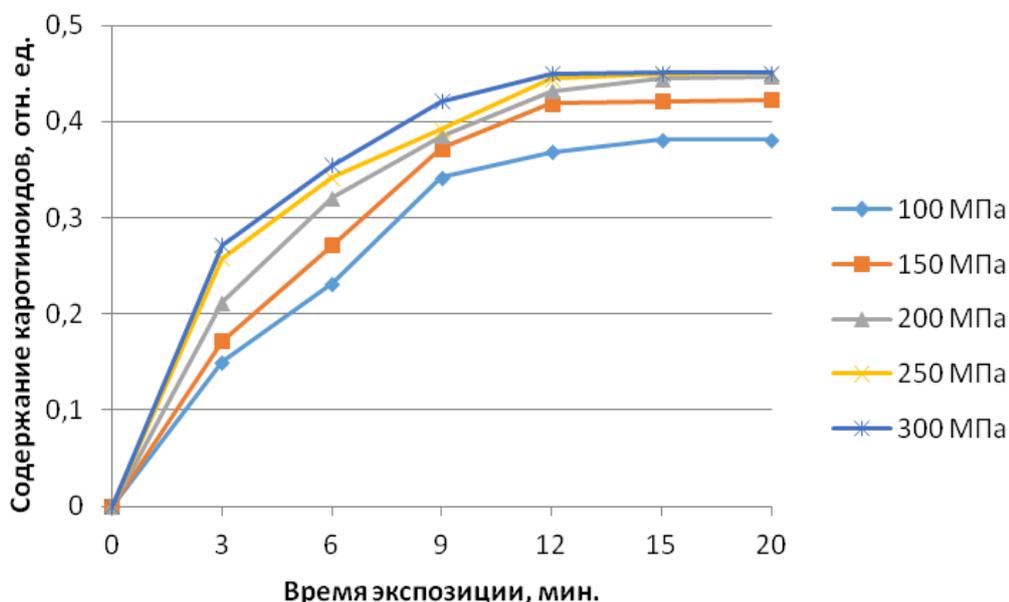


Рисунок 9 - Результаты экспериментальных исследований экстрагирования каротиноидов высоким давлением

Полученные экспериментальные кривые описываются зависимостью:

$$y = a + \frac{b \cdot (e^{c \cdot x} - 1)}{c} \quad (4)$$

Коэффициенты уравнений и их статистическая обработка для различных давлений процесса приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Коэффициенты уравнений и их статистическая обработка

Давление, P, МПа	a	b	c	R <sup>2</sup>	Критерий Фишера	Стандартная ошибка	Доверительный интервал
100	-0,0057	0,068	-0,163	0,98	144,3	0,02	0,95
150	-0,0055	0,079	-0,171	0,985	209,3	0,02	
200	-0,00025	0,094	-0,202	0,99	1556,4	0,007	
250	0,0038	0,113	-0,25	0,99	374	0,015	
300	0,002	0,128	-0,281	0,99	619,8	0,011	

Далее для проведения анализа полученных экспериментальных данных графически представили результаты экспериментов в диапазоне времени

экспозиции давления от 9 до 20 мин (экспериментальные кривые приближаются к плато), рис. 10.

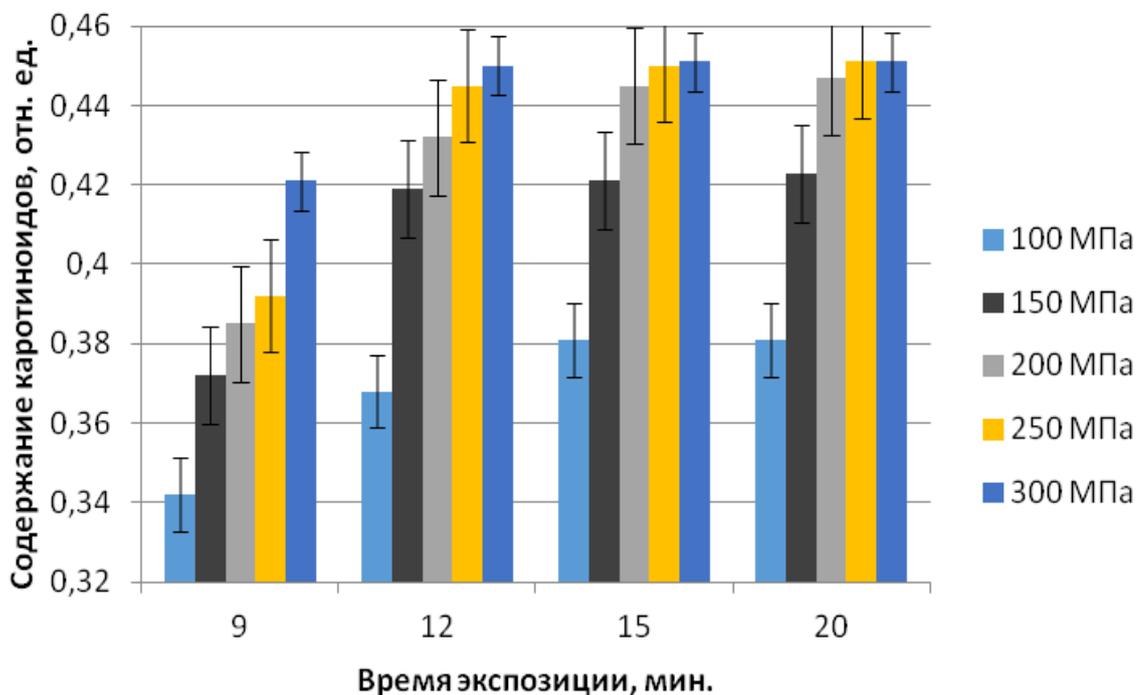


Рисунок 10 - Результаты экспериментальных исследований экстрагирования каротиноидов при времени экспозиции от 9 до 20 мин

Для наглядности представления результатов эксперимента, полученные данные представили в виде базовой поверхности, рис. 11.

