

ISSN 2073-3569

ХЛЕБОПЕЧЕНИЕ РОССИИ

BAKERY OF RUSSIA

2025

№ 1-2

Главный редактор журнала

Битус Евгений Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной механики и инжиниринга технических систем, Российский биотехнологический университет, Москва, Россия.

Заместитель главного редактора

Омельченко Олег Михайлович – кандидат экономических наук, доцент, директор центра коммерциализации и трансфера технологий, Российский биотехнологический университет, Почётный Пекарь России, Москва, Россия.

Выпускающий редактор

Забайкин Юрий Васильевич – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва, Россия.

Редакционная коллегия

Алехина Надежда Николаевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Белявская Ирина Георгиевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры зерна, хлебопекарных и кондитерских технологий, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия.

Березина Наталья Александровна – доктор технических наук, доцент, проректор по цифровизации, научной и инновационной деятельности, Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина, Орел, Россия.

Ильина Ольга Александровна – доктор технических наук, профессор, ректор, Международная промышленная академия, Москва, Россия.

Жаркова Ирина Михайловна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Жиров Михаил Вениаминович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной автоматики, Московский государственный университет технологий и управления им К.Г. Разумовского, Москва, Россия.

Казарцев Дмитрий Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии виноделия, бродильных производств и химии им. Г.Г. Агабальянца, Московский государственный университет технологий и управления им К.Г. Разумовского, Москва, Россия.

Краснов Андрей Евгеньевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии», Московский государственный университет технологий и управления им К.Г. Разумовского, Москва, Россия.

Краус Сергей Викторович – доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «Ирек», вице-президент Российского союза пекарей, председатель правления Союза производителей пищевых ингредиентов, председатель рабочей группы по аграрной и пищевой промышленности при Российско-Германской внешнеторговой палате, Барнаул, Россия.

Магомедов Газибег Омарович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Макаров Сергей Васильевич – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии пищевых продуктов и биотехнологии, Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия.

Налиухин Алексей Николаевич – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, профессор кафедры агрономической, биологической химии и радиологии, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия.

Никитин Игорь Алексеевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой пищевых технологий и биоинженерии, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия.

Пономарева Елена Ивановна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Росляков Юрий Федорович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры пищевой инженерии, Кубанский государственный технический университет, Краснодар, Россия.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ И ПРОИЗВОДСТВО

Анна Андреевна Петрова, Олеся Владимировна Салищева, Владимир Петрович Юстратов, Тимофей Альбертович Ларичев
Антимикробная активность сквалена и CO₂-экстрактов семян амаранта 10

Артем Дмитриевич Безруков, Татьяна Ивановна Чалых
Характеристика и сравнение полимерных систем в производстве упаковки мясных изделий 21

ИНФОРМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

Эньдо Ся, Хуньянь Хэ, Линьда Фань, Ифань Сюй
Применение поведенческих профилей и детектирования команд на основе DPI для защиты от несанкционированных изменений параметров НКУ на пищевых производствах 37

Василий Юрьевич Дурманов, Екатерина Леонидовна Чепурина
Создание гибридных систем анализа гиперспектральных данных и RGB-изображений для ранней диагностики у зерновых культур 47

МАРКЕТИНГ И ФИНАНСЫ

Марина Магомедовна Шайлиева, Юлия Николаевна Нестеренко, Виктор Макарович Заернюк
Экономико-математическое моделирование и прогнозирование эффективности использования производственных ресурсов хлебопекарного предприятия 58

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Олег Михайлович Омельченко
Радиационная обработка хлебобулочных изделий: решение проблемы снабжения удалённых районов свежими продуктами 68

CONTENTS

TECHNOLOGY AND PRODUCTION

- Anna A. Petrova, Olesya V. Salishcheva, Vladimir P. Yustratov, Timofey A. Larichev
Antimicrobial activity of squalene and CO₂ extracts of amaranth seeds 10
- Artyom D. Bezrukov, Tatiana I. Chalykh
Characterization and comparison of polymer systems in the production of meat packaging 21

INFORMATIZATION AND MANAGEMENT

- Endo Xia, Hunyan He, Linda Fan, Yifan Xu
The use of behavioral profiles and DPI-based command detection to protect against unauthorized changes in NCU parameters in food production 37
- Vasily Yu. Durmanov, Ekaterina L. Chepurina
Creation of hybrid systems for analyzing hyperspectral data and RGB images for early diagnosis of grain crops 47

MARKETING AND FINANCE

- Marina M. Shailiyeva, Yulia N. Nesterenko, Victor M. Zayernyuk
Economic and mathematical modeling and forecasting of the efficiency of using the production resources of a bakery enterprise 58

APPLIED RESEARCH

- Oleg M. Omelchenko
Radiation treatment of bakery products: solving the problem of supplying remote areas with fresh produce 68

ТЕХНОЛОГИЯ И ПРОИЗВОДСТВО

Антимикробная активность сквалена и CO₂-экстрактов семян амаранта

Анна Андреевна Петрова

Ассистент кафедры Общей и неорганической химии
Кемеровский государственный университет
Кемерово, Россия
onh@kemsu.ru
ORCID 0009-0001-7663-8516

Олеся Владимировна Салищева

Доктор химических наук, заведующий кафедрой Общей и неорганической химии
Кемеровский государственный университет
Кемерово, Россия
salishchevaov@mail.ru
ORCID 0000-0003-1885-2060

Владимир Петрович Юстратов

Доктор химических наук, профессор кафедры Общей и неорганической химии
Кемеровский государственный университет
Кемерово, Россия
onh@kemsu.ru
ORCID 0000-0002-1779-4332

Тимофей Альбертович Ларичев

Доктор химических наук, профессор кафедры Химии твердого тела и химического материаловедения
Кемеровский государственный университет
Кемерово, Россия
onh@kemsu.ru
ORCID 0000-0002-3801-0023

Поступила в редакцию 16.04.2025

Принята 23.05.2025

Опубликована 30.06.2025

УДК 615.99

EDN DIAWGH

BAK 4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ (технические науки)

OECD 04.01.AH. AGRICULTURE, MULTIDISCIPLINARY

Аннотация

Растительные масла проявляют разнообразные антимикробные свойства, что подтверждает их ценность как природного ресурса. Целью исследования являлось определение антимикробной активности сквалена и CO₂-экстрактов амаранта. Антимикробную активность оценивали в отношении тест-культур *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas putida*, *Enterococcus faecalis* с использованием диск-диффузионного метода. Исследования проведены для трех экстрактов масла амаранта, полученных методом сверхфлюидной CO₂-экстракции, экстрагированных при различных давлениях (100, 160, 290 атм.), а также для сквалена, выделенного методом многоступенчатой экстракции гексаном. В качестве положительного и отрицательного контроля были взят раствор

антибиотика и вода. Установлено, что все экстракты обладают антимикробной активностью, но экстракт, полученный при 290 атм., демонстрирует более высокую антимикробную активность по отношению к следующим штаммам микроорганизмов *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* и *Pseudomonas putida*. Это видно из зон ингибирования роста микроорганизмов. При высоком давлении растворяющая способность CO₂ выше, чем при давлении 100 атм. и 160 атм., следовательно это приводит к повышенной концентрации именно тех биологически активных веществ, которые обладают ингибирующим действием на микроорганизмы. Полученные экстракты продемонстрировали антимикробный потенциал, что указывает на возможность их применения в качестве экологически чистых антимикробных систем. Эти результаты могут оказаться полезными для разработки противомикробных комплексов для потенциального использования для биомедицинских, фармацевтических и пищевых системах.

Ключевые слова

амарант, антимикробная активность, CO₂-экстракты, сквален, микроорганизмы.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-16-00113.

Введение

Широкое применение антибиотиков и химико-терапевтических препаратов в лечении и профилактике инфекционных заболеваний показало, что, наряду с выраженным лечебным эффектом, часто проявляются такие нежелательные явления, как аллергия и интоксикация организма. Кроме того, возникают лекарственно-устойчивые формы бактерий-возбудителей инфекционного процесса. Поэтому поиск естественных и безвредных для организма соединений, обладающих антибактериальной и антитоксической активностью, является достаточно важной задачей (Злобин, 2011).

Одним из перспективных источников является растительное сырье, поскольку растения производят множество биологически активных соединений с различными терапевтическими свойствами (Savoia, 2012).

Масла, многокомпонентные жидкости со сложным составом, получаемые из свежего и сухого растительного материала (цветов, корней, листьев, семян, кожуры, плодов или всего растения) различными методами экстракции (Rubio Ortega, 2023), обладают универсальностью биологических свойств. Одним из их основных преимуществ является их антибактериальная активность как веществ широкого спектра действия против грамположительных и грамотрицательных бактерий, включая устойчивые к антибиотикам штаммы (Guinoiseau, 2015; Leyva-López, 2017).

Антимикробные препараты растительного происхождения также считаются более безопасными по сравнению с синтетическими соединениями из-за их природного происхождения. Около четверти современных лекарственных средств получают из соединений растительного происхождения.

Вторичные метаболиты некоторых растений (фитохимические вещества) уже продемонстрировали свой потенциал в качестве антибактериальных средств, а также в качестве синергистов или усилителей действия других антибактериальных средств. Использование фитохимических веществ и растительных экстрактов в качестве агентов, модифицирующих резистентность, представляет собой все более активную тему исследований (Dixon, 2001). Фитохимические вещества часто действуют по иным механизмам, чем обычные антибиотики, и поэтому могут быть использованы против резистентных бактерий (Abreu, 2012).

Натуральные продукты на растительной основе должны представлять наибольший интерес для современной фармацевтической промышленности, поскольку являются основным источником новых химических соединений, направленных на новые лекарственные мишени (Anand, 2020; Аракелян, 2022). Особую значимость приобретает поиск новых источников биологически активных веществ растительного происхождения, способных оказывать антибактериальное, противогрибковое и противовирусное действие.

Амарант (*Amaranthus* spp.) представляет собой перспективный объект исследований в данной области благодаря своему богатому химическому составу и широким адаптивным возможностям. Это растение характеризуется высоким содержанием белка, превосходящим многие другие злаки, и содержит все незаменимые аминокислоты, в том числе лизин, которого часто не хватает в других злаках. Амарант богат как растворимой, так и нерастворимой клетчаткой, которая поддерживает здоровье пищеварительной системы, способствует насыщению и может помочь снизить уровень холестерина (Manisha, 2023; Park, 2020; Schmidt, 2021; Bachar, 2020; Vega-Galvez, 2010).

Кроме того, амарант является хорошим источником таких витаминов, как А, С, Е и различные витамины группы В, которые необходимы для обмена веществ, здоровья кожи и иммунной системы. Содержащиеся в нём минералы, в том числе железо, кальций и цинк, поддерживают здоровье костей и мышц (Alvarez-Jubete, 2009). Поскольку амарант не содержит глютен, он может стать альтернативой зерновым для людей с непереносимостью глютена. Его жировой профиль, в котором преобладают ненасыщенные жиры, полезен для здоровья сердца (Manuelo, 2020). В нём мало насыщенных жирных кислот (С16:0, С18:0), но амарантовое масло содержит до 73 % преимущественно ненасыщенных жирных кислот (ПНЖК), которые полезны для здоровья сердца при умеренном потреблении (Alvarez-Jubete, 2009).

Амарант считается функциональным продуктом, поскольку он является ценным источником антиоксидантов, в том числе фенольных соединений и флавоноидов, которые помогают защитить организм от окислительного стресса и снижают риск развития хронических заболеваний, таких как болезни сердца и рак (Tang, 2016).

Антимикробный потенциал экстрактов амаранта обусловлен сложным химическим составом, который варьируется в зависимости от вида, части растения (семена, листья, корни) и метода экстракции. Ключевыми классами соединений, ответственных за ингибирование роста микроорганизмов, являются:

1. Полифенолы и флавоноиды: Высокое содержание рутина, кверцетина и их гликозидов. Эти соединения нарушают целостность клеточных мембран микробов, ингибируют ферментативные системы и хелатируют ионы металлов, необходимые для жизнедеятельности патогенов (Kumar, 2022).
2. Сапонины: Известны своей способностью взаимодействовать с липидами клеточных мембран, вызывая их проницаемость и лизис (Patil, 2022).
3. Пептиды и белки: Некоторые белки, выделенные из семян амаранта, показывают прямую фунгистатическую и бактериостатическую активность.

Проводилось исследование антимикробной активности экстрактов из семян амаранта. В качестве метода экстракции была использована сверхкритическая флюидная экстракция диоксидом углерода. В таком состоянии CO₂ обладает одновременно свойствами жидкости (растворяющей способностью) и газа (проникающей способностью). За счет высокого давления разрушается клеточная структура растительного материала, и растворитель получает доступ к труднодоступным веществам. CO₂ является нетоксичным, негорючим и легкодоступным веществом. После экстракции он легко удаляется, не оставляя вредных остатков в экстракте. Это делает CO₂-экстракцию более экологически чистым методом по сравнению с использованием органических растворителей (Zhou, 2021).

Выбор СКФЭ был обусловлен так же ее ключевыми преимуществами: экологичностью, отсутствием токсичных остатков в продукте и, самое главное, возможностью проводить экстракцию в мягких температурных режимах, что важно для сохранения нестабильного сквалена от термической деградации (Zia, 2022; Zhang, 2025; Калдыбаева, 2025).

Антимикробная активность растительных CO₂-экстрактов связана с тем, что CO₂-экстракция позволяет извлекать биологически активные вещества, которые могут обладать антимикробными свойствами, и при этом обеспечивает инактивацию микроорганизмов.

Цель исследования заключается в исследовании антимикробной активности CO₂-экстрактов амаранта, полученных при различных давлениях, и сквалена, выделенного из масла семян амаранта методом многократной экстракции гексаном (Саноев, 2020).

