

МУРАТХАН МАРАТ
Разработка биоразлагаемого пленочного материала на основе
крахмала для продления сроков хранения пищевых продуктов

К диссертационной работе на соискание степени доктора философии (PhD)
по специальности 8D07202 – «Безопасность пищевых продуктов»

АННОТАЦИЯ

Данная диссертационная работа посвящена разработке съедобного, биоразлагаемого и обладающего антибактериальными свойствами пленочного материала на основе крахмала, предназначенного для продления сроков хранения пищевых продуктов. В ходе исследования проведено комплексное изучение физико-химических, морфологических и структурных свойств природных источников крахмала, выращиваемых в Казахстане (пшеница, картофель, кукуруза, рис, горох и маниок), и оценена их пригодность для использования в качестве биополимерного упаковочного материала. На основе модифицированного крахмала, хитозана и глицерина были изготовлены образцы съедобных пленок, обладающих антибактериальной и антиоксидантной активностью; исследованы их физические, механические, барьерные и микробиологические свойства.

Актуальность исследования.

Современная экологическая ситуация и проблемы продовольственной безопасности усиливают необходимость разработки биополимерных упаковочных материалов. Ежегодно в мире производится более 400 млн тонн пластмасс, из которых 30–40 % составляют одноразовые упаковочные изделия. Около 90 % таких отходов не перерабатываются и сохраняются в окружающей среде сотни лет. Микрочастицы пластика, попадая в организм человека с пищей, водой и воздухом, способствуют развитию хронических заболеваний (эндокринных, нервных и пищеварительных расстройств).

В Концепции развития агропромышленного комплекса Республики Казахстан на 2021–2030 годы и в Посланиях Президента К.К. Токаева обозначены стратегические приоритеты – обеспечение продовольственной безопасности, развитие глубокой переработки и поддержка экологически чистых производств. В этой связи создание экологически безопасных упаковочных материалов, сохраняющих качество продуктов, является актуальной задачей, полностью соответствующей курсу на интеграцию науки и производства.

Международные стандарты (Регламент ЕС № 1935/2004, ТР ТС 021/2011, ISO, ГОСТ) предъявляют строгие требования к материалам, контактирующим с пищей: допустимые уровни миграции, отсутствие токсичных остатков, микробиологическая безопасность и полная биоразлагаемость. Разработка съедобной пленки, препятствующей росту бактерий и пригодной для непосредственного контакта с продуктами, является научно и практически значимым направлением на стыке пищевой безопасности и экологической устойчивости.

Цель исследования – разработка съедобного биоразлагаемого пленочного материала с антибактериальными свойствами на основе

модифицированных крахмалов, полностью соответствующего стандартам безопасности для контакта с пищевыми продуктами, и комплексное исследование его свойств.

Основные задачи исследования:

1. Провести сравнительный анализ физико-химических и морфологических свойств крахмалов, полученных из различных сельскохозяйственных культур Казахстана (пшеница, картофель, горох, рис, кукуруза, кассава), с целью выявления наиболее подходящих источников для получения биополимерных пленок.

2. Изучить эффективность физического метода сухой тепловой модификации крахмала для улучшения его структурных свойств и пригодности к формированию пленкообразующих композиций.

3. Разработать рецептуру и технологию получения съедобной пленки с антибактериальными свойствами путем введения природных функциональных добавок, подавляющих рост патогенной микрофлоры и продлевающих сроки хранения продуктов.

4. Исследовать физико-химические, структурно-механические и микробиологические свойства полученных пленок, оценить их пригодность для непосредственного применения в пищевой промышленности.

5. Комплексно оценить пищевую безопасность съедобных пленок на основе принципов НАССР: определить общую и специфическую миграцию, остаточные количества тяжелых металлов и пестицидов, микробиологическую чистоту и токсичность для подтверждения их безопасности для здоровья человека.