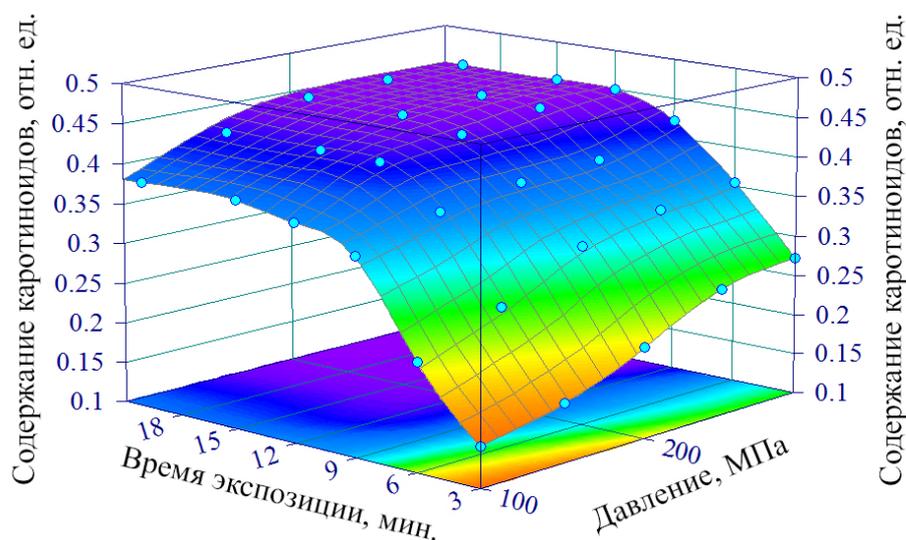


Рисунок 11 - Графическая интерпретация результатов эксперимента

В результате анализа полученных экспериментальных данных построили поверхность отклика, рис.12.

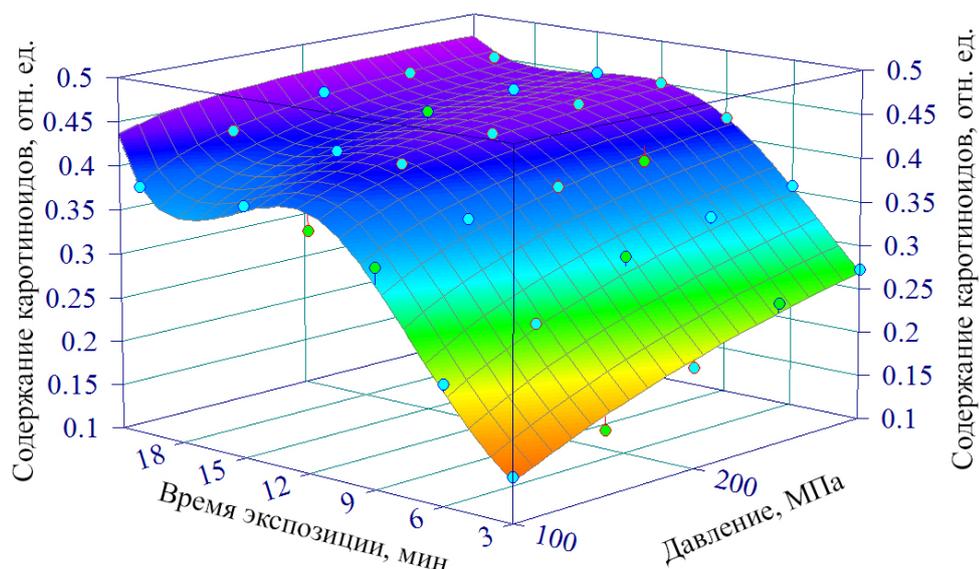


Рисунок 12 - Поверхность отклика

Для полученной поверхности отклика, в результате статистической обработки подобрали математическую зависимость (5).

$$C = \frac{0,0116 + 0,001P - 0,003\tau}{1 + 0,0021P - 0,197\tau + 0,0127\tau^2 - 0,00028\tau^3} \quad (5)$$

Корректированный  $R^2 = 0,988$

Критерий Фишера  $F\text{-stat} = 403,22$

Стандартная ошибка 0,0097

Проведенные эксперименты наглядно демонстрируют, что как давление, так и время экспозиции влияют на выход каротиноидов. При этом, как и с увеличением давления, так и с увеличением времени экспозиции повышается выход экстракции. Однако увеличение значений давления даёт больший прирост выхода каротиноидов в диапазоне от 150 до 300 МПа. Так, при повышении давления от 100 до 300 МПа, при времени экспозиции 3 мин, прирост выхода каротиноидов составляет 57%. Однако, при времени экспозиции 20 минут, разница составляет уже около 16%. Применение давления значительно сокращает время экстрагирования - в среднем на 89%. Сокращение времени экстрагирования может быть объяснено тем фактом, что повышение давления не только увеличивает растворимость, но также ускоряет диффузию растворенного вещества, разрушая клеточную структуру.

В рамках выполнения раздела была предложена модель кинетики экстрагирования каротиноидов из отходов томатного производства.

Представление кинетики извлечения целевых компонентов часто описывается двумя типами уравнений: псевдо- первого порядка и нестационарной диффузии. Первое относится к процессу, контролируемому внутриклеточной диффузией. Второе описывает, что экстракция осуществляется двумя способами: простой смывкой и диффузией внутри частиц.