Материалы и методы исследования

В качестве объектов для исследования были взяты пищевые семена растения рода *Amaranthus*, сорта «Кинес», отечественной селекции, Курская область, Крестьянское (фермерское) хозяйство Гандзюк А. П., ТУ 01.11.99-001-0086728806-2019, семейство амарантовых род *Amaranthus* вид *hyochondriacus* L. CO₂-экстракты были получены на установке CO₂-экстракции «ЭЗТ-10/2-1/1-3-ВА» (производитель ООО «ЦНР», Россия) при различных параметрах: давлении в рабочей колонке 100, 160 и 290 атм (Петрова, 2025).

Антимикробную активность оценивали для трех экстрактов, полученных при указанных давлениях в рабочей колонке, и для сквалена, выделенного методом многократной экстракции гексаном из масла, выделенного из семян амаранта при 100 атм.

В качестве тест-культур использовали стандартные штаммы микроорганизмов Биоресурсного центра Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов (БРЦ ВКПМ) Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (г. Москва): *Escherichia coli* B-6645 (ATCC 25922), *Pseudomonas aeruginosa* B-8243 (ATCC 27853), *Pseudomonas putida* B-3505, *Enterococcus faecalis* (*Streptococcus faecium*) 320Д B-5000.

Работа выполнена на базе центра коллективного пользования «Инструментальные методы анализа в области прикладной биотехнологии» КемГУ. Для каждого штамма готовили суспензию на основе дистиллированной воды с конечной концентрацией 10⁸ КОЕ/мл. Микроорганизмы были культивированы на питательных средах в соответствии с паспортом штамма, с последующей инокуляцией и инкубированием в средах для *Escherichia coli* – мясопептонный агар (МПА), *Pseudomonas aeruginosa* – МПА, *Pseudomonas putida* – МПА, *Enterococcus faecalis* – среда М 17 (фирма HIMEDIA), содержащая в г/л : папаиновый перевар соевой муки 5,00; пептический перевар животной ткани 5,00; дрожжевой экстракт 2,50; говяжий экстракт 5,00; лактоза 5,00; аскорбиновая кислота 0,50; сульфат магния 0,25; агар 10,00; рН 7,1; 37° С. Температура инкубирования составила 37° С, время инкубирования составляло 24-48 ч.

Исследования антимикробной активности проведены в соответствии с методом диффузии в лунку агара, как описано (Салищева, 2020). Суспензию выделенного микроорганизма готовили до мутности 0,5 стандарта Макфарланда и инокулировали на приготовленный агар Мюллера Хинтона. Агаровые лунки диаметром 6 мм пробивали асептически с использованием стерильного пробкового сверла. Исследуемые системы вводили в каждую лунку и затем инкубировали при 37° С в течение 24 часов, после чего измеряли и регистрировали зоны ингибирования.

Антимикробные свойства CO₂-экстрактов амаранта, а также оценивали по ширине зоны ингибирования относительно дисков, пропитанных исследуемыми образцами, помещенных на поверхность питательной среды после инокуляции исследуемыми штаммами микроорганизмов в чашках Петри. В качестве положительного контроля использовали диски, пропитанные антибиотиками – стрептомицин, гентамицин и тетрациклин. В качестве отрицательного контроля – стерильная вода.

Результаты и обсуждение

Известно, что сверхкритическая CO₂ экстракция имеет два периода: быстрый и короткий период, в ходе которого извлекается основное количество липофильных веществ, находящихся на поверхности сырья, и медленный – более длительный, когда извлекается оставшееся количество вещества, содержащихся в микрокапиллярах и внутри неразрушенных клеток (Саноев, 2020).

Экстракты семян амаранта, полученные методом высокофлюидной экстракции, содержат сквален, парафиновые углеводороды, сложные эфиры жирных кислот, токоферолы, свободные жирные кислоты, тритерпенолы и фитостеролы, каротиноиды. Содержание сквалена в масле колеблется от 5,4 до 16,7%. При повышении давления увеличивается выход масла (Петрова, 2025), снижается содержание в экстракте сквалена, но одновременно с этим экстрагируется больше сопутствующих биологически активным компонентов, изменяется соотношение содержания ненасыщенных жирных кислот к насыщенным. Изменение этих соотношений влияет на антимикробные свойства экстрактов. Результаты исследований представлены на рисунке 1 и в таблицах 1-4.

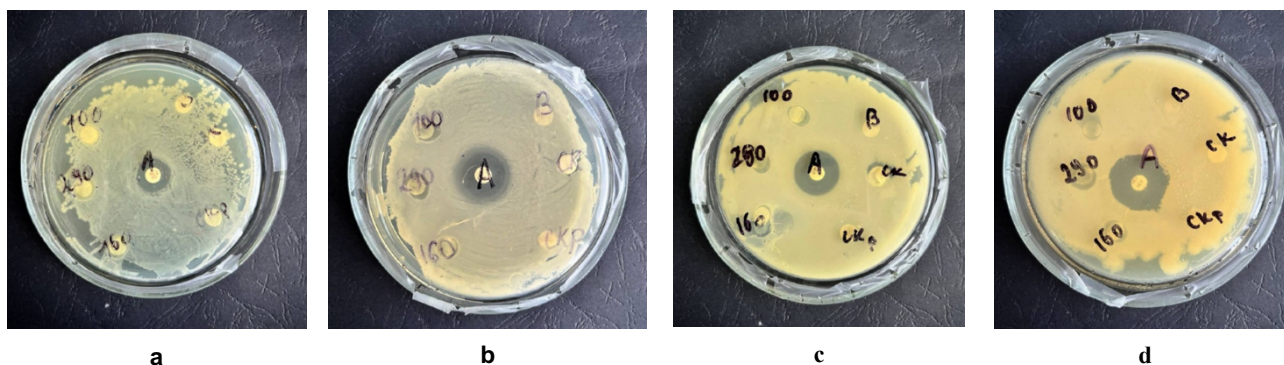


Рисунок 1. Антимикробная активность исследуемых образцов отношению к: а) *Escherichia coli*, б) *Pseudomonas aeruginosa*, в) *Pseudomonas putida*, д) *Enterococcus faecalis*

Таблица 1. Антимикробная активность образцов с типовым штаммом *Escherichia coli*

Исследуемые образцы	Типовой штамм <i>Escherichia coli</i>
	Зона ингибирования роста, мм
Антибиотик (стрептомицин)	14,33±0,44
Вода	–
Сквален	–
СО ₂ -экстракт (100 атм)	9,50±0,50
СО ₂ -экстракт (160 атм)	9,67±0,50
СО ₂ -экстракт (290 атм)	11,33±0,44

Положительный контроль (стрептомицин) показал высокую антимикробную активность в отношении *Escherichia coli* с зоной ингибирования 14,33±0,44 мм. Сквален не проявил активности (зона ингибирования отсутствует). СО₂-экстракты, полученные при 100 атм. и 160 атм. продемонстрировали умеренную активность: СО₂-экстракт при 100 атм. показал активность с зоной ингибирования 9,50 ± 0,50 мм, СО₂-экстракт при 160 атм. – 9,67 ± 0,50 мм, что незначительно выше, чем в предыдущем. Наибольшая активность наблюдается при 290 атм (11,33 ± 0,44) мм.

Таблица 2. Антимикробная активность образцов с типовым штаммом *Pseudomonas aeruginosa*

Исследуемые образцы	Типовой штамм <i>Pseudomonas aeruginosa</i>
	Зона ингибирования роста, мм
Антибиотик (гентамицин)	22,67±1,78
Вода	–
Сквален	10,00±1,10
СО ₂ -экстракт (100 атм)	11,67±1,11
СО ₂ -экстракт (160 атм)	10,67±1,11
СО ₂ -экстракт (290 атм)	12,00±0,67

Положительный контроль (гентамицин) в отношении *Pseudomonas aeruginosa* показал высокую антимикробную активность – 22,67 ± 1,78 мм. Сквален проявил умеренную активность с зоной ингибирования 10,00 ± 1,10 мм. СО₂-экстракты, полученные при 100 атм. и 160 атм. продемонстрировали умеренную активность: СО₂-экстракт при 100 атм. показал активность с зоной ингибирования, 11,67 ± 1,11 мм. Активность СО₂-экстракта при 160 атм. несколько снизилась, и зона ингибирования составила – 10,67 ± 1,11 мм. Наибольшая активность наблюдается при 290 атм. (12,00 ± 0,67) мм

Таблица 3. Антимикробная активность образцов с типовым штаммом *Pseudomonas putida*

Исследуемые образцы	Типовой штамм <i>Pseudomonas putida</i>
	Зона ингибирования роста, мм
Антибиотик (стрептомицин)	19,67 ± 0,44
Вода	–
Сквален	11,67 ± 1,11
СО ₂ -экстракт (100 атм)	11,00 ± 0,67
СО ₂ -экстракт (160 атм)	11,67 ± 1,77
СО ₂ -экстракт (290 атм)	13,67 ± 0,89

Положительный контроль (гентамицин) в отношении штамма *Pseudomonas putida* снова показал довольно высокую антимикробную активность (19,67 ± 0,44 мм). Сквален проявил значительную активность – 11,67 ± 1,11 мм. Что касается экстрактов, то их антимикробная активность увеличивается с увеличением давления. При 100 атм. зона ингибирования составила 11,00 ± 0,67 мм, при 160 атм. – 11,67 ± 1,77 мм, а при 290 атм. – 13,67 ± 0,89 мм. Здесь также видно, что активность выше у экстракта, полученном при самом высоком давлении.

Таблица 4. Антимикробная активность образцов с типовым штаммом *Enterococcus faecalis*

Исследуемые образцы	Типовой штамм <i>Enterococcus faecalis</i>
	Зона ингибирования роста, мм
Антибиотик (тетрациклин)	23,67 ± 1,11
Вода	–
Сквален	–
СО ₂ -экстракт (100 атм)	12,67 ± 1,78
СО ₂ -экстракт (160 атм)	9,67 ± 0,89
СО ₂ -экстракт (290 атм)	11,50 ± 0,33

Положительный контроль (тетрациклин) в отношении *Enterococcus faecalis* проявил достаточно высокую антимикробную активность с зоной ингибирования роста 23,67 ± 1,11 мм. Сквален не проявил антимикробную активность. СО₂-экстракты проявили антимикробные свойства, но с наибольшей зоной ингибирования оказался экстракт, полученный при 100 атм – 12,67 ± 1,78 мм. Незначительно отличается активность у экстракта, полученного при 290 атм., зона ингибирования составила 11,50 ± 0,33 мм. Наименьшая активность у экстракта при 160 атм. – 9,67 ± 0,89 мм.

Таким образом, можно заметить, что по отношению к следующим штаммам микроорганизмов *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* и *Pseudomonas putida* наблюдается высокая антимикробная активность у СО₂-экстракта амаранта, полученном при 290 атм., то есть с увеличением давления увеличивается активность. Это видно исходя из зон ингибирования роста. Также это связано с тем, что в экстракции при высоком давлении извлекается больше биологически активных веществ, отвечающих за антимикробную активность.

Заключение

Таким образом, данная работа подтверждает перспективность использования экстрактов амаранта и его ключевого компонента, сквалена, в качестве природных антимикробных агентов. Полученные данные могут служить основанием для дальнейших исследований, направленных на оптимизацию методов экстракции и улучшения качества полученных экстрактов для применения в пищевой, косметической или фармацевтической промышленности в качестве натуральных консервантов или активных ингредиентов.

Список литературы

1. Аракелян И.Г., Магомедкеримова А.М., Прасолова И.Ф. Изучение антимикробных свойств различных растений // Молодой ученый. 2022. № 27(422). С. 201-204.
2. Злобин А.А., Мартинсон Е.А., Оводов Ю.С. Антиоксидантная и антимикробная активность пектинов ряда растений Европейского Севера России // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. 2011. Вып. 3(7). С. 33-37.
3. Калдыбаева Т.Е., Абдыкалыков Р.Д. Использование сверхкритической CO₂-экстракции для получения активных компонентов // Вестник науки. 2025. Т. 4. № 4(85). С. 981-987.
4. Петрова А.А., Салищева О.В., Марков А.С. Влияние параметров сверхкритической CO₂-экстракции семян растения рода *Amaranthus* на выход целевых компонентов // Молочная промышленность. 2025. № 1. С. 55-63.
5. Салищева О.В., Просеков А.Ю., Долганюк В.Ф. Исследование антимикробной активности моноядерных и биядерных нитритных комплексов платины (II) и платины (IV) // Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50. № 2. С. 329-342.
6. Саноев А.И., Хидоятова Ш.К., Мукаррамов Н.И., Рахманбердыева Р.К., Маликова М.Х., Межлумян Л.Г., Сагдуллаев Ш.Ш., Гусакова С.Д. Влияние условий сверхкритической углекислотной экстракции жмыха амаранта на выход экстракта и содержание в нем сквалена // Химия растительного сырья. 2020. № 2. С. 315-322.
7. Abreu A.C., McBain A.J., Simões M. Plants as sources of new antimicrobials and resistance-modifying agents // Natural product reports. 2012. Vol. 29. № 9. pp. 1007-1021.
8. Alvarez-Jubete L., Arendt E.K., Gallagher E. Nutritive value and chemical composition of pseudocereals as gluten-free ingredients // International journal of food sciences and nutrition. 2009. Vol. 60. pp. 240-257.
9. Anand U., Nandy S., Mundhra A., Das N., Pandey D.K., Dey A.A. Review on antimicrobial botanicals, phytochemicals and natural resistance modifying agents from Apocynaceae family: Possible therapeutic approaches against multidrug resistance in pathogenic microorganisms // Drug resistance updates. 2020. Vol. 51. P. 100695.
10. Bachar S.C., Bachar R., Jannat K., Jahan R., Rahmatullah M. Hepatoprotective natural products // Annual reports in medicinal chemistry. 2020. Vol. 55. pp. 207-249.
11. Dixon R.A. Natural products and plant disease resistance // Nature. 2001. Vol. 411. № 6839. pp. 843-847.
12. Guinoiseau E., Luciani A., de Rocca Serra D., Quilichini Y., Berti L., Lorenzi V. Primary mode of action of cistus ladaniferus l. essential oil active fractions on staphylococcus aureus strain // Advances in microbiology. 2015. Vol. 5. № 13. P. 881.
13. Kumar A., Singh R., Singh S. Phytochemical profiling and antimicrobial potential of *Amaranthus* spp.: A comprehensive review // Industrial crops and products. 2022. Vol. 181. pp. 114-879.
14. Leyva-Lopez N., Gutierrez-Grijalva E.P., Vazquez-Olivo G., Heredia J.B. Essential Oils of Oregano: Biological Activity beyond Their Antimicrobial Properties // Molecules. 2017. Vol. 22. № 6. P. 989.
15. Manisha M., Ritu S., Sanju B.D., Bou-Mitri C., Singh Y., Panwar S., Khatkar B.S. Nutritional composition, functionality and processing technologies for amaranth // Journal of food processing and preservation. 2023. Vol. 2023. P. 1753029.
16. Manyelo T.G., Sebola N.A., van Rensburg E.J., Mabelebele M. The probable use of genus *amaranthus* as feed material for monogastric animals // Animals. 2020. Vol. 10. Art. 1504.
17. Park S.J., Sharma A., Lee H.J. A Review of recent studies on the antioxidant activities of a third-millennium food: *Amaranthus* spp. // Antioxidants. 2020. Vol. 9. pp. 12-36.
18. Patil S., Singh R., Singh S. Antimicrobial and antioxidant potential of *Amaranthus* spp.: A review // Journal of food science and technology. 2022. Vol. 59. pp. 2345-2356.
19. Rubio Ortega A., Guinoiseau E., Poli J.P., Quilichini Y., de Rocca Serra D., del Carmen Travieso Novelles M., Espinosa Castano I., Pino Perez O., Berti L., Lorenzi V. The primary mode of action of lippia