6. Разработать нормативно-техническую документацию (стандарт организации и технологическую инструкцию) на съедобную антибактериальную пленку в соответствии с требованиями ТР ТС 021/2011 и провести производственные испытания.

Объекты исследования.

Крахмалы из пшеницы, картофеля, кукурузы, риса, гороха и кассавы, выращенных в различных регионах Казахстана. Для улучшения структуры крахмалов применен экологически безопасный метод сухой тепловой модификации. На их основе получены биоразлагаемые съедобные пленки с добавлением хитозана и глицерина. Антибактериальная активность оценивалась на модельных микроорганизмах *E. coli* и *S. aureus*. Безопасность определялась по миграции в пищевые симуляторы, содержанию тяжелых металлов и пестицидов. Оценивалось влияние пленок на сроки хранения вареного и сырого мяса и рыбы.

Методы исследования.

Физико-химические свойства (влажность, зола, белок, прозрачность, набухание, температура клейстеризации) определялись по стандартным методикам (ААСС, ISO 6869, ISO 6491). Структурные и морфологические исследования проводились методами FT-IR, SEM, XRD, AFM. Механические и барьерные характеристики определялись по ASTM E96 и ГОСТ 12302. Антибактериальная активность определялась по отношению к *E. coli* и *S. aureus*, пищевая безопасность — в соответствии с ТР ТС 029/2012.

Научная новизна.

Впервые проведено сравнительное исследование физико-химических, морфологических и минеральных характеристик крахмалов кукурузы и кассавы

и показана их высокая пригодность для формирования пленкообразующих систем. Установлены закономерности изменения структуры и функциональных свойств крахмалов под действием сухой тепловой модификации, доказано повышение их термостойкости, растворимости и способности образовывать пленку. Разработана технология получения съедобной антибактериальной пленки на основе модифицированных крахмалов кукурузы и кассавы с улучшенными механическими и барьерными свойствами. Экспериментально подтверждена пищевая безопасность полученных пленок и их полное соответствие национальным и международным стандартам.

Положения, выносимые на защиту:

- Сравнительный анализ природных источников крахмала Казахстана (пшеница, картофель, горох, рис, кукуруза, кассава) выявил их различия по физико-химическим и морфологическим характеристикам и определил пригодность к модификации и пленкообразованию.

- Эффективность метода сухой тепловой модификации крахмала доказана улучшением его структурных и функциональных свойств, что обеспечивает получение биоразлагаемых пленок.

- Пленки на основе модифицированного крахмала обладают выраженной антибактериальной активностью против *E. coli* и *S. aureus* и удовлетворительными механическими и барьерными характеристиками.

- Разработана технология съедобной антибактериальной пленки на основе термомодифицированных крахмалов кассавы и кукурузы с улучшенными структурно-технологическими свойствами, антиоксидантной активностью и выраженным антимикробным эффектом.

Практическая значимость.

Полученные научные результаты позволили создать новое поколение съедобных биоразлагаемых пленок, пригодных для упаковки полуфабрикатов (стейки, филе рыбы и т.п.), эффективно подавляющих рост микроорганизмов и продлевающих сроки хранения продуктов. Пленка является полностью безопасной для человека, биоразлагаемой в природных условиях и отвечает принципам устойчивого развития. Её можно использовать не только как упаковочный материал, но и для термической обработки продукта непосредственно в упаковке, сохраняя его органолептические свойства.

Разработанные решения пригодны для промышленного внедрения на предприятиях по производству экологически безопасных упаковочных материалов. Результаты исследования могут быть использованы в учебном процессе вузов, научных проектах и инновационных программах.

Технология съедобной антибактериальной пленки прошла производственные испытания на базе ТОО «KazEcoSoil». Разработана и утверждена нормативно-техническая документация – СТ ТОО 210940019323-001-2024 (стандарт организации и технологическая инструкция). Техническая новизна подтверждена патентом Республики Казахстан № 7307 на полезную модель.

Личный вклад автора.