Такая модель кинетики извлечения целевого компонента из растительного материала основана на двух одновременных процессах: (а) смывка - активные ингредиенты, которые находятся на твердой поверхности, быстро извлекаются простой промывкой растворителем; (б) диффузия - оставшийся активный ингредиент удаляется путем диффузии твердых частиц в растворитель. Концентрация целевого компонента  $C_\tau$  в любой момент времени  $\tau$  в растворителе задается следующим уравнением:

$$C_\tau = C_1(1 - \exp(-k_1\tau)) + C_2(1 - \exp(-k_2\tau)) \quad (6)$$

где  $C_1$ - выход целевого компонента в стадии промывки (%);  $C_2$ - выход целевого компонента в равновесии на стадии диффузии (%);  $k_1$ - коэффициент массопереноса для этапа смывки ( $\text{мин}^{-1}$ );  $k_2$ , коэффициент массопереноса для стадии диффузии ( $\text{мин}^{-1}$ ).

Скорость экстрагирования может быть определена как первая производная уравнения б:

$$v = dC/d\tau = k_1C_1\exp(-k_1\tau) + k_2C_2\exp(-k_2\tau) \quad (7)$$

Скорость в самом начале процесса ( $v_0$ ), т.е.  $v$  при  $\tau = 0$ , равна:

$$v_0 = \left(\frac{dC}{d\tau}\right)_{\tau=0} = k_1C_1 + k_2C_2 \quad (8)$$

Выход в любой момент времени  $C_t$  и выход при равновесии ( $C_1, C_2$ ) в пересчете на сухую массу были определены как количество извлеченного целевого компонента:

$$(\%) = m/M \times 100 \quad (9)$$

где  $m$  - извлеченная масса целевого компонента, (г);  $M$  - масса навески, (г).

Значения коэффициентов массообмена  $k_1$  и  $k_2$ , а также выход каротиноидов при равновесии  $C_1$  и  $C_2$  были рассчитаны численно с помощью нелинейного метода наименьших квадратов с использованием программы «FindGraph 2.61» (таблица 4).

Таблица 4 - Результат обработки модели

Метод	Давление, МПа	$k_1$	$k_2$	$C_1$	$C_2$	Корр. $R^2$	Критерий Фишера
ЭВД	100	0,16	0,171	0,18	0,228	0,98	65,3
	150	0,175	0,167	0,214	0,239	0,98	98,11
	200	0,248	0,169	0,219	0,246	0,99	678,16
	250	0,325	0,21	0,212	0,244	0,99	196,86
	300	0,277	0,292	0,194	0,263	0,99	303,09
ТЖЭ	0,1	0,06	0,09	0,17	0,15	0,98	187,58

Полученные расчётные значения показывают хорошее соответствие между экспериментальными данными и предсказанными значениями модели ( $R^2 = 0,98$ ) при твёрдо - жидкостной экстракции (ТЖЭ). Экспериментальные данные, полученные при ЭВД, также находятся в очень хорошем соответствии с результатами, полученными с помощью этой модели для каждого давления (100-300 МПа) ( $R^2 \geq 0,98$ ). Как также видно из рисунков 9 - 12 для получения равновесного выхода каротиноидов процедура ТЖЭ должна занимать 90 минут, в то время как для метода ЭВД достаточно 20 минут. Поэтому одним из главных преимуществ ЭВД является сокращение времени проведения процесса. На рисунке 13 приведены рассчитанные значения скорости извлечения целевого компонента из отходов томатного производства.

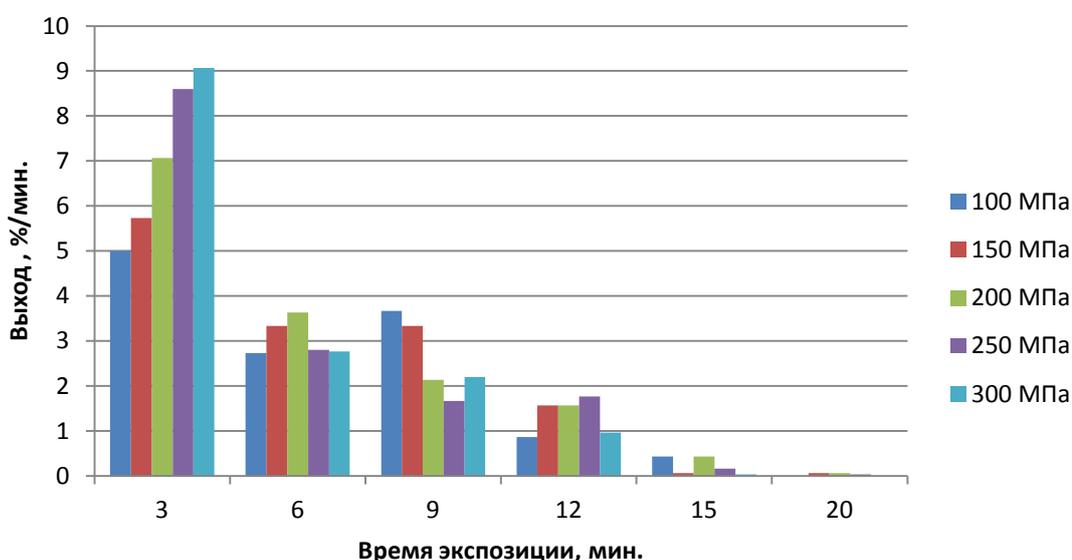


Рисунок 13 - Скорость извлечения целевого компонента при ЭВД

В завершении раздела был проведен цикл экспериментов по изучению возможностей интенсификации экстрагирования каротиноидов из отходов томатного производства комбинированной обработкой высоким давлением и ультразвуком. Изучение такой возможности базировалось на том, что интенсификация экстрагирования возможна за счёт принудительной конвекции во время фазы нагнетания давления, а также за счёт естественной конвекции и вязкостных эффектов, которые могут оказывать значительное влияние на процесс обработки. В качестве дополнительных факторов, которые могут вызвать принудительную конвекцию, могут выступать вибрация, ультразвук, а естественную конвекцию можно вызвать изменением температуры процесса обработки ВД за счет создания адиабатических или изотермических условий набора давления. Для изучения эффектов, вызванных применением дополнительных физических факторов, нами была проведена экспериментальная оценка интенсифицирующих факторов экстрагирования каротиноидов из отходов томатного производства.