- graveolens essential oil on salmonella enterica subsp. Enterica Serovar Typhimurium // *Microorganisms*. 2023. Vol. 11. № 12. pp. 29-43.
20. Savoia D. Plant-derived antimicrobial compounds: alternatives to antibiotics // *Future microbiology*. 2012. Vol. 7. № 8. pp. 979-990.
21. Schmidt D., Verruma-Bernardi M.R., Forti V.A., Borges M.T.M.R. Quinoa and amaranth as functional foods: A review // *Food reviews international*. 2021. Vol. 39. pp. 2277-2296.
22. Tang Y., Li X., Chen P.X., Zhang B., Liu R., Hernandez M., Draves J., Marcone M.F., Tsao R. Assessing the fatty acid, carotenoid and tocopherol compositions of amaranth and quinoa grains grown in Ontario and their overall contribution to nutritional quality // *Journal of agricultural and food chemistry*. 2016. Vol. 64. pp. 1103-1110.
23. Vega-Galvez A., Miranda M., Vergara J., Uribe E., Puente L., Martínez E.A. Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient andean grain: a review // *Journal of the science of food and agriculture*. 2010. Vol. 90. pp. 2541-2547.
24. Zhang J., Gunal-Koroglu D., Echeverria-Jaramillo E., Subasi B.G. Recent advances in valorization of wastes and byproducts of berry processing and food applications. *Berry fruits*. Amsterdam: Elsevier, 2025. pp. 343-383.
25. Zhou J., Gullon B., Wang M., Gullon P., Lorenzo J.M., Barba F.J. The application of supercritical fluids technology to recover healthy valuable compounds from marine and agricultural food processing by-products: A review // *Processes*. 2021. Vol. 9. P. 357.
26. Zia S., Khan M.R., Shabbir M.A., Aslam Maan A., Khan M.K.I., Nadeem M., Ahmed Khalil A., Dina A., Aadil R.M. An Inclusive Overview of Advanced Thermal and Nonthermal Extraction Techniques for Bioactive Compounds in Food and Food-Related Matrices // *Food reviews international*. 2022. Vol. 38. pp. 1166-1196.

Antimicrobial activity of squalene and CO₂ extracts of amaranth seeds

Anna A. Petrova

Assistant Professor of the Department of General and Inorganic Chemistry
Kemerovo State University
Kemerovo, Russia
onh@kemsu.ru
ORCID 0009-0001-7663-8516

Olesya V. Salishcheva

Doctor of Chemical Sciences, Head of the Department of General and Inorganic Chemistry
Kemerovo State University
Kemerovo, Russia
salishchevaov@mail.ru
ORCID 0000-0003-1885-2060

Vladimir P. Yustratov

Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Department of General and Inorganic Chemistry
Kemerovo State University
Kemerovo, Russia
onh@kemsu.ru
ORCID 0000-0002-1779-4332

Timofey A. Larichev

Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Department of Solid State Chemistry and Chemical Materials Science

Kemerovo State University

Kemerovo, Russia

onh@kemsu.ru

ORCID 0000-0002-3801-0023

Received 16.04.2025

Accepted 23.05.2025

Published 30.06.2025

UDC 615.99

EDN DIAWGH

VAK 4.3.5. Biotechnology of food and biologically active substances (technical sciences)

OECD 04.01.AH. AGRICULTURE, MULTIDISCIPLINARY

Abstract

Vegetable oils exhibit a variety of antimicrobial properties, which confirms their value as a natural resource. The aim of the study was to determine the antimicrobial activity of squalene and CO₂ extracts of amaranth. Antimicrobial activity was assessed against test cultures of *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas putida*, *Enterococcus faecalis* using the disk diffusion method. The studies were carried out for three extracts of amaranth oil obtained by superfluidic CO₂ extraction, extracted at various pressures (100, 160, 290 atm.), as well as for squalene isolated by multistage hexane extraction. An antibiotic solution and water were used as positive and negative controls. It was found that all extracts have antimicrobial activity, but the extract obtained at 290 atm shows higher antimicrobial activity against the following strains of microorganisms *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* and *Pseudomonas putida*. This can be seen from the zones of inhibition of microbial growth. At high pressure, the dissolving capacity of CO₂ is higher than at pressures of 100 atm and 160 atm, therefore, this leads to an increased concentration of precisely those biologically active substances that have an inhibitory effect on microorganisms. The obtained extracts have demonstrated antimicrobial potential, which indicates the possibility of their use as environmentally friendly antimicrobial systems. These results may be useful for the development of antimicrobial complexes for potential use in biomedical, pharmaceutical and food systems.

Keywords

amaranth, antimicrobial activity, CO₂ extracts, squalene, microorganisms.

The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-16-00113.

References

1. Arakelyan I.G., Magomedkerimova A.M., Prasolova I.F. Study of antimicrobial properties of various plants // *Young scientist*. 2022. № 27(422). pp. 201-204.
2. Zlobin A.A., Martinson E.A., Ovodov Y.S. Antioxidant and antimicrobial activity of pectins from a number of plants of the European North of Russia // *Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2011. Iss. 3(7). pp. 33-37.
3. Kaldybaeva T.E., Abdykalikov R.D. Use of supercritical CO₂-extraction for obtaining active components // *Bulletin of science*. 2025. Vol. 4. № 4(85). pp. 981-987.
4. Petrova A.A., Salishcheva O.V., Markov A.S. Influence of supercritical CO₂-extraction parameters of seeds of the genus *Amaranthus* on the yield of target components // *Dairy Industry*. 2025. № 1. pp. 55-63.

5. Salishcheva O.V., Prosekov A.Y., Dolganyuk V.F. Study of antimicrobial activity of mononuclear and binuclear nitrite complexes of platinum (II) and platinum (IV) // *Equipment and technology for food production*. 2020. Vol. 50. № 2. pp. 329-342.
6. Sanoev A.I., Khidoyatova Sh.K., Mukarramov N.I., Rakhmanberdyeva R.K., Malikova M.Kh., Mezhlumyan L.G., Sagdullaev Sh.Sh., Gusakova S.D. Influence of supercritical carbon dioxide extraction conditions of amaranth cake on extract yield and squalene content in it // *Chemistry of plant raw materials*. 2020. № 2. pp. 315-322.
7. Abreu A.C., McBain A.J., Simões M. Plants as sources of new antimicrobials and resistance-modifying agents // *Natural product reports*. 2012. Vol. 29. № 9. pp. 1007-1021.
8. Alvarez-Jubete L., Arendt E.K., Gallagher E. Nutritive value and chemical composition of pseudocereals as gluten-free ingredients // *International journal of food sciences and nutrition*. 2009. Vol. 60. pp. 240-257.
9. Anand U., Nandy S., Mundhra A., Das N., Pandey D.K., Dey A.A. Review on antimicrobial botanicals, phytochemicals and natural resistance modifying agents from Apocynaceae family: Possible therapeutic approaches against multidrug resistance in pathogenic microorganisms // *Drug resistance updates*. 2020. Vol. 51. P. 100695.
10. Bachar S.C., Bachar R., Jannat K., Jahan R., Rahmatullah M. Hepatoprotective natural products // *Annual reports in medicinal chemistry*. 2020. Vol. 55. pp. 207-249.
11. Dixon R.A. Natural products and plant disease resistance // *Nature*. 2001. Vol. 411. № 6839. pp. 843-847.
12. Guinoiseau E., Luciani A., de Rocca Serra D., Quilichini Y., Berti L., Lorenzi V. Primary mode of action of cistus ladaniferus l. essential oil active fractions on staphylococcus aureus strain // *Advances in microbiology*. 2015. Vol. 5. № 13. P. 881.
13. Kumar A., Singh R., Singh S. Phytochemical profiling and antimicrobial potential of *Amaranthus* spp.: A comprehensive review // *Industrial crops and products*. 2022. Vol. 181. pp. 114-879.
14. Leyva-Lopez N., Gutierrez-Grijalva E.P., Vazquez-Olivo G., Heredia J.B. Essential Oils of Oregano: Biological Activity beyond Their Antimicrobial Properties // *Molecules*. 2017. Vol. 22. № 6. P. 989.
15. Manisha M., Ritu S., Sanju B.D., Bou-Mitri C., Singh Y., Panwar S., Khatkar B.S. Nutritional composition, functionality and processing technologies for amaranth // *Journal of food processing and preservation*. 2023. Vol. 2023. P. 1753029.
16. Manyelo T.G., Sebola N.A., van Rensburg E.J., Mabelebele M. The probable use of genus amaranthus as feed material for monogastric animals // *Animals*. 2020. Vol. 10. Art. 1504.
17. Park S.J., Sharma A., Lee H.J. A Review of recent studies on the antioxidant activities of a third-millennium food: *Amaranthus* spp. // *Antioxidants*. 2020. Vol. 9. pp. 12-36.
18. Patil S., Singh R., Singh S. Antimicrobial and antioxidant potential of *Amaranthus* spp.: A review // *Journal of food science and technology*. 2022. Vol. 59. pp. 2345-2356.
19. Rubio Ortega A., Guinoiseau E., Poli J.P., Quilichini Y., de Rocca Serra D., del Carmen Travieso Novelles M., Espinosa Castano I., Pino Perez O., Berti L., Lorenzi V. The primary mode of action of lippia graveolens essential oil on salmonella enterica subsp. Enterica Serovar Typhimurium // *Microorganisms*. 2023. Vol. 11. № 12. pp. 29-43.
20. Savoia D. Plant-derived antimicrobial compounds: alternatives to antibiotics // *Future microbiology*. 2012. Vol. 7. № 8. pp. 979-990.
21. Schmidt D., Verruma-Bernardi M.R., Forti V.A., Borges M.T.M.R. Quinoa and amaranth as functional foods: A review // *Food reviews international*. 2021. Vol. 39. pp. 2277-2296.
22. Tang Y., Li X., Chen P.X., Zhang B., Liu R., Hernande M., Draves J., Marccone M.F., Tsao R. Assessing the fatty acid, carotenoid and tocopherol compositions of amaranth and quinoa grains grown in Ontario and their overall contribution to nutritional quality // *Journal of agricultural and food chemistry*. 2016. Vol. 64. pp. 1103-1110.

23. Vega-Galvez A., Miranda M., Vergara J., Uribe E., Puente L., Martínez E.A. Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient andean grain: a review // *Journal of the science of food and agriculture*. 2010. Vol. 90. pp. 2541-2547.
24. Zhang J., Gunal-Koroglu D., Echeverria-Jaramillo E., Subasi B.G. Recent advances in valorization of wastes and byproducts of berry processing and food applications. *Berry fruits*. Amsterdam: Elsevier, 2025. pp. 343-383.
25. Zhou J., Gullon B., Wang M., Gullon P., Lorenzo J.M., Barba F.J. The application of supercritical fluids technology to recover healthy valuable compounds from marine and agricultural food processing by-products: A review // *Processes*. 2021. Vol. 9. P. 357.
26. Zia S., Khan M.R., Shabbir M.A., Aslam Maan A., Khan M.K.I., Nadeem M., Ahmed Khalil A., Dina A., Aadil R.M. An Inclusive Overview of Advanced Thermal and Nonthermal Extraction Techniques for Bioactive Compounds in Food and Food-Related Matrices // *Food reviews international*. 2022. Vol. 38. pp. 1166-1196.