Автор самостоятельно провел теоретические и экспериментальные исследования, обработку данных, научно-производственные испытания, подготовку нормативных документов и внедрение результатов.

Апробация работы.

Результаты исследования представлены на:

- Форуме молодежных научно-технических инноваций ШОС «Сотрудничество в области снижения бедности и развития сельских территорий» (г. Сиань, КНР, 2022 г.);
- Международной конференции «Сейфуллинские чтения-21: Органическое и регенеративное сельское хозяйство – глобальные вызовы и локальные решения» (КАТИУ им. С. Сейфуллина, 2025 г.).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, в том числе 2 статьи в журналах, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества МОН РК, 16 статей в журналах, входящих в базы Web of Science и Scopus (с ненулевым импакт-фактором), 2 статьи в материалах международных конференций и 1 патент РК на полезную модель.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из содержания, введения, аналитического обзора литературы, методов исследования, результатов, их обсуждения, заключения и приложений. Работа изложена на 179 страницах машинописного текста, содержит 34 таблицы, 31 рисунок и 14 формул. Список литературы включает 131 источник.

Оценка полноты решения поставленных задач.

Результаты исследований полностью соответствуют поставленной цели и задачам:

1. Определены физико-химические параметры крахмалов (соотношение амилозы/амилопектина – 17,9–28,6 %, прозрачность – 54–90 %, влаго- и жиропоглощение – 0,65–0,84 и 0,59–0,76 г/г). Крахмалы кассавы и картофеля показали высокую прозрачность (88–90 %) и наилучшие пленкообразующие свойства. SEM-анализ выявил овальную форму и гладкую поверхность гранул кассавы.

2. При сухой тепловой модификации (168 °C, 18 ч) установлены изменения структурных, термических (DSC, TGA), молекулярных (RVA, Mw) и морфологических (SEM, XRD) характеристик крахмалов; доказано повышение прочности и барьерных свойств пленок.

3. Разработана оптимальная рецептура пленки (крахмал 5 %, время клейстеризации 28,2 мин, глицерин 2,8 %, хитозан 1,4 %), обеспечивающая сбалансированные свойства. Определена антиоксидантная активность (DPPH – 26,6 %, ABTS – 22,8 %) и антибактериальное действие (E. coli – 47 %, S. aureus – 42 %).

4. Морфология по CLSM и AFM показала плотную и однородную структуру поверхности. Прозрачность пленок – 88–90 %, прочность на разрыв – $14,2 \pm 0,5$ МПа, удлинение – $31,6 \pm 2,4$ %, коэффициент паропроницаемости – $3,8 \times 10^{-10}$ г·м⁻¹·с⁻¹·Па⁻¹. Упаковка мяса и рыбы снизила микробную контаминацию на 1,3–2,2 лог ед., потери массы – на 6–8 %, сохранила цвет и внешний вид; срок хранения увеличился в среднем на 36 часов.

5. Показатели миграции соответствуют ТР ТС 021/2011 и 029/2012: 1,87 мг/дм² (10 % этанол), 2,13 мг/дм² (3 % уксус), 2,92 мг/дм² (50 % этанол). Содержание тяжёлых металлов – Pb 0,021 мг/кг, Cd 0,004 мг/кг, Hg не обнаружен. Микробиологические показатели: ОБК $3,1 \times 10^2$ КОЕ/г, дрожжи и плесени $8,5 \times 10^1$ КОЕ/г, E. coli, S. aureus, Salmonella, L. monocytogenes не выявлены.

Радиоактивность – Cs-137 3,4 Бк/кг, Sr-90 2,7 Бк/кг; токсичность в тесте на *Daphnia magna* – 0 % гибели. Пленки признаны безопасными и соответствующими принципам НАССР.

6. Технология апробирована в ТОО «KazEcoSoil». Разработаны и утверждены нормативно-технические документы СТ ТОО 210940019323-001-2024 и технологическая инструкция. Пленка готова к промышленному внедрению и полностью соответствует требованиям пищевой безопасности.