Для проведения исследований влияния ультразвука на выход экстрактивных веществ, при совместной с давлением обработке использовалось ультразвуковое устройство, в состав которого входят: ультразвуковой излучатель; электронный блок, ультразвуковой генератор с усилителем мощности и блоком питания; автотрансформатор. Диапазон изменения частоты генератора от 10 до 50 кГц, диапазон электрической резонансной частоты излучателя 10÷30 кГц, электрическая мощность генератора 400 Вт, мощность излучателя 120 Вт. Резонансная частота определялась по форме тока усилителя мощности при помощи осциллографа. О выходе экстрактивных веществ судили на основании того, что оптическая плотность является аддитивной величиной и, согласно закону Бугера-Ламберта-Бера, пропорциональна концентрации извлекаемого растворенного вещества. Каждый образец был измерен два раза, и их среднее значение использовали в качестве данных этого образца в следующем процессе вычисления.

Соотношение агрегаты томатного жмыха (масса, г) к количеству растворителя (объем, мл), такое как 1:11 и 1:23 (или 1:10 и 1:20 в массовом соотношении). Затем экстракты, полученные в результате обработки: 1,2,3 - давление атмосферное, время 30 мин. (контроль), температура 20, 30 и 40°C соответственно; 4, 5, 6 - обработанные давлением 30, 60 и 100 МПа, время экспозиции 30 мин, температура 20, 30 и 40°C соответственно; 7, 8, 9 – образцы, обработанные ультразвуком (мощность – 10, 20, 40 Вт, частота излучения - 25 кГц и продолжительность облучения 100 секунд, температура 20, 30 и 40°C соответственно, три цикла каждые 10 мин.) при 0,1 МПа (атмосферное давление) и образцы 10, 11, 12 прошедшие комплексную обработку при давлении 30, 60 и 100 МПа, время экспозиции 30 мин, температура 20, 30 и 40°C соответственно, озвучивание - (мощность – 10, 20, 40 Вт, частота излучения - 25 кГц и продолжительность облучения 100 секунд, три цикла каждые 10 мин.) температура 20, 30 и 40°C соответственно. Образец 13 – температура 40°C, давление - 100 МПа, озвучивание - мощность 40 Вт, частота излучения - 35 кГц и продолжительность облучения 100 секунд, три цикла каждые 10 мин.

В результате проведенных экспериментов получены данные по относительному содержанию каротиноидов во всех образцах (табл. 5). Извлечение каротиноидов увеличивалось с ростом температуры, увеличением мощности ультразвука и увеличением давления. С увеличением частоты ультразвука извлечение каротиноидов уменьшилось, вероятно, из-за более быстрого затухания энергии на более высокой частоте.

Анализ экспериментальных данных показал, что увеличение давления при экстрагировании увеличивает выход целевого компонента в среднем на 23%, увеличение мощности ультразвукового озвучивания приводит к увеличению выхода целевого компонента в среднем на 3,5% , увеличение же частоты с 20 кГц до 30 кГц наоборот, снижает выход экстрактивных веществ. Комбинирование высокого давления с ультразвуковой обработкой

показало наиболее высокие результаты, увеличив выход целевых компонентов по сравнению с традиционным экстрагированием на 38%. Эти улучшения могут быть в основном связаны с комбинацией механических и тепловых эффектов высокого давления и ультразвука. Основное преимущество комбинированного воздействия связано с сокращением времени экстракции, и его можно проводить при более низкой температуре и при сравнительно невысоких давлениях, что позволяет избежать разложения термически нестабильных ингредиентов в растительном материале и значительно снизить металлоёмкость экстракционного оборудования.

Таблица 5 - Результаты экспериментальных исследований по оценке интенсифицирующих экстрагирование факторов

Давление внешней среды, время экстрагирования 30 мин					
Давление P, МПа	температура T, °C	Мощность УЗ W, Вт	Концентрация C, отн. ед	Время озвучивания τ, сек.	Частота f, кГц
1	2	3	4	5	6
0,1	20	-	0,26	-	-
0,1	30	-	0,278	-	-
0,1	40	-	0,312	-	-
ультразвук, время экстрагирования 30 мин, число импульсов 1/10 мин					
0,1	20	10	0,2618	100	25
0,1	30	10	0,2804	100	25
0,1	40	10	0,322	100	25
0,1	20	20	0,2674	100	25
0,1	30	20	0,2814	100	25
0,1	40	20	0,328	100	25
0,1	20	40	0,2674	100	25
0,1	30	40	0,2814	100	25
0,1	40	40	0,328	100	25
Обработка давлением					
30	20	-	0,32	-	-
60	30	-	0,346	-	-
100	40	-	0,383	-	-
Давление + ультразвук					
30	20	10	0,326	100	25
60	30	10	0,351	100	25
100	40	10	0,396	100	25
30	20	20	0,328	100	25
60	30	20	0,3529	100	25
100	40	20	0,399	100	25

1	2	3	4	5	6
30	20	40	0,3289	100	25
60	30	40	0,385	100	25
100	40	40	0,401	100	25
30	20	40	0,321	100	35
60	30	40	0,381	100	35
100	40	40	0,389	100	35

В шестом разделе «Практическая реализация результатов исследований» приведены разработанные аппаратурно-технологические схемы линий по получению каротиноидов из отходов томатного производства. На рисунке 14 представлены схемы экстрагирования каротиноидов из отходов томатного производства (а) - с использованием ВД, (б) – с использованием субкритической воды.