Характеристика и сравнение полимерных систем в производстве упаковки мясных изделий

Артем Дмитриевич Безруков

Аспирант
Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова
Москва, Россия
Bezrukov.A@edu.rea.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Татьяна Ивановна Чалых

Доктор химических наук, профессор, профессор базовой кафедры Индустрии качества
Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова
Москва, Россия
Профессор кафедры Промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы
Российский биотехнологический университет
Москва, Россия
tchalykh.ti@rea.ru

Поступила в редакцию 25.04.2025

Принята 11.05.2025

Опубликована 30.06.2025

УДК 678.7

EDN COQIWZ

ВАК 4.3.3. Пищевые системы (технические науки)

OECD 02.11.JY. FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

Аннотация

Представлен сравнительный обзор современных полимерных упаковочных решений, применяемых для мясной продукции. Рассмотрены основные группы материалов, включая биополимеры на основе возобновляемого сырья, нанокompозиты, активные и интеллектуальные упаковочные решения. Особое внимание уделено их барьерным характеристикам по отношению к кислороду, влаге и микробиологическим агентам. Проведен анализ функциональных возможностей систем – от создания контролируемой газовой среды до интеграции антиоксидантных и антимикробных компонентов, а также сенсорных индикаторов свежести. На основе проведенного анализа обоснована необходимость разработки гибридных упаковочных систем, сочетающих экологичность, высокие барьерные свойства и интеллектуальные функции. Предложены критерии оценки для сравнения уровня качества таких материалов.

Ключевые слова

полимерная упаковка, мясные продукты, барьерные свойства, активная упаковка, интеллектуальная упаковка.

Введение

Одной из ключевых задач современной пищевой промышленности является обеспечение безопасности, качества и длительного срока хранения продуктов животного происхождения, в частности мясных изделий. Мясо и мясопродукты представляют собой высокоценные по питательной и биологической ценности объекты, отличающиеся при этом выраженной склонностью к микробиологической порче и окислительным процессам. В этих условиях особую значимость приобретает правильно подобранная упаковка, способная эффективно изолировать продукт от внешней

среды, замедлить развитие патогенной микрофлоры, снизить интенсивность окисления и сохранить органолептические характеристики.

Традиционно для упаковки мясных продуктов применяются синтетические полимеры, такие как полиэтилен (PE), полипропилен (PP), полиэтилентерефталат (PET), поливинилхлорид (PVC), поливинилиденхлорид (PVDC), сополимер этилена и поливинилового спирта (EVOH) и их многослойные комбинации. Эти материалы обладают высокими барьерными свойствами по отношению к кислороду и влаге, механической прочностью и технологичностью. Однако в последние годы они подвергаются критике из-за экологической инертности, трудностей утилизации и зависимости от ископаемого сырья.

Современная повестка устойчивого развития и ужесточающиеся регуляторные требования предполагают, что новые упаковочные материалы после использования должны быть пригодны к повторному использованию, переработке или биологическому разложению. На этом фоне возрастает интерес к биооснованным полимерам и к активным системам, в которых функциональные компоненты целенаправленно взаимодействуют с продуктом или окружающей средой, продлевая срок годности, сохраняя качество и безопасность.

На фоне усиливающихся требований к переходу на технологии устойчивого развития и биоразлагаемости упаковки исследователи все активнее обращаются к биополимерным материалам, получаемым из возобновляемых ресурсов. Так, в работах Wongphan и соавт., Tomić и др. [2,3,5,11,13-15] показано, что полимеры на основе крахмала, хитозана, целлюлозы и полилактида (PLA) обладают высоким потенциалом применения в упаковке пищевых продуктов благодаря их биоразлагаемости и возможности модификации. Особый интерес представляют исследования, посвященные улучшению барьерных характеристик и приданию биополимерам биоактивных свойств.

Например, Kandeeran и др. [7] продемонстрировали, что добавление наноструктур (глин, диоксида титана, оксида цинка) к биополимерной матрице позволяет существенно снизить газопроницаемость и повысить прочность пленок. Включение природных антиоксидантов и антимикробных соединений — таких как эфирные масла орегано, розмарина и гвоздики — в крахмальные и хитозановые покрытия подтверждено в ряде исследований как эффективная стратегия замедления окислительных процессов и подавления роста патогенной микрофлоры в продуктах питания [10,11]. Эти данные позволяют заключить, что развитие композитных биополимерных структур с функциональными добавками является одним из ключевых направлений в области разработки инновационной упаковки для мясных продуктов.

Важным направлением развития упаковочных технологий становится интеграция интеллектуальных и активных функций. Современные упаковки все чаще включают элементы контроля микробиологического статуса продукта, индикаторы свежести, а также механизмы контролируемого высвобождения антисептических веществ.

Применение нано- и микрокомпозитных пленок, металлизированных слоев и многослойных структур позволяет создавать упаковочные системы с высокой селективностью к газам, устойчивостью к влажности и термической стабильностью. Наряду с этим, усиливаются требования к безопасности таких систем, в том числе в части миграции компонентов, токсичности и соответствия международным регламентам безопасности пищевых продуктов.

Несмотря на значительный прогресс, существующие подходы к разработке упаковочных материалов для мясной продукции требуют современных решений по структуре, составу и их барьерным характеристикам, особенно в условиях стремительного развития биотехнологий.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ современных полимерных упаковочных систем, применяемых для мясных продуктов, с акцентом на их структуру, химический состав, барьерные свойства и функциональные возможности.

Материалы и методы исследования

В рамках настоящего исследования применялась методология систематического литературного анализа (systematic literature review, SLR), направленного на идентификацию, отбор и сравнительный анализ современных научных публикаций, посвященных полимерным упаковочным системам,

используемым для хранения и транспортировки мясных продуктов. Основной акцент был сделан на изучении структуры, химического состава, барьерных характеристик, функциональных свойств, а также степени экологической устойчивости этих материалов.

Результаты и обсуждение

Разнообразие современных упаковочных решений для мясных продуктов напрямую связано с широтой применяемых полимерных материалов, их структурными модификациями и функциями, выходящими за рамки простой барьерной защиты. Современные упаковки рассматриваются как интегральный элемент системы обеспечения качества, безопасности и продления срока хранения мяса, особенно в условиях охлажденного или модифицированного хранения. Классификация полимерных упаковочных систем осуществляется с учетом происхождения полимера, его барьерных характеристик, экологических свойств и функциональной направленности.

Наиболее широко используются термопластичные синтетические полимеры нефтехимического происхождения: полиэтилен низкой и высокой плотности, полипропилен, полиэтилентерефталат, а также поливинилхлорид и поливинилиденхлорид. Эти материалы характеризуются прочностью сварного шва, влагостойкостью и термической стабильностью, а в случае сочетания с сополимерами, например, этилена с поливиниловым спиртом, – также и высокой кислородонепроницаемостью. Их основное преимущество – технологичность и возможность создания многослойных структур.

Однако главным недостатком остается экологическая инертность и отсутствие биоразлагаемости, что создает нагрузку на системы утилизации отходов упаковки и не соответствует задачам устойчивого развития. В этой связи все более активно применяются соэкструдированные или ламинированные многослойные пленки, сочетающие в себе механические, барьерные и герметизирующие функции. Исследования, включая работу Wongphan и соавт. (Wongphan, 2024), подтверждают эффективность таких конструкций при упаковке мясной продукции, особенно в условиях вакуумной и газо-модифицированной среды.

Параллельно активно развиваются упаковочные системы на основе биополимеров, получаемых из возобновляемых природных источников. В их число входят полилактид, поли(бутиленадипат-терефталат), крахмал, целлюлоза, хитозан и желатин. Эти материалы рассматриваются как экологически приемлемая альтернатива традиционным пластикам, поскольку они способны разлагаться в условиях компостирования или микробиологического воздействия.

Тем не менее большинство биополимеров в «чистом виде» уступают синтетическим аналогам по таким показателям, как влагостойкость, механическая прочность и термическая стабильность. Поэтому все чаще разрабатываются композиционные системы, в которых биополимерная матрица модифицируется за счет введения функциональных добавок, антиоксидантов и наноструктур.

Применение нанокомпозитов позволяет значительно расширить функциональные возможности упаковки. Обзор Kandeeran и соавт. (Kandeeran, 2021) демонстрирует, что включение наночастиц – например, нано-глин, диоксида титана, оксида цинка или серебра – в биополимерную основу обеспечивает улучшение барьерных характеристик по отношению к кислороду и водяным парам, а также проявляет антимикробный эффект. Такие материалы становятся особенно перспективными в мясной отрасли, где замедление окислительных и микробиологических процессов напрямую связано с безопасностью и сроком хранения продукции. Отечественные исследования подтверждают эффективность подобных решений: Кирш И.А. и соавт. (Кирш, 2024) показали, что полипропиленовый композит с добавлением шунгита обладает антимикробной активностью, продлевая срок хранения охлажденного мяса на 2-3 суток.

На следующем этапе эволюции находятся активные и интеллектуальные упаковочные системы. Активная упаковка определяется как совокупность технологий, предусматривающих введение в материал антиоксидантов, поглотителей влаги, газов и ультрафиолетового излучения. Реализация таких свойств достигается за счет структурирования активных слоев методами послойной сборки (layer-by-layer), окунания, экструзии, литья под давлением, электропрядения и гомогенного эмульгирования.

Выбор технологического подхода задает кинетику высвобождения функциональных агентов и стабильность барьерных характеристик в реальных условиях хранения.

Базовые материалы активных систем включают как синтетические, так и натуральные полимеры; особый интерес представляют съедобные и биоразлагаемые матрицы. Съедобные пленки классифицируются по типу структурного материала на: гидроколлоиды (полисахариды и белки), липиды и композиты. Несмотря на потенциальные риски контаминации при контакте с пищей, их природная биоразлагаемость и возможность выполнения функции утилизации делают такие покрытия перспективными для «зеленых» цепочек поставок.

Биополимерные пленки на основе целлюлозы, крахмала, хитозана и желатина демонстрируют сочетание технологичности и функциональности. Целлюлозные производные (метил-, гидроксипропил-, гидроксипропилметил-, карбоксиметилцеллюлоза) характеризуются глобальной доступностью, экологичностью, невысокой стоимостью и благоприятным влиянием на органолептические показатели. Крахмальные матрицы обеспечивают возобновляемость сырьевой базы, биоразлагаемость и удовлетворительную газонепроницаемость. Хитозан, будучи производным хитина, придает покрытиям выраженные антибактериальные и антиоксидантные свойства при сохранении барьерности по газам. Желатиновые пленки отличает биосовместимость, биоразлагаемость и доступность, при этом их водопоглощение может быть использовано как элемент активной модификации водной активности в системе «продукт – упаковка».

Активные упаковки способны взаимодействовать с продуктом или окружающей средой – поглощать кислород, выделять антисептики, регулировать влажность или замедлять окисление. Интеллектуальные системы, в свою очередь, информируют потребителя о состоянии продукта с помощью встроенных индикаторов, сенсоров или даже беспроводных компонентов. Примером является работа Luo и соавт. (Douaki, 2025; Liu, 2025), где описана автономная упаковка без батареи, способная контролировать свежесть рыбы и запускать высвобождение активных веществ в ответ на повышение концентрации газов, сопутствующих порче. Эта разработка включает в себя растяжимый сенсор, NFC-модуль и систему мониторинга в реальном времени.

Таким образом, современные полимерные упаковочные системы классифицируются не только по материалу, но и по уровню функциональной интеграции. От пассивных синтетических оболочек отрасль перешла к биоразлагаемым, активным и интеллектуальным материалам, отражающим потребности как технологического процесса, так и глобальных экологических вызовов. Выбор упаковки становится стратегическим фактором, определяющим не только качество хранения, но и соответствие продукции требованиям устойчивого развития и потребительским ожиданиям.

Несмотря на широкое распространение синтетических полимеров и многослойных структур, которые до сих пор остаются основой упаковочной индустрии, их ограниченные экологические свойства и низкая утилизируемость создают серьезные проблемы в контексте перехода к принципам устойчивого развития и экономики замкнутого цикла. Международные и национальные регуляторные инициативы, а также усиливающееся внимание потребителей к вопросам экологии стимулируют поиск новых материалов, способных заменить традиционные полимеры, полученные из невозобновляемого нефтехимического сырья.

Одновременно в научных исследованиях все большую популярность приобретает концепция «активной упаковки», предполагающая, что материал может выполнять не только функцию физического барьера, но и активно влиять на состояние продукта за счет контролируемого выделения антимикробных или антиоксидантных агентов, а также посредством сенсорных функций. В этих условиях особый интерес вызывают биополимерные и биоактивные упаковочные системы, которые объединяют два принципа: экологическую совместимость и функциональную активность.

К числу наиболее перспективных биополимеров относятся полилактид, полибутиленадипат-терефталат, полигидроксиалканоаты, а также традиционные полисахариды растительного происхождения – крахмал и целлюлоза. В ряде случаев применяются и биополимеры животного происхождения, такие как желатин и хитозан. Их главная особенность заключается в биоразлагаемости при компостировании, что делает их экологически предпочтительными по сравнению с полиэтиленом

или полипропиленом. Однако в чистом виде такие материалы часто обладают невысокой механической прочностью и низкой влагостойкостью, что ограничивает их практическое применение для длительного хранения мясных продуктов (Wongphan, 2024).

Для преодоления этих ограничений исследователи активно создают композитные структуры, совмещающие несколько полимерных компонентов. Так, PLA и PBAT в смесях с модифицированным крахмалом демонстрируют улучшенный баланс между гибкостью, механической прочностью и скоростью биоразложения. В исследовании, опубликованном в *Food Chemistry*, PLA/PBAT-крахмальные пленки с антибактериальными добавками позволили увеличить срок хранения охлажденной говядины до 14 суток, что сопоставимо с традиционными многослойными синтетическими пленками (Liu, 2025).

Хитозан, получаемый путем деацетилирования хитина, представляет собой особый класс биополимеров, отличающийся выраженными антимикробными свойствами. Он способен ингибировать рост широкого спектра микроорганизмов за счет катионной природы и взаимодействия с клеточными мембранами бактерий. В ряде исследований хитозан применялся как самостоятельное покрытие или в составе многокомпонентных систем. Выявлено, что добавление наноразмерных форм диоксида титана и оксида цинка к хитозановым и крахмальным покрытиям существенно усиливает их барьерные и антимикробные свойства (Kandeepan, 2021).