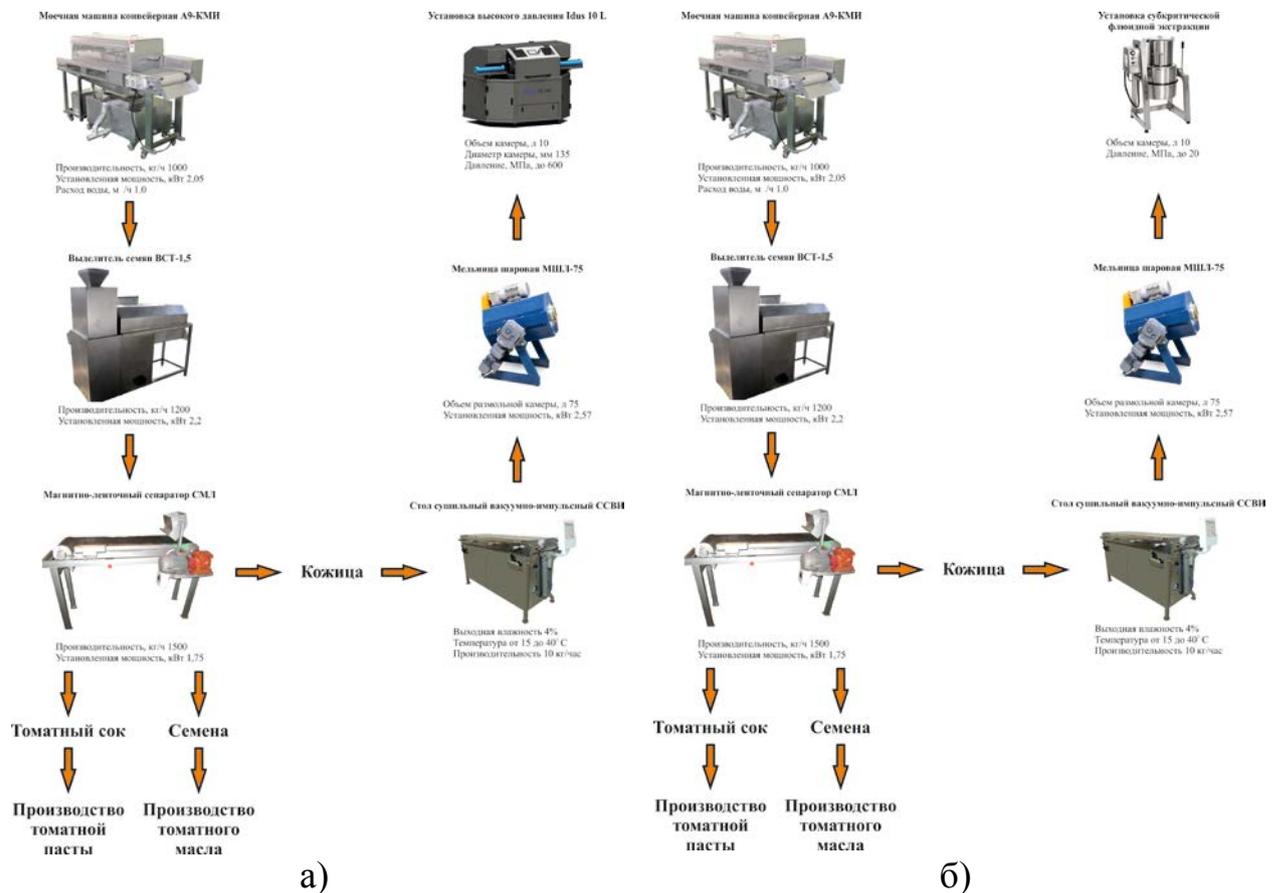


Рисунок 14 - Аппаратурно-технологические схемы экстрагирования каротиноидов из отходов томатного производства с использованием ВД (а) и субкритической воды (б).

## Выводы

1. Проведенные исследования показали, что инновационные методы СКВЭ и ЭВД имеют существенные преимущества перед традиционными способами

экстрагирования в плане увеличения скорости и глубины извлечения каротиноидов из отходов томатного производства, что является решением проблемы рационального использования первичных сырьевых ресурсов, комплексной переработки и безопасной утилизации вторичных сырьевых ресурсов.

2. Впервые с помощью автоматизированной системы анализа микроизображений разработан и запатентован экономически выгодный экспресс-метод определения содержания каротиноидов в плодах томата.
3. Впервые экспериментально определено, что широкая составная полоса поглощения в диапазоне длин волн от 350 до 650 нм является суперпозицией полос поглощения отдельных каротиноидных пигментов, входящих в состав экстрактов, а площадь под спектральными кривыми представляет собой величину, прямо пропорциональную толщине слоя и суммарной концентрации каротиноидов. Полученные экспериментальные зависимости позволяют с высокой степенью вероятности определить относительное содержание каротиноидов в экстрактах из отходов томатного производства. На основании этого разработан экспериментальный метод для определения относительного содержания каротиноидов как в исходном сырье, так и в полученных экстрактах.
4. Разработано методико-аппаратурное обеспечение эксперимента по обработке отходов томатов субкритической водой для получения водного экстракта, включающее в себя подготовку образцов и экстрагирование на лабораторной установке субкритической водой с широким диапазоном варьирования температуры, давления и времени выдержки.
5. Экспериментально показано, что применение субкритической воды в технологиях экстрагирования увеличивает содержание каротиноидов в экстракте на порядок, позволяя получать водные растворы неполярных веществ, к которым относится ликопин.
6. Экспериментально определено влияние параметров процесса (диапазон рабочего давления от 150 до 300 МПа и время экспозиции от 3 до 20 мин) на выход каротиноидов при ЭВД. Впервые показано, что при повышении давления от 300 до 900 МПа при ЭВД существенного прироста выхода целевых компонентов не наблюдается. Выход на «плато» происходит, в среднем, при времени экспозиции от 10 до 20 мин для всех рассмотренных значений давления.
7. Разработана двухфазная математическая модель кинетики извлечения каротиноидов при ЭВД. Численно определены значения коэффициентов массообмена, а также выход каротиноидов при равновесной концентрации двух фаз.
8. На основании экспериментальных исследований и анализа уравнения переноса импульса установлено, что принудительная и естественная конвекция влияют на процесс ЭВД, что дает возможность интенсифицировать его за счет применения дополнительных факторов, способных вызвать принудительную конвекцию (ультразвук и температура).

9. Разработаны аппаратурно-технологические схемы для реализации процесса переработки отходов томатного производства при помощи СКВЭ и ЭВД.

Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, используются в учебном процессе при изложении дисциплины «Реология пищевых масс». Использование в учебном процессе результатов данной диссертационной работы является целесообразным для повышения уровня подготовки студентов в направлении более углубленного овладения материалом.

### **Перечень работ, опубликованных по материалам диссертации**

#### ***Статьи в научных изданиях:***

1. Катанаева, Ю.А. Методика, технология и аппаратурное обеспечение исследования процесса производства каротиноидов с использованием сверхкритических флюидов / Катанаева Ю.А. // Сб. науч. трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 105-летию со дня рождения А. Н. Плановского (8-9 сентября 2016 года). – М.: ФГБОУ ВО МГУДТ, 2016. – Т. 1. – С. 384-389.

2. Соколов, С.А. Математическое моделирование процесса магнитной сепарации пищевого сырья / Соколов С.А., Катанаева Ю.А. // Сборник материалов XII Международной научно-практической конференции. [Электронный ресурс]. – М.: Издательство «Олимп», 2016. – С.508-513.

3. Соколов, С.А. Экспериментальная отработка технологических режимов предварительной подготовки сырья для экстрагирования каротиноидов из бросовой выжимки зрелых томатов / Соколов С.А., Катанаева Ю.А., Корнийчук В.Г., Севаторов Н.Н. // матер. II Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж. гос. ун-т инж. технолог. – Воронеж: ВГУИТ, 2016. – С. 260-264.

4. Соколов, С.А. Разработка экспресс-метода определения относительного содержания каротиноидов в плодах томата / Соколов С.А., Катанаева Ю.А., Севаторов Н.Н., Забродский В.В., Дроботько В.Ф. // Оборудование и технологии пищевых производств: темат. сб. науч. трудов. – Донецк: ГО ВПО «ДонНУЭТ», 2017. – Вып. 1(34). – С.30-37.

5. Соколов, С.А. Разработка математической модели процесса экстрагирования каротиноидов субкритической водой / Соколов С.А., Катанаева Ю.А., Петрова Ю.Н., Севаторов Н.Н. // Оборудование и технологии пищевых производств: темат. сб. науч. трудов. – Донецк: ГО ВПО «ДонНУЭТ», 2017. – Вып. 2(35). – С.91-98.

6. Володин, Н.А. Идентифицируемость параметра – функции в параболическом уравнении по квадратичному критерию качества / Володин Н.А., Соколов С.А., Катанаева Ю.А., Петрова Ю.Н. // Оборудование и технологии пищевых производств: темат. сб. науч. трудов. – Донецк: ГО ВПО «ДонНУЭТ», 2018. – Вып. 6(39). – С.37-46.

7. Соколов, С.А. Адаптация метода абсорбционной спектрофотометрии для определения содержания каротиноидов в плодах томата и продуктах его переработки / Соколов С.А., Катанаева Ю.А. // Материалы междунар.

Науч.-практ. конф., посвященной 25-летию факультета технологии и товароведения / Воронеж. гос. аграр. ун-та имени императора Петра I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2018. – Ч. II. – С. 71-77.

8. **Катанаева, Ю.А.** Интенсификация экстрагирования целевых компонентов из отходов томатного производства комбинированной обработкой высоким давлением и ультразвуком / **Катанаева Ю.А.**, Севаторов Н.Н., Декань А.А. // материалы II-й Всероссийской науч.-практ. конф. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2019. – С. 478-484.

9. **Катанаева, Ю.А.** Разработка методики и техническая реализация измерения температуры в камерах высокого давления с целью создания базы данных для построения моделей теплопереноса / **Катанаева Ю.А.**, Декань А.А., Соколов С.А., Павлова Ю.И. // Вестник КМГТУ: науч. журнал – Керчь: ФГБОУ ВО «КГМТУ», 2019. – Вып.4. – С.140-151.

10. Соколов, С.А. Разработка экспериментального комплекса для исследований процесса экстрагирования высоким давлением / Соколов С.А., Головинов В.П., **Катанаева Ю.А.**, Дейнека И.Г. // Инновационные технологии в науке и образовании («ИТНО-2019»): сб. трудов. – Ростов-на-Дону: ДГТУ-Принт, 2019. – С. 145-150.

11. Соколов, С.А. Обзор современных технологий извлечения компонентов с высокой добавленной стоимостью из отходов пищевой промышленности / Соколов С.А., **Катанаева Ю.А.** // Вестник КМГТУ: науч. журнал – Керчь: ФГБОУ ВО «КГМТУ», 2020. – Вып.1. – С.123-139.