Особое направление составляет разработка активных упаковок, способных не только пассивно защищать продукт, но и активно влиять на процессы, протекающие в мясном продукте. В таких материалах применяются биологически активные добавки – натуральные антиоксиданты, эфирные масла, антимикробные агенты, наноксиды и биополимерные наноструктуры.

Масштабирование биооснованных решений поддерживается как наличием сырьевой базы (включая использование сельскохозяйственных отходов), так и рыночной динамикой: доля биопластиков в сегменте упаковки уже сопоставима с крупными товарными группами, что экономически обосновывает внедрение биополимеров в промышленность. В качестве примера зрелых практик можно указать многолетнее применение в Японии полисахаридных и белковых пленок: коллагеновые покрытия для колбас снижают утечки, ограничивают изменение цвета и окисление липидов; при обработке охлажденных стейков покрытия частично растворяются и интегрируются с поверхностными слоями, улучшая текстуру и уменьшая потери массы при хранении и размораживании.

Эфирные масла (ЭМ) представляют собой наиболее широко изученную группу биоактивных соединений. Масла орегано, тимьяна, розмарина, корицы, гвоздики и других растений обладают выраженной антимикробной и антиоксидантной активностью. Включение этих соединений в биополимерную матрицу позволяет создавать пленки и покрытия, которые не только защищают мясо от воздействия кислорода, но и подавляют рост патогенной микрофлоры. Систематический обзор, опубликованный в *Food Research International* (Smaoui, 2022), показал, что такие пленки способны замедлять окисление липидов и белков, а также существенно снижать уровень микробной обсемененности при хранении говядины и курицы.

Интерес представляют и современные методы инкапсуляции эфирных масел. Для повышения стабильности и управляемости их высвобождения применяются наноэмульсии и липосомы. Исследование, опубликованное в *International Journal of Food Science and Technology*, показало, что наноэмульгирование эфирных масел позволяет добиться более равномерного распределения активных агентов в биополимерной пленке и контролируемого высвобождения, что повышает эффективность антимикробной защиты (Duong, 2024).

Другим направлением развития являются активные системы с антиоксидантами растительного происхождения. Экстракты зеленого чая, виноградных косточек, куркумина и антоцианинов активно исследуются в качестве добавок в PLA- и крахмальные пленки. Такие материалы демонстрируют не только пролонгацию срока хранения, но и функцию индикаторов свежести, изменяя цвет при сдвиге pH в мясном продукте (Wongphan, 2024).

Внедрение биополимерных и биоактивных упаковочных систем в мясную промышленность связано не только с улучшением качества продукции, но и с решением глобальных задач устойчивого развития. Такие материалы снижают экологический след, создают добавленную ценность за счет

«умных» функций и соответствуют современным запросам потребителей, ориентированных на безопасность и экологичность. Несмотря на ряд ограничений – высокую стоимость производства, чувствительность к влаге и ограниченную механическую прочность, – перспективы дальнейшего совершенствования этих систем связаны с развитием гибридных структур, нанотехнологий и методов управляемого высвобождения активных веществ.

Барьерные свойства упаковочных материалов играют ключевую роль в обеспечении сохранности мясной продукции, так как именно газо- и влагопроницаемость определяют скорость окислительных процессов, развитие микробной обсемененности и изменение органолептических характеристик. Для поддержания стабильности качества продуктов на протяжении всего срока хранения разработчики уделяют особое внимание созданию систем с низкой проницаемостью для кислорода, углекислого газа и водяного пара.

В последние годы интенсивное развитие получили нанокompозитные материалы, в которых полимерная матрица модифицируется с помощью наночастиц. Использование глинистых наночастиц, оксидов металлов или углеродных наноструктур приводит к увеличению диффузионного пути газа и формированию так называемого «эффекта лабиринта», когда молекулы газа вынуждены проходить более длинный и сложный путь через гетерогенную структуру материала. Это существенно снижает газопроницаемость при сохранении механической прочности и прозрачности пленки.

Для мяса и мясных продуктов, обладающих высокой питательной ценностью и, следовательно, предрасположенных к микробиологической порче, ключевым фактором качества остается температурный режим. Перепады температуры в логистике усиливают химические превращения и рост микроорганизмов, нивелируя эффект даже продвинутых барьерных решений. В этой связи активные/съедобные покрытия рационально рассматривать как элемент интегрированной стратегии «материал + холодовая цепь + мониторинг», где функциональные добавки (натуральные антиоксиданты, влагопоглотители, сорбенты летучих аминосоединений) работают совместно с управлением температуры и, при необходимости, с индикаторными/интеллектуальными метками. Обзор Kandeeran и соавт. показывает, что такие нанокompозиты на основе PLA, крахмала и хитозана демонстрируют барьерные характеристики, сопоставимые с традиционными синтетическими многослойными системами, и при этом обладают преимуществом биоразлагаемости, что делает их перспективными для мясной индустрии (Kandeeran, 2021).

Одним из наиболее инновационных направлений стало применение ультратонких покрытий, создаваемых методами послойного осаждения (layer-by-layer deposition). Эти покрытия формируют плотную многослойную структуру, которая обеспечивает ультранизкую газопроницаемость и сохраняет эффективность даже в условиях высокой влажности. Такая технология позволяет отказаться от дорогостоящих EVOH-слоев в барьерных пленках и снизить зависимость от металлизированных покрытий, одновременно обеспечивая высокую гибкость и устойчивость к механическим повреждениям (Gu, 2013).

Особое внимание уделяется разработке мультифазных полимерных систем. Отметим, что многокомпонентные материалы позволяют сочетать свойства различных полимеров и наночастиц, достигая синергетического эффекта. Такие системы обеспечивают низкую газо- и влагопроницаемость, высокую механическую прочность и прозрачность при относительно небольшой толщине упаковки. Важным преимуществом является возможность снижения количества используемого сырья и, как следствие, уменьшения экологической нагрузки. Подобные материалы рассматриваются как наиболее перспективное направление для создания устойчивых барьерных решений в мясной промышленности (Trinh, 2023).

Таким образом, совершенствование барьерных характеристик упаковочных материалов развивается в двух ключевых направлениях. С одной стороны, продолжается оптимизация традиционных упаковочных решений на основе многослойных структур с EVOH и/или металлизированными покрытиями. С другой стороны, стремительно растет интерес к нанокompозитам и ультратонким покрытиям, которые сочетают высокую эффективность с экологической устойчивостью. В перспективе именно гибридные мультифазные системы способны объединить лучшие свойства

существующих технологий и удовлетворить одновременно требования безопасности, функциональности и экологичности.

Применение интеллектуальной упаковки в мясной промышленности обусловлено особенностями сырья, которое подвержено быстрым окислительным и микробиологическим изменениям. В частности, накопление летучих азотистых соединений и продуктов распада белков является индикатором начальных стадий порчи. Использование индикаторов, реагирующих на изменение pH и содержание летучих аминов, позволяет получить наглядную информацию о сроке хранения и безопасности мяса. Выявлено, что встроенные pH-индикаторы эффективно регистрируют изменение свежести в упаковках с модифицированной газовой атмосферой. Авторы отмечают, что такие системы позволяют объективно контролировать срок хранения без разрушения целостности упаковки (Bhadury, 2024).

Дальнейшее развитие концепции связано с созданием многофункциональных индикаторов, реагирующих сразу на несколько факторов порчи. Так, Kwak и соавт. (Kwak, 2025) предложили двухкомпонентный индикатор для мяса, основанный на сочетании pH-чувствительного красителя и реагента на сероводород. Изменение цвета происходило по двум независимым каналам, что повышало достоверность контроля. Для снижения субъективности восприятия был разработан программный модуль мобильного анализа цветовых изменений, позволяющий регистрировать и обрабатывать данные в условиях стандартного освещения (Kwak, 2025).

В дополнение к визуальным индикаторам все более активно внедряются сенсорные системы с цифровым выводом данных. Наиболее перспективным направлением в этом контексте считаются технологии радиочастотной идентификации (RFID), позволяющие контролировать температуру, влажность и состав газовой среды.

Обобщение имеющихся исследований свидетельствует, что интеллектуальная упаковка для мясной продукции также развивается в двух направлениях. Первое связано с совершенствованием химических индикаторов, основанных на изменении оптических свойств при порче продукта. Второе направление предполагает интеграцию современных сенсорных технологий и беспроводной передачи данных для автоматизации мониторинга.

Сравнительный анализ полимерных систем для упаковки мясных продуктов показал, что на сегодняшний день не существует универсального материала, который одновременно удовлетворял бы требованиям к барьерным характеристикам, экологической устойчивости, технологичности и экономической целесообразности. Наиболее широко применяются известные синтетические полимеры и материалы на их основе отличаются хорошими технологическими свойствами и низкой себестоимостью, что объясняет их ведущие позиции на рынке.

Вместе с тем экологическая инертность, трудности сбора и переработки, а также ограниченные возможности для вторичного использования делают их все менее соответствующими современным стандартам устойчивого развития и требованиям по сокращению негативного воздействия на окружающую среду.

Нанокomпозиты и многослойные структуры позволяют достичь оптимального сочетания барьерных характеристик и механической прочности. Такие материалы демонстрируют значительное снижение проницаемости для кислорода и водяного пара, но сохраняют проблему переработки и требуют высоких затрат на внедрение в промышленность.

Активные упаковки, включающие антиоксидантные агенты, эфирные масла или наночастицы металлов, обеспечивают дополнительную защиту от окислительных и микробиологических процессов, тем самым увеличивая срок хранения мясных продуктов. При этом основным ограничивающим фактором остается необходимость строгого контроля миграции активных соединений, наночастиц для соответствия международным регламентам по безопасности.

Интеллектуальные упаковочные системы представляют собой наиболее инновационное направление, позволяющее контролировать свежесть продукта посредством индикаторов pH, сенсоров летучих аминов, датчиков газовой среды и технологий RFID/NFC. Эти решения способны существенно повысить уровень безопасности и прослеживаемости цепочек поставок, однако они пока что находятся

преимущественно на стадии лабораторных испытаний и прототипов. Их ограничивает высокая стоимость сенсорных компонентов и отсутствие единых нормативов.

Для наглядной систематизации ключевых различий между материалами, основные характеристики полимерных материалов приведены в виде таблицы, отражающей их барьерные свойства, функциональные возможности, экологическую устойчивость и технологические ограничения. Таблица составлена одним из соавторов на основе анализа литературных источников и служит инструментом для обобщения сильных и слабых сторон различных групп упаковочных материалов.

Таблица 1. Сравнительные характеристики основных упаковочных систем для мясных продуктов

Материал / система	Барьерные характеристики	Активные функции	Экологичность	Стоимость и технологическая сложность	Аналитический комментарий
Полиэтилен, ПП, ПЭТ, ПВХ	Средняя газо- и влагобарьерность; высокая прочность	Отсутствуют	Не биоразлагаемы, трудно перерабатываемы	Низкая стоимость, высокая технологичность	Основной класс материалов, но экологические ограничения усиливаются
EVONH и металлизированные пленки	Высокая газо- и влагобарьерность, чувствительность к влаге	Отсутствуют	Не биоразлагаемы	Средняя – высокая стоимость	Эффективное барьерное решение, но ограничено условиями переработки
Биополимеры (PLA, крахмал, хитозан, белковые материалы)	Низкая барьерность без модификации	Возможна интеграция антиоксидантов, эфирных масел, антимикробных агентов	Биоразлагаемы, компостируемы	Средняя стоимость, низкая масштабируемость	Перспективны для устойчивых решений, но требуют наномодификации
Нанокompозиты и многослойные структуры	Высокая барьерность за счет эффекта «лабиринта» и комбинации слоев	Возможна интеграция активных веществ	Ограниченная переработка	Высокая технологическая сложность	Наиболее сбалансированное решение, но экологические аспекты остаются проблемой
Активные упаковки	Зависит от основы	Поглощение кислорода, выделение антимикробных веществ, антиоксидантная защита	Зависит от материала-носителя	Средняя – высокая стоимость	Повышают срок хранения, требуют строгого регулирования
Интеллектуальные упаковки	Барьерные свойства вторичны	Индикаторы pH, летучих аминов, газовые	Возможна интеграция с биополимерами	Высокая стоимость, ограниченные	Ключевое направление будущего, но внедрение

		сенсоры, RFID/NFC		промышленные масштабы	затруднено экономическим и и нормативными факторами
--	--	----------------------	--	--------------------------	---

Источник: составлено А.Д. Безруковым.

Системный анализ показывает, что дальнейшее развитие упаковочных решений для мясной продукции связано с интеграцией нескольких подходов: применение биополимеров как устойчивой основы, модификация нанокомпозитами для повышения барьерных свойств и дополнение интеллектуальными сенсорами для мониторинга качества. Только комплексное сочетание этих элементов позволит одновременно обеспечить безопасность, продлить срок хранения, соответствовать экологическим стандартам и сохранить экономическую эффективность.

Несмотря на существенный прогресс в области разработки и внедрения инновационных полимерных систем для упаковки мясных продуктов, остается ряд фундаментальных и прикладных задач, ограничивающих их широкое промышленное использование. Современные исследования показывают значительный потенциал новых материалов, однако далеко не всегда они отвечают требованиям практической реализации. Это связано как с особенностями свойств самих полимеров, так и с нормативными, экономическими и организационными барьерами.

В совокупности интенсивное внедрение активных и биоразлагаемых технологий в пищевую упаковку формирует динамичный рынок. Перспективность направления связывается с использованием натуральных полимеров и включением биологически активных веществ, что позволяет одновременно продлевать срок хранения, поддерживать органолептическое качество и снижать потребность в добавлении консервантов. Такое сочетание экологической и технологической эффективности соответствует актуальным стратегиям устойчивых цепочек поставок в мясопереработке.

Наиболее серьезной проблемой является низкая влагостойкость и механическая нестабильность биополимеров. Материалы на основе полилактида, крахмала, целлюлозы и хитозана демонстрируют удовлетворительные результаты в лабораторных испытаниях, но при длительном хранении мяса в промышленных условиях теряют прочность, подвергаются деформации и изменению барьерных характеристик. Попытки решения этой задачи через введение наноструктурных добавок позволяют частично улучшить массообменные свойства, однако данные о долговременной стабильности таких композитов противоречивы. Недостаточно изучены и процессы взаимодействия наночастиц с компонентами мясной системы, что в ряде случаев вызывает вопросы о безопасности и необходимости более глубоких токсикологических исследований.

Высокая стоимость интеллектуальных упаковочных систем остается не менее значимым фактором, ограничивающим их внедрение. Сенсоры летучих аминов, pH-индикаторы и беспроводные модули на основе RFID или NFC показывают высокую эффективность в контроле свежести, однако производство таких компонентов требует дорогостоящих технологий, а их интеграция в упаковку сопровождается сложностями стандартизации. В большинстве случаев подобные разработки пока не выходят за пределы лабораторных прототипов и пилотных проектов. Для их масштабирования требуется разработка унифицированных методик валидации сенсоров, удешевление производства и создание стандартизированной базы данных, позволяющей корректно интерпретировать показания в условиях реальных логистических цепочек.

Регуляторная база также характеризуется существенными пробелами. Для традиционных и многослойных полимеров действуют стандарты ЕС, США и ЕАЭС, определяющие допустимую миграцию компонентов и порядок сертификации. Для активных и интеллектуальных упаковочных систем подобных единых международных норм пока не существует. Особенно остро стоит проблема гармонизации методов оценки миграции биоактивных веществ – эфирных масел, антиоксидантов и антимикробных агентов. В разных странах применяются различные подходы, что существенно затрудняет вывод новых материалов на международный рынок и ограничивает их коммерциализацию. Без формирования

согласованных стандартов и методических документов активные и интеллектуальные упаковочные системы останутся преимущественно предметом лабораторных исследований или используются в небольших объемах.

Экономическая составляющая исследований также остается недостаточно проработанной. Большинство публикаций сосредоточено на демонстрации технических характеристик упаковочных материалов, в то время как вопросы себестоимости, жизненного цикла и масштабируемости технологий представлены фрагментарно. Практически отсутствует анализ оценки жизненного цикла («life cycle assessment») (LCA), который позволил бы объективно оценить совокупное экологическое и экономическое воздействие новых систем. Это создает разрыв между теоретическими исследованиями и их промышленной реализацией, снижая мотивацию бизнеса к внедрению инновационных решений.

В рамках комплексного подхода предлагается воспроизводимая методика ранжирования с интегральным критерием пригодности упаковочных систем для упаковки мяса и мясных продуктов. Методика опирается на стандартизированные испытания барьерно-механических свойств (ASTM D3985 – OTR; ASTM F1249 – WVTR; ASTM D882 – прочность), учет активных и/или интеллектуальных функций (pH/TVB-N-индикаторы, ТТ/газовые сенсоры, RFID/NFC), а также показатели экологичности (перерабатываемость/компостируемость по EN 13432, доля биоуглерода по ASTM D6866, ориентировочный LCA по ISO 14040/44) и экономической реализуемости (стоимость м², совместимость с типовым оборудованием). Логика признаков согласуется с введенной в работе структурой сравнения (барьер, функции, экология, экономика; см. табл. 1) и с разделами о «умной»/активной упаковке (pH-индикаторы, RFID/NFC).

Предлагается проводить учет составляющих свойств, чтобы оценить уровень качества упаковочной системы:

- барьерных и механических свойств (блок В);
- функциональность (F);
- экологичность (блок Е);
- экономика и технологичность (блок С).

Пригодность и перспективность оценивают по интегральному критерию КП, который в данной работе представляет сумму свойств. Оценка каждого свойства или блока проводится по 5-балльной шкале с учетом коэффициента весомости.

1. Барьерно-механический блок (В)

OTR, см³·м⁻²·сут (23 °С; 0 % RH): 5 — ≤ 1; 4 — > 1–5; 3 — > 5–10; 2 — > 10–100; 1 — > 100.

WVTR, г·м⁻²·сут (38 °С; 90 % RH): 5 — ≤ 1; 4 — > 1–3; 3 — > 3–10; 2 — > 10–20; 1 — > 20.

Прочность на растяжение, МПа (MD/TD, ASTM D882): 5 — ≥ 80; 4 — 60–< 80; 3 — 40–< 60; 2 — 20–< 40; 1 — < 20.

Блок В дает оценку как среднее из трех показателей с округлением до 0,5 баллов.

2. Функциональность (F) – сумма подтвержденных признаков с пределом 5 баллов: активные: O₂-поглотитель (1), антимикробный эффект на мясных матрицах (1), антиоксидант/ингибирование окисления (1); интеллектуальные: pH/TVB-N-индикатор (1), ТТ/газовый сенсор (1), RFID/NFC (1). F имеет значение от 0 (нет функции) до 5. Функциональность соответствует описанию систем в тексте и табл. 1.

3. Экологичность (Е) – средний балл для трех субпозиций. Для мясной упаковки ключевыми остаются требования устойчивого развития и циклической экономики:

– конец жизненного цикла: 5 – массовая переработка или home-compost; 4 – industrial-compost (EN 13432) или прием инфраструктурой; 3 – ограниченная переработка; 2 – затруднена (многослойная/металлизированная); 1 – не перерабатывается на практике;

– биосырье (ASTM D6866), % биоуглерод: 5 – ≥ 80; 4 — 50–< 80; 3 – 20–< 50; 2 – 1–< 20; 1 – 0;

– углеродный след (база сравнения – полилактид), кг CO₂-экв/м²: 5 – ≤ 0,20; 4 – > 0,20–0,40; 3 – > 0,40–0,80; 2 – > 0,80–1,20; 1 – > 1,20.

4. Экономика и технологичность (С) — среднее двух субпозиций:

- стоимость пленки/ламината, руб./м²: 5 – ≤ 40; 4 – > 40–80; 3 – > 80–160; 2 – > 160–320; 1 – > 320;
 - совместимость с оборудованием: 5 – без модификаций и падения скорости; 4 – минимальная переналадка; 3 – снижение скорости ≥ 15 %; 2 – спецоборудование; 1 – пилот/лаборатория.
- Баллы проставляются в соответствии с положениями о технологичности/стоимости в тексте и табл. 1.

В итоге проводится расчет интегрального критерия пригодности материала и классификация уровня качества. Критерий пригодности (КП) упаковки для мясной продукции $КП = В + F + E + С$. Конкретные численные значения для некоторых исследованных материалов и результаты расчетов, проведенных нами, будут представлены в дальнейшей работе. Численные значения берутся из обзоров и прикладных работ по биополимерам, нанокompозитам и «умной» упаковке, а также из структурированной таблицы 1 данной работы.

Проведенный сравнительный анализ полимерных упаковочных систем для мясной продукции подтвердил отсутствие универсального решения, одновременно удовлетворяющего требованиям барьерной защиты, функциональности, экологической устойчивости и технолого-экономической целесообразности. Предложенная методика балльного ранжирования с интегральным показателем КП обеспечивает количественную сопоставимость альтернатив и позволяет выделить наиболее сбалансированные варианты для этапов пилотирования и внедрения.

Перспективы дальнейших исследований связаны с необходимостью разработки биоразлагаемых влагостойких композитов, устойчивых к условиям длительного хранения мясных продуктов, созданием гибридных систем, сочетающих барьерные, активные и интеллектуальные функции, а также внедрением сенсорных технологий с низкой себестоимостью, позволяющих интегрировать упаковку в системы цифровой прослеживаемости и управления логистикой. Важным направлением является формирование национальных и международных стандартов, регулирующих миграцию активных веществ и долговременную стабильность упаковочных систем. Только при комплексном подходе, объединяющем достижения материаловедения, пищевой технологии, экономики и нормативного регулирования, станет возможным полноценное внедрение инновационных упаковочных систем в мясную промышленность.

Несмотря на то, что представленное исследование сфокусировано на упаковочных решениях для мясной продукции, его фундаментальные принципы и технологические подходы обладают значительным потенциалом для адаптации и внедрения в хлебопекарной промышленности. Хлебобулочные изделия, подобно мясу, представляют собой сложную биологическую систему, подверженную процессам порчи, однако их механизмы и ключевые факторы деградации имеют свою специфику. Основными вызовами при хранении хлеба и выпечки являются не столько бактериальная порча, сколько черствение, плесневение, потеря аромата и изменение текстурных характеристик, связанных с миграцией влаги. Таким образом, технологии, описанные в обзоре – биополимеры, активные и интеллектуальные системы – могут быть успешно переориентированы для решения этих задач, открывая новые горизонты для увеличения сроков годности и сохранения потребительских качеств хлебобулочных изделий.

Центральной проблемой в сохранении свежести хлебопекарной продукции является управление влажностью. Процесс черствения, известный как ретроградация крахмала, напрямую связан с перераспределением влаги внутри продукта: из клейковины в крахмал и последующей его кристаллизацией. Этот процесс приводит к уплотнению мякиша, потере эластичности и ухудшению вкусовых качеств. Традиционная полиэтиленовая или полипропиленовая упаковка, обладая низким коэффициентом паропроницаемости (WVTR), эффективно замедляет испарение влаги с поверхности изделия, но одновременно создает внутри упаковки замкнутую среду с высокой влажностью. Это, в свою очередь, формирует идеальные условия для развития плесневых грибов, в первую очередь родов *Aspergillus*, *Penicillium* и *Rhizopus*, которые являются главным фактором микробиологической порчи хлеба. Следовательно, идеальная упаковка для хлеба должна обладать селективными барьерными свойствами: ограничивать потерю влаги до определенного уровня, чтобы замедлить черствение, но при этом позволять «дышать» продукту для предотвращения конденсации и роста плесени.

В этом контексте биополимеры, рассмотренные в исследовании, представляют особый интерес. Пленки на основе полилактида (PLA) характеризуются умеренной паропроницаемостью, что может оказаться оптимальным для баланса между сохранением влаги и предотвращением плесневения. Более того, PLA поддается модификации для создания микроперфорированных структур, позволяющих точно регулировать газо- и влагообмен. Материалы на основе крахмала, которые в чистом виде часто обладают высокой гигроскопичностью, могут быть скомбинированы с гидрофобными биополимерами, такими как поли(бутиленадипат-терефталат) (PBAT), для создания композитов с заданным уровнем WVTR. Такие гибридные пленки, упомянутые в контексте мясных продуктов, могут быть спроектированы специально под требования различных видов выпечки – от сдобных булочек, требующих максимального удержания влаги, до хлеба с хрустящей корочкой, для которого важен отвод избыточного пара.

Применение активных упаковочных систем в хлебопекарной отрасли открывает еще более широкие возможности. Вместо того чтобы пассивно регулировать влажность, упаковка может активно вмешиваться в процессы, происходящие внутри. Наиболее перспективным направлением является интеграция антимикробных, а точнее, противогрибковых (фунгицидных) агентов. Эфирные масла, такие как масло корицы (содержащее коричный альдегид), тимьяна (тимол) или гвоздики (эвгенол), доказавшие свою эффективность против бактерий на мясе, также демонстрируют выраженную активность против плесневых грибов. Инкапсуляция этих масел в биополимерную матрицу (например, хитозановую или крахмальную) позволит обеспечить контролируемое высвобождение летучих активных компонентов в газовую фазу упаковки. Это создаст внутри пакета защитную атмосферу, подавляющую рост спор плесени на поверхности хлеба, что может значительно продлить срок его годности без необходимости добавления консервантов непосредственно в тесто. Хитозан, как полимерная основа, сам по себе обладает фунгистатическими свойствами, что делает его идеальным кандидатом для создания таких активных систем.

Другим важным вектором развития активной упаковки для хлеба является использование поглотителей кислорода и этаноловых эмиттеров. Кислород, хотя и не является первостепенным фактором порчи для большинства видов хлеба, способствует окислению липидов в сдобных и жиросодержащих изделиях (например, кексах, печенье, слоеной выпечке), приводя к появлению прогорклого привкуса. Интеграция поглотителей кислорода в виде саше или активного слоя в многослойной пленке поможет сохранить свежесть таких продуктов. Этаноловые эмиттеры – небольшие пакетики, выделяющие пары этилового спирта, – являются еще одним эффективным и безопасным средством для подавления роста плесени. Упаковка, способная самостоятельно генерировать и поддерживать необходимую концентрацию паров этанола, представляет собой высокотехнологичное решение для промышленного производства хлеба с длительными сроками хранения.

Концепция интеллектуальной упаковки, подробно описанная для мясных продуктов, также полностью применима к хлебопекарной промышленности, но с адаптацией к специфическим маркерам порчи. Вместо сенсоров летучих аминов, сигнализирующих о распаде белков, для хлеба могут быть разработаны индикаторы, реагирующие на летучие органические соединения, выделяемые плесенью, например, 1-октен-3-ол, который имеет характерный грибной запах. Изменение цвета такого индикатора на этикетке могло бы визуально предупреждать потребителя о начале микробиологической порчи еще до того, как плесень станет видимой. Также перспективны индикаторы влажности, интегрированные в упаковку. Они могли бы показывать, не была ли нарушена герметичность упаковки, что привело к потере влаги и ускоренному черствению. Для замороженных хлебобулочных полуфабрикатов (теста, частично выпеченных изделий) неocenимую пользу принесут индикаторы времени и температуры (ТТИ), которые отслеживают соблюдение холодной цепи и гарантируют качество продукта после разморозки и выпекания.