12. **Катанаева, Ю.А.** Обзор технологий получения каротиноидов из растительных отходов, промышленных и послеуборочных материалов / **Катанаева Ю.А.**, Соколов С.А., Севаторов Н.Н. // Вестник КМГТУ: науч. журнал – Керчь: ФГБОУ ВО «КГМТУ», 2020. – Вып.2. – С.144-163.

13. **Катанаева, Ю.А.** Экстрагирование каротиноидов из отходов томатного производства с применением высокого давления / **Катанаева Ю.А.** // Оборудование и технологии пищевых производств: темат. сб. науч. трудов – Донецк: ГО ВПО «ДонНУЭТ», 2020. – Вып. 10(43). – С. 46-54.

14. Sergey, Sokolov. The effectiveness evaluation of the carotenoids extraction from the tomatoes by means of absorption spectrophotometry method / Sergey Sokolov, Innesa Deyneka, **Yuliya Katanaeva**, Natia Ugrehelidze, Elena Yatskova and Natalia Kulikova // [E3S Web of Conferences](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017501011) 175(2):01011. – January, 2020. DOI: [10.1051/e3sconf/202017501011](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017501011)

***Материалы научно-практических конференций:***

15. Соколов, С.А. Разработка лабораторной установки для экстрагирования сверхкритической водой / Соколов С.А., **Катанаева Ю.А.** // Техника и технология пищевых производств : тез. докл. X Междунар. науч. конф. студентов и аспирантов, 28–29 апреля 2016 г. – Могилев: УО «МГУП», 2016. – С.258.

16. **Катанаева, Ю.А.** Экспериментальная оценка относительного содержания каротиноидов в плодах томата методом абсорбционной спектрофотометрии / **Катанаева Ю.А.**, Соколов С.А. // Техника и технология

пищевых производств сб. тезисов студ. научн. пр. (техническая серия). – Донецк: ГО ВПО «ДонНУЭТ», 2017. – Вып. 11. – С. 65-67.

17. Киселёв, П.Е. Прогнозирование предела выносливости упрочнённых деталей с учётом эксплуатационных факторов / Киселёв П.Е., Денискина Е.А., **Катанаева Ю.А.** // Междунар. молодёжная науч. конф. "XIV Королёвские чтения", посвящённая 110-летию со дня рождения академика С.П. Королёва, 75-летию КуАИСГАУ-СамГУ-Самарского университета и 60-летию со дня запуска первого искусственного спутника Земли: сб. трудов 3-5 октября 2017 года. – Самара: Издательство Самарского университета, 2017. – В 2 т. Т.1. – С. 110-111.

18. Соколов, С.А. Экстракция каротиноидов из растительного сырья субкритической водой / Соколов С.А., **Катанаева Ю.А.**, Хомутова Е.В. // Донецкие чтения 2019: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы IV Междунар. науч. конф. (Донецк, 31 октября 2019 г.). – Донецк: Изд-во ДонНУ, 2019. – Т. 2. – С. 423.

19. Соколов, С.А. Современные принципы получения компонентов с высокой добавленной стоимостью из отходов томатного производства / Соколов С.А., Севаторов Н.Н., **Катанаева Ю.А.** // «Инновационные направления интеграции науки, образования и производства» Керчь, 14-17 мая 2020 г. Сб. тезисов докладов участников I Междунар. науч.-практ. конф. «Инновационные направления интеграции науки, образования и производства» [Электронный ресурс]: Сборник тезисов / под общ.ред. Масюткина Е. П. – Керчь: ФГБОУ ВО «КГМТУ», 2020. – С.200-203. – Режим доступа: [http://www.kgmtu.ru/documents/nauka/Sbornik\\_Tezisov\\_May\\_Kerch.pdf](http://www.kgmtu.ru/documents/nauka/Sbornik_Tezisov_May_Kerch.pdf). – Загл. с экрана. Текст: электронный.

20. Павлов, В.Ф. Исследование влияния размеров поперечного сечения поверхностно упрочнённых деталей на предел выносливости / Павлов В.Ф., Вакулук В.С., Петрова Ю.Н., **Катанаева Ю.А.** // Сборник тезисов докладов участников пула науч.-практ. конф. 23-27 января 2020 г. – г.Сочи, 2020. – С.181-183.

#### **Патенты:**

21. Пат. 41762 Україна, МПК В03С 1/08. Магнітно-стрічковий сепаратор / О.І.Баришев, **Ю.О.Катанаєва**; заявник і власник Донецьк. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – № u200814215 заявл. 10.12.2008; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 11. – 4 с. : іл.

22. Пат. 117916 Україна, МПК (2017.01) G01N 33/02, G01N 21/00, G01N 21/25, G01J 3/46. Експрес-метод визначення вмісту каратеноїдів у плодах томату / Гура О.А., Соколов С.А., Севаторов М.М., Декань О.О., **Катанаєва Ю.О.**, Букіна Я.Г.; заявник і власник Гура О.А., Соколов С.А., Севаторов М.М., Декань О.О., **Катанаєва Ю.О.**, Букіна Я.Г. – № u 201701431 ; заявл. 15.02.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. №13. – 3 с.

#### **Монографія:**

23. Соколов, С.А. Суб- и сверхкритическая экстракция в пищевой и перерабатывающей промышленности: состояние проблемы / Соколов С.А., Петрова Ю.Н., **Катанаева Ю.А.** // Харьков: Изд-во «НТМТ», 2017. – 208 с.