Предложенная в исследовании методика интегральной оценки пригодности упаковочных систем (КП) может быть легко адаптирована для хлебопекарной отрасли. При расчете критерия КП для упаковки хлеба потребуется пересмотреть весовые коэффициенты в каждом блоке. В барьерно-механическом блоке (В) ключевым параметром станет паропроницаемость (WVTR), в то время как кислородопроницаемость (OTR) будет менее значима для большинства изделий, за исключением

жиросодержащих. В блоке функциональности (F) наивысший балл получают системы с подтвержденным антимикробным (противоплесневым) эффектом, а также с функциями регулирования влажности. Экологический (E) и экономико-технологический (C) блоки останутся универсальными, так как требования к биоразлагаемости, перерабатываемости, стоимости и совместимости с оборудованием являются общими для всей пищевой промышленности. Такой адаптированный подход позволит производителям хлебобулочных изделий объективно сравнивать различные инновационные упаковочные решения и выбирать наиболее сбалансированный вариант, исходя из типа продукта, требуемого срока годности и рыночного позиционирования.

Внедрение гибридных упаковочных систем, сочетающих лучшие свойства различных технологий, является наиболее перспективной стратегией. Например, для упакованного нарезанного хлеба можно представить биоразлагаемую многослойную пленку на основе PLA и модифицированного крахмала, обеспечивающую оптимальный влагообмен. Внутренний слой этой пленки может содержать инкапсулированное эфирное масло корицы для подавления роста плесени. На внешнюю сторону упаковки может быть нанесен интеллектуальный индикатор, меняющий цвет при обнаружении метаболитов плесневых грибов. Такая комплексная система позволит не только значительно увеличить срок хранения продукта, но и повысить его безопасность, снизить экологический след и предоставить потребителю наглядную информацию о свежести. Для хрустящих продуктов, таких как крекеры или вафли, идеальным решением может стать нанокompозитный биополимерный материал с ультранизкой паропроницаемостью, дополненный саше-влагопоглотителем внутри упаковки для гарантии сохранения хрустящей текстуры на протяжении всего срока годности.

Заключение

Проведен сравнительный обзор современных полимерных систем для упаковки мясной продукции, который показал, что синтетические материалы нефтехимического происхождения по-прежнему сохраняют доминирующее положение благодаря низкой себестоимости и стабильным технологическим свойствам, однако их экологическая инертность и трудности переработки существенно ограничивают перспективы дальнейшего использования. Многослойные конструкции с барьерными слоями EVOH и металлизированными покрытиями обеспечивают высокий уровень защиты от кислорода и влаги, но их применение связано с высокой стоимостью и ограниченной переработкой.

Биополимеры на основе полилактида, крахмала, целлюлозы и хитозана представляют собой экологически предпочтительное решение, однако их практическое использование в мясной промышленности осложнено низкой механической прочностью и повышенной гигроскопичностью. Наиболее перспективным направлением является создание биокompозитов с наноструктурными добавками, что позволяет достигать компромисса между экологичностью и эксплуатационными характеристиками.

Активные упаковочные системы с натуральными антиоксидантами и антимикробными агентами демонстрируют эффективность в увеличении срока хранения мяса, однако их внедрение сдерживается необходимостью строгого контроля миграции функциональных соединений и отсутствием гармонизированных международных стандартов. Интеллектуальные системы, включающие сенсорные элементы и беспроводные технологии, обеспечивают мониторинг свежести и безопасности продукции в реальном времени, но пока остаются преимущественно на стадии прототипов из-за высокой стоимости и отсутствия нормативной базы.

Таким образом, универсального решения, сочетающего оптимальные барьерные, функциональные, экологические и экономические свойства, на данный момент не существует. Развитие упаковочных систем для мясной продукции должно идти по пути создания гибридных решений, в которых биополимерная основа сочетается с нанокompозитными модификаторами и интеллектуальными сенсорами. Комплексный подход, предложенный в работе, переводит разнородные характеристики упаковочных систем в единую нормированную шкалу и агрегирует их в интегральный показатель пригодности (КП). Он опирается на четыре взаимодополняющих блока – барьерно-механический, функциональный, экологический и экономико-технологический – обеспечивая сопоставимость и

ранжирование альтернатив, что позволяет выделять наиболее сбалансированные материалы для последующего внедрения и использования.

Список литературы

1. Упаковочные материалы для мясных продуктов на основе полимеров и шунгита // Мясная индустрия. 2024. № 1. С. 48-52.
2. Bhadury D. Application of on-pack pH indicators to monitor freshness of modified atmospheric packaged raw beef // Food quality and safety. 2024. Vol. 8. P. 21.
3. Douaki A. Battery-free, stretchable and autonomous smart packaging // Advanced science. 2025. Vol. 12. № 22. Art. 2417539.
4. Duong T.H. Nanoengineered sustainable antimicrobial packaging: Integrating essential oils into polymer matrices to combat food waste // International journal of food science and technology. 2024. Vol. 59. № 9. pp. 5887-5901.
5. Daescu D.I. Intelligent biopolymer-based films: Promising new solutions for food packaging applications // Polymers. 2024. Vol. 16. № 16. pp. 22-56.
6. Gonzalez-Lopez M. Current trends in biopolymers for food packaging: a review // Frontiers in sustainable food systems. 2023. Vol. 7. Art. 1225371.
7. Gu J.E. Molecular layer-by-layer assembled thin-film composite membranes for water desalination // Advanced materials. 2013. Vol. 25. № 34. pp. 4778-4782.
8. Kandeepan G. Biodegradable nanocomposite packaging films for meat and meat products: A review // Journal of packaging technology and research. 2021. Vol. 5. № 3. pp. 143-166.
9. Kwak M., Moh C. M., Min S. C. Development of a dual-system freshness indicator and mobile application for determining beef freshness using a colorimetric system // Food science and biotechnology. 2025. Vol. 34. № 10. pp. 2207-2215.
10. Liu X. Development of antibacterial starch-based PLA/PBAT active packaging films for enhanced beef preservation // Food chemistry. 2025. pp. 145-804.
11. Smaoui S. Application of essential oils in meat packaging: A systemic review of recent literature // Food control. 2022. Vol. 132. pp. 108-566.
12. Tomic A., Sovljanski O., Erceg T. Insight on incorporation of essential oils as antimicrobial substances in biopolymer-based active packaging // Antibiotics. 2023. Vol. 12. № 9. pp. 14-73.
13. Trinh B.M., Chang B.P., Mekonnen T.H. The barrier properties of sustainable multiphase and multicomponent packaging materials: A review // Progress in materials science. 2023. Vol. 133. pp. 71-101.
14. Uysal-Unalan I. Bioplastic packaging for fresh meat and fish: Current status and future direction on mitigating food and packaging waste // Trends in food science & Technology. 2024. Vol. 152. pp. 104-660.
15. Wongphan P. Unveiling the future of meat packaging: Functional biodegradable packaging preserving meat quality and safety // Polymers. 2024. Vol. 16. № 9. pp. 12-32.
16. Zhang J. Review of Recent Advances in Intelligent and Antibacterial packaging for meat quality and safety // Foods. 2025. Vol. 14. № 7. pp. 11-57.

Characterization and comparison of polymer systems in the production of meat packaging

Artyom D. Bezrukov

PhD student

Plekhanov Russian University of Economics

Moscow, Russia

Bezrukov.A@edu.rea.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Tatiana I. Chalykh

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of the Basic Department of Quality Industry
Plekhanov Russian University of Economics

Moscow, Russia

Professor of the Department of Industrial Design, Packaging Technology and Expertise

Russian University of Biotechnology

Moscow, Russia

tchalykh.ti@rea.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 25.04.2025

Accepted 11.05.2025

Published 30.06.2025

UDC 678.7

EDN COQIWZ

VAK 4.3.3. Food systems (technical sciences)

OECD 02.11.JY. FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

Abstract

The article presents a comparative review of polymer packaging solutions used for meat products. The main groups of materials are considered, including biopolymers based on renewable raw materials, nanocomposites, active and intelligent packaging solutions. Particular attention is paid to their structure, chemical composition and barrier characteristics with respect to oxygen, moisture and microbiological agents. An analysis of the functional capabilities of the systems is carried out - from creating a controlled gas environment to integrating antioxidant and antimicrobial components, as well as sensory indicators of freshness. Based on the analysis, the need to develop hybrid packaging systems that combine environmental friendliness, high barrier properties and intelligent functions is substantiated. Evaluation criteria for comparing the quality level of such materials are proposed.

Keywords

polymer package, meat products, barrier properties, active packaging, intelligent packaging.

References

1. Packaging materials for meat products based on polymers and shungite // The meat industry. 2024. № 1. pp. 48-52.
2. Bhadury D. Application of on-pack pH indicators to monitor freshness of modified atmospheric packaged raw beef // Food quality and safety. 2024. Vol. 8. P. 21.
3. Douaki A. Battery-free, stretchable and autonomous smart packaging // Advanced science. 2025. Vol. 12. № 22. Art. 2417539.
4. Duong T.H. Nanoengineered sustainable antimicrobial packaging: Integrating essential oils into polymer matrices to combat food waste // International journal of food science and technology. 2024. Vol. 59. № 9. pp. 5887-5901.
5. Daescu D.I. Intelligent biopolymer-based films: Promising new solutions for food packaging applications // Polymers. 2024. Vol. 16. № 16. pp. 22-56.
6. Gonzalez-Lopez M. Current trends in biopolymers for food packaging: a review // Frontiers in sustainable food systems. 2023. Vol. 7. Art. 1225371.
7. Gu J.E. Molecular layer-by-layer assembled thin-film composite membranes for water desalination // Advanced materials. 2013. Vol. 25. № 34. pp. 4778-4782.

8. Kandeepan G. Biodegradable nanocomposite packaging films for meat and meat products: A review // *Journal of packaging technology and research*. 2021. Vol. 5. № 3. pp. 143-166.
9. Kwak M., Moh C.M., Min S.C. Development of a dual-system freshness indicator and mobile application for determining beef freshness using a colorimetric system // *Food science and biotechnology*. 2025. Vol. 34. № 10. pp. 2207-2215.
10. Liu X. Development of antibacterial starch-based PLA/PBAT active packaging films for enhanced beef preservation // *Food chemistry*. 2025. pp. 145-804.
11. Smaoui S. Application of essential oils in meat packaging: A systemic review of recent literature // *Food control*. 2022. Vol. 132. pp. 108-566.
12. Tomic A., Sovljanski O., Erceg T. Insight on incorporation of essential oils as antimicrobial substances in biopolymer-based active packaging // *Antibiotics*. 2023. Vol. 12. № 9. pp. 14-73.
13. Trinh B.M., Chang B.P., Mekonnen T.H. The barrier properties of sustainable multiphase and multicomponent packaging materials: A review // *Progress in materials science*. 2023. Vol. 133. pp. 71-101.
14. Uysal-Unalan I. Bioplastic packaging for fresh meat and fish: Current status and future direction on mitigating food and packaging waste // *Trends in food science & Technology*. 2024. Vol. 152. pp. 104-660.
15. Wongphan P. Unveiling the future of meat packaging: Functional biodegradable packaging preserving meat quality and safety // *Polymers*. 2024. Vol. 16. № 9. pp. 12-32.
16. Zhang J. Review of recent advances in intelligent and antibacterial packaging for meat quality and safety // *Foods*. 2025. Vol. 14. № 7. pp. 11-57.

ИНФОРМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

Применение поведенческих профилей и детектирования команд на основе DPI для защиты от несанкционированных изменений параметров НКУ на пищевых производствах

Эньдо Ся

Специалист-эксперт
Белорусский государственный университет
Минск, Беларусь
enduoxia@gmail.com
ORCID 0000-0000-0000-0000

Хуньянь Хэ

Специалист-эксперт
Белорусский государственный университет
Минск, Беларусь
hehy9527@gmail.com
ORCID 0000-0000-0000-0000

Линьда Фань

Специалист-эксперт
Белорусский государственный университет
Минск, Беларусь
fld420605545@gmail.com
ORCID 0000-0000-0000-0000

Ифань Сюй

Специалист-эксперт
Белорусский государственный университет
Минск, Беларусь
yfx1634159614@gmail.com
ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 22.04.2025

Принята 03.05.2025

Опубликована 30.06.2025

УДК 004.89

EDN DIQBTD

ВАК 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)
OECD 02.02.AC. AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

Аннотация

В статье рассматривается обеспечение киберустойчивости низковольтных комплектных устройств (НКУ) в пищевой промышленности в условиях роста сетевой связности, обусловленного концепциями Индустрии 4.0 и сближением операционных и информационных технологий, при котором НКУ перестают быть изолированным физическим интерфейсом и превращаются в уязвимую точку воздействия на рецептурные и режимные параметры технологических линий (пастеризация, стерилизация, управление насосными группами и термоагрегатами). Анализируется ограниченность традиционных сигнатурных и пороговых средств контроля, не распознающих злоупотребление

легитимными командами промышленных протоколов и порождающих избыточные ложные тревоги при переходных режимах (CIP-мойка, переналадка, пусконаладка), что подрывает доверие операторов к защитным системам. Предложен и верифицирован подход, сочетающий глубокую инспекцию пакетов (DPI) с поведенческим профилированием на основе машинного обучения, позволяющий извлекать семантику команд на уровне регистров Modbus TCP и объектов Profinet IO и сопоставлять сетевые действия с контекстом производственного цикла. Описана экспериментальная реализация на гибридном стенде с ПЛК Siemens S7-1500 и Schneider Electric Modicon M340 и высокопроизводительным захватом трафика; сформирован длительный массив сетевого обмена, включающий штатные и нестандартные режимы, а также синтетически воспроизведены 15 классов атак, включая инъекции команд, MITM и replay-сценарии. Показаны количественные характеристики обнаружения: высокая результативность для прямой записи уставок и инъекций команд при миллисекундных временах реакции, при этом наибольшую сложность представляют replay-атаки, требующие накопления исторического контекста и демонстрирующие повышенную долю пропусков и рост времени обнаружения. Проанализировано влияние DPI-шлюза на задержки и джиттер: при активной блокировке задержки возрастают нелинейно с нагрузкой, однако остаются в пределах типовых допусков Modbus TCP; одновременно отмечается рост вариативности задержек при пиковом трафике как фактор риска для контуров реального времени. Отдельно рассмотрена неоднородность ложных блокировок по режимам: минимальные значения характерны для стационарного производства, тогда как в режимах с высокой энтропией команд (CIP, переналадка, пусконаладка) требуется контекстно-зависимая смена профилей. Итоговая интерпретация результатов указывает на практическую применимость гибридной схемы, где детерминированные правила дополняют вероятностные модели аномалий, обеспечивая высокую релевантность выявления несанкционированных изменений параметров НКУ при приемлемой вычислительной цене и требованиях к интерпретируемости решений для персонала.