*В работах 1, 3 соискателем разработаны методики исследования процесса и технологические режимы производства каротиноидов. В работе 2 соискателем разработана математическая модель процесса магнитной сепарации. В работах 4, 7, 14, 16 соискатель применил метод абсорбционной спектрофотометрии для определения относительного содержания каротиноидов в плодах томата. В работах 5, 6 соискателем разработана математическая модель экстрагирования экстрактивных веществ из отходов томатного производства. В работах 8-10, 13 соискателем проведена серия предварительных экспериментов, проведены теоретические исследования по использованию высокого давления для экстрагирования каротиноидов из отходов томатного производства. В работах 11, 12, 19 соискателем проведен литературный поиск и определены методы извлечения экстрактивных веществ. В работах 15, 17, 20 соискателем проведено прогнозирование упрочненных деталей на предел выносливости. В работе 18 соискателем проведен цикл экспериментальных исследований процесса экстрагирования каротиноидов субкритической водой.*

*В патентах 21, 22 соискателем лично сформулирована формула изобретения и выполнена подготовка описания к декларационному патенту на полезную модель.*

*Во всех работах автор принимал участие в подготовке материалов к публикациям.*

## **АННОТАЦИЯ**

**Катанаева Ю.А. Повышение эффективности процесса извлечения экстрактивных веществ из отходов томатного производства. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств.

ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского» Министерства образования и науки ДНР, Донецк, 2020.

Диссертационная работа посвящена актуальному вопросу – разработке процессов и технологии ресурсосберегающей переработки отходов томатного производства в компоненты с большой добавленной стоимостью. Эти отходы являются не только ценным кормовым продуктом, но, как правило, содержат в себе недоиспользуемые соединения, представляющие большой интерес для последующего использования при производстве функциональных продуктов питания или в качестве адъювантов в лекарственных и фармацевтических препаратах. Показано, что инновационные методы СКВЭ и ЭВД имеют существенные преимущества перед традиционными способами экстрагирования в плане увеличения скорости и глубины извлечения каротиноидов из отходов томатного производства, что является решением проблемы рационального использования первичных сырьевых ресурсов, комплексной переработки и безопасной утилизации вторичных сырьевых ресурсов. С помощью автоматизированной системы анализа микроизображений разработан и

запатентован экономически выгодный экспресс-метод определения содержания каротиноидов в плодах томата. Адаптированы возможности абсорбционной спектрофотометрии для определения относительного содержания каротиноидов. Полученные экспериментальные зависимости позволяют с высокой степенью вероятности определить относительное содержание каротиноидов в экстрактах из отходов томатного производства. Доказано, что применение субкритической воды в технологиях экстрагирования увеличивает содержание каротиноидов в экстракте на порядок, позволяя получать водные растворы неполярных веществ, к которым относится ликопин. Определено влияние параметров процесса экстрагирования высоким давлением на выход каротиноидов. Разработана двухфазная математическая модель кинетики извлечения каротиноидов при ЭВД. Численно определены значения коэффициентов массообмена, а также выход каротиноидов при равновесной концентрации двух фаз. На основании экспериментальных исследований и анализа уравнения переноса импульса установлено, что принудительная и естественная конвекция влияют на процесс ЭВД, что дает возможность интенсифицировать его за счет применения дополнительных факторов, способных вызвать принудительную конвекцию (ультразвук и температура). Разработаны аппаратурно-технологические схемы для реализации процесса переработки отходов томатного производства при помощи СКВЭ и ЭВД.

#### ANNOTATION

**Y. A. Katanaeva Increasing the efficiency of the process of extracting extractive substances from the waste of tomato production. - Manuscript.**

The dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.18.12 - Processes and apparatuses of food production.

"Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky" of the Ministry of Education and Science of the DPR, Donetsk, 2020.

The dissertation is devoted to an urgent issue - the development of processes and technologies for resource-saving processing of waste from tomato production into components with high added value. This waste is not only a valuable feed product, but, as a rule, contains underutilized compounds that are of great interest for subsequent use in the production of functional foods or as adjuvants in drugs and pharmaceuticals. It is shown that innovative methods of SWE and HPE have significant advantages over traditional methods of extraction in terms of increasing the rate and depth of extraction of carotenoids from tomato waste, which is a solution to the problem of rational use of primary raw materials, complex processing and safe disposal of secondary raw materials. With the help of an automated microimage analysis system, a cost-effective express method for determining the content of carotenoids in tomato fruits has been developed and patented. The capabilities of absorption spectrophotometry have been adapted to determine the relative content of carotenoids. The obtained experimental dependences make it possible with a high degree of probability to determine the

relative content of carotenoids in extracts from waste raw materials of tomato production. It has been proven that the use of subcritical water in extraction technologies increases the content of carotenoids in the extract by an order of magnitude, making it possible to obtain aqueous solutions of non-polar substances, which include lycopene. The influence of the parameters of the high pressure extraction process on the yield of carotenoids was determined. A two-phase mathematical model of the kinetics of the extraction of carotenoids during HPE has been developed. The values of the mass transfer coefficients, as well as the yield of carotenoids at the equilibrium concentration of the two phases, are numerically determined. Based on experimental studies and analysis of the momentum transfer equation, it has been established that forced and natural convection affect the HPE process, which makes it possible to intensify it through the use of additional factors that can cause forced convection (ultrasound and temperature). Instrumental and technological schemes have been developed for the implementation of the process of processing waste from tomato production using SWE and HPE.

«Подписано в печать 23.10.2020. Формат 60x84x1/16.

Усл. печ. л. 2,0. Печать лазерная. Заказ № \_\_\_\_\_. Тираж 100 экз. Отпечатано в ООО «Цифровая типография» на цифровых издательских комплексах Rank Xerox DocuTech 135 и DocuColor 2060.  
83003, г. Донецк, ул. Артема, 181,  
тел. (062) 348-01-79, <http://cifra.donetsk.ua> »