Ключевые слова

глубокая инспекция пакетов (DPI), поведенческое профилирование, промышленная кибербезопасность, Modbus TCP и Profinet, низковольтные комплектные устройства.

Введение

Современная парадигма построения автоматизированных систем управления технологическими процессами в пищевой промышленности претерпевает фундаментальные изменения, обусловленные повсеместным внедрением концепций Индустрии 4.0 и конвергенцией операционных и информационных технологий, что неизбежно приводит к размыванию периметра безопасности критически важных производственных сегментов. Низковольтные комплектные устройства (НКУ), являющиеся физическим интерфейсом между логическими контроллерами и исполнительными механизмами, традиционно рассматривались как изолированные элементы, не требующие сложных механизмов киберзащиты, однако в условиях роста связности сетей они становятся вектором для целенаправленных атак, способных вызвать необратимые изменения рецептурных параметров и нарушение режимов пастеризации или стерилизации. Архитектурные уязвимости промышленных протоколов передачи данных, изначально разработанных без учета требований к аутентификации и шифрованию, позволяют злоумышленникам (Степанцов, 2007) внедрять модифицированные пакеты управления непосредственно в трафик полевого уровня, что в контексте пищевого производства чревато не только экономическими потерями, но и угрозой биологической безопасности продукции. Существующие сигнатурные методы защиты, широко применяемые в корпоративных сетях, демонстрируют низкую эффективность (Кузнецов, 2015) против атак, использующих легитимные команды протоколов в нелегитимной последовательности или в недопустимые временные интервалы, что актуализирует задачу разработки адаптивных механизмов на основе глубокого анализа пакетов (DPI) и поведенческого профилирования.

Проблематика выявления несанкционированных изменений параметров НКУ усугубляется стохастической природой технологических процессов в пищевой отрасли, где вариативность

показателей давления, температуры и расхода сырья может быть обусловлена как штатным функционированием оборудования в различных режимах, так и началом деструктивного воздействия на систему. Стандартные средства мониторинга, опирающиеся на статические пороговые значения, часто генерируют высокий уровень ложных срабатываний (Гончарова, 2015) при переходных процессах, например, во время промывки оборудования (CIP-мойка) или смены ассортимента, что заставляет операторов отключать системы защиты или игнорировать предупреждения. Необходимость перехода к динамическому анализу состояния системы требует внедрения интеллектуальных алгоритмов, способных формировать «цифровой слепок» нормального поведения технологического участка и выявлять аномалии на основе отклонений от построенной многомерной модели, учитывающей корреляции между управляющими командами и физическим откликом системы. Применение технологий DPI (Боровлев, 2000) в данном контексте позволяет декомпозировать сетевой трафик до уровня значений регистров Modbus или тегов Profinet, извлекая семантическую нагрузку команд и сопоставляя ее с текущим контекстом производственного цикла, что невозможно при использовании классических межсетевых экранов.

Ключевым аспектом исследования является гипотеза о том, что интеграция модуля глубокой инспекции пакетов с подсистемой поведенческого анализа на базе машинного обучения позволит обеспечить детектирование атак, направленных на подмену параметров НКУ, с задержкой, не превышающей критическое время реакции технологического процесса, при сохранении вероятности ошибок первого и второго рода (Запорожцев, 2014) в приемлемых диапазонах. Разработка подобной системы требует детального изучения статистических характеристик промышленного трафика на действующих пищевых предприятиях, а также моделирования векторов атак, специфичных для контроллеров и частотных преобразователей, управляющих насосными группами и термоагрегатами. Особое внимание уделяется (Мурадов, 2003) вопросу интерпретируемости принимаемых решений, так как в условиях реального производства технолог или оператор должны понимать причину блокировки управляющей команды для оперативного принятия мер по восстановлению штатного режима работы. Математическое описание профилей нормального поведения должно базироваться на методах, устойчивых к зашумленным данным, поскольку электромагнитная обстановка в цехах пищевых производств характеризуется высоким уровнем помех, влияющих на целостность передаваемых пакетов.

Материалы и методы исследования

Эмпирическая база исследования формировалась на основе гибридного стенда, имитирующего участок высокотемпературной обработки молока, включающего в себя программируемые логические контроллеры (ПЛК) серии Siemens S7-1500 и Schneider Electric Modicon M340, управляющие частотными преобразователями и блоками НКУ через промышленные коммутаторы с функцией зеркалирования трафика. Для сбора эталонных наборов данных была организована непрерывная запись сетевого обмена по протоколам Modbus TCP и Profinet IO в течение 45 календарных дней на действующем пищевом предприятии, что позволило накопить массив данных объемом более 2,4 терабайта, содержащий информацию о 145 миллионах пакетов, охватывающих все штатные режимы работы, включая пусконаладочные операции, аварийные остановы и плановое техническое обслуживание. В качестве инструментария для захвата и первичной обработки трафика использовались модифицированные библиотеки (Десницкий, 2007) libpcap и специализированные анализаторы Wireshark с кастомными диссекторами, разработанными для извлечения проприетарных полей данных, используемых в управлении конкретными моделями НКУ. Разметка данных для обучения моделей осуществлялась полуавтоматическим методом с привлечением технологов производства, которые верифицировали временные метки начала и окончания различных фаз технологического цикла.

Для моделирования несанкционированных воздействий был разработан генератор атак, способный инжектировать в сеть пакеты с модифицированными полями Function Code и Register Address, а также воспроизводить атаки типа «человек посередине» (MITM) и replay-атаки с изменением временных меток (Крахмальский, 2025), что позволило сформировать тестовую выборку, содержащую

15 различных классов аномалий. Программная реализация модуля DPI базировалась на языке C++ для обеспечения минимальной латентности обработки пакетов, а подсистема поведенческого анализа реализовывалась на Python с использованием библиотек Scikit-learn и TensorFlow. В качестве математического аппарата для построения профилей нормального поведения применялись ансамблевые методы, включая изолирующий лес (Isolation Forest) и одноклассовый метод опорных векторов (One-Class SVM), которые обучались на векторах признаков (Знмяченко, 2011), сформированных из статистических метрик межпакетных интервалов, энтропии полезной нагрузки и последовательности управляющих команд. Оценка эффективности детектирования проводилась с использованием метрик точности (Precision), полноты (Recall) и F1-меры, а также путем анализа матрицы ошибок для каждого класса атак.

Особое внимание в методологии было уделено валидации устойчивости алгоритмов к джиттеру сети и потере пакетов, характерных для загруженных промышленных сегментов, для чего в экспериментальную среду вводились искусственные задержки и искажения с использованием инструментария Traffic Control (tc) в среде Linux. Всего было проведено 500 серий экспериментов с варьированием параметров интенсивности фона и типов атак, что обеспечило статистическую значимость полученных результатов (Аникеев, 2014) и позволило построить доверительные интервалы для ключевых показателей эффективности. Аппаратная часть экспериментального стенда включала сервер на базе архитектуры x86-64 с высокопроизводительными сетевыми картами, поддерживающими технологию DPDK (Data Plane Development Kit), что позволило исключить влияние операционной системы на скорость захвата пакетов и обеспечить обработку трафика на скорости канала. Для верификации корректности математической обработки данных использовались параллельные вычисления в среде MATLAB, результаты которых сопоставлялись с выходными данными разработанного программного комплекса (Демкин, 2024) для исключения ошибок реализации алгоритмов.

Результаты и обсуждение

Внедрение механизмов глубокой инспекции пакетов в контур управления технологическим процессом неизбежно сопряжено с необходимостью поиска баланса между глубиной анализа и вносимой задержкой, которая может критически повлиять на устойчивость системы реального времени. На первоначальном этапе анализа данных была рассмотрена зависимость эффективности обнаружения аномалий, связанных с попытками изменения уставок температурных режимов в контроллерах НКУ, от выбранного набора признаков, извлекаемых DPI-сенсором. Традиционные подходы, оперирующие лишь заголовками пакетов, демонстрируют недостаточность (Краснопевцев, 2009) в условиях, когда злоумышленник использует легитимные каналы управления, но с деструктивными параметрами. В связи с этим была проведена серия тестов, направленных на выявление корреляции между сложностью применяемых правил фильтрации и вероятностью пропуска целевой атаки, результаты которой структурированы по типам воздействий (табл. 1).

Таблица 1. Показатели эффективности детектирования аномалий при различных векторах атак на параметры НКУ

Тип вектора атаки	Общее количество инъекций	Успешно детектировано	Вероятность пропуска (FN Rate)	Среднее время обнаружения, мс
Изменение уставок (Write Single Register)	1450	1423	0,0186	4,231
Инъекция команд (Force Multiple Coils)	1280	1248	0,0250	5,112
Replay-атака (повтор последовательности)	985	921	0,0649	12,874

Сканирование адресного пространства	2100	2096	0,0019	1,056
Флуд запросами (DoS прикладного уровня)	3500	3489	0,0031	0,892

Анализ числовых данных, отражающих результативность детектирования, свидетельствует о неравномерности распределения ошибок второго рода в зависимости от семантической сложности атаки, где наибольшую трудность для алгоритма представляют Replay-атаки, характеризующиеся вероятностью пропуска на уровне 6,49%, что объясняется полным соответствием структуры пакета легитимному протоколу. Математическая проверка полученных долей показывает, что для векторов, связанных с прямой записью регистров, система достигает надежности, описываемой коэффициентом детектирования 0,9814, при этом дисперсия времени обнаружения для данных типов атак составляет 0,45 мс², что указывает на детерминированность алгоритма обработки. Существенное различие в среднем времени обнаружения между сканированием (1,056 мс) и Replay-атаками (12,874 мс) обусловлено необходимостью накопления исторического контекста (Магомедова, 2009) для выявления временных несоответствий в последнем случае, тогда как сигнатурный анализ заголовков при сканировании выполняется практически мгновенно. Статистическая значимость различий подтверждена расчетом t-критерия Стьюдента, значение которого для пар сравниваемых выборок превышает критическое значение 2,58 для уровня значимости 0,01, что подтверждает гипотезу о фундаментальном различии вычислительной сложности алгоритмов выявления для разных классов угроз.

Следующим этапом исследования стала оценка влияния внедренного DPI-шлюза на временные характеристики прохождения управляющих сигналов, что является критичным параметром для синхронизированных приводов в пищевых линиях. Любая дополнительная задержка, вносимая средствами защиты, должна быть детерминированной и не выходить за пределы тайм-аутов протокола, иначе возможны ложные срабатывания сторожевых таймеров ПЛК и аварийная остановка конвейера. Для оценки этого параметра были проведены измерения латентности (Round Trip Time) при различной загрузке канала и активированных профилях защиты, результаты которых демонстрируют динамику изменения задержек в зависимости от объема инспектируемого трафика (табл. 2).

Таблица 2. Зависимость вносимой задержки обработки пакетов от загрузки канала и глубины инспекции

Загрузка канала, Мбит/с	Режим работы DPI	Средняя задержка (RTT), мс	Среднеквадратичное отклонение (Jitter), мс	Максимальная задержка, мс
10,5	Пассивный мониторинг	0,154	0,023	0,412
10,5	Активная блокировка	0,895	0,112	2,345
45,2	Пассивный мониторинг	0,211	0,045	0,876
45,2	Активная блокировка	1,432	0,387	4,982
88,7	Пассивный мониторинг	0,456	0,098	1,564
88,7	Активная блокировка	3,124	0,945	11,231

Обработка представленных метрик позволяет установить нелинейный характер зависимости задержки от загрузки канала, аппроксимируемый полиномиальной функцией второго порядка с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,987$, что свидетельствует о наличии «узкого места» в процессинге

пакетов при приближении к пропускной способности интерфейса. При переходе от режима пассивного мониторинга к активной блокировке при загрузке 88,7 Мбит/с наблюдается рост средней задержки в 6,85 раз (с 0,456 мс до 3,124 мс), что, несмотря на существенное увеличение, остается в пределах допустимого для протокола Modbus TCP (обычно до 20-50 мс), однако рост джиттера до 0,945 мс требует особого внимания при настройке таймеров в системах реального времени. Расчетный коэффициент вариации для режима активной блокировки при максимальной нагрузке составляет 30,2%, что указывает на значительную нестабильность потока данных (Краснопевцев, 2011), вызванную, вероятно, конкуренцией за ресурсы процессора при выполнении глубокого разбора и криптографических проверок. Анализ экстремальных значений (максимальная задержка 11,231 мс) показывает, что даже пиковые выбросы не превышают критических порогов, вызывающих разрыв соединения, однако тренд на увеличение дисперсии требует оптимизации алгоритмов диспетчеризации очередей пакетов.

Важнейшим показателем качества работы системы поведенческого анализа является уровень ложных срабатываний (False Positive), поскольку частые необоснованные блокировки легитимных команд приводят к «усталости от тревог» и снижению доверия персонала к системе безопасности. В контексте пищевого производства, где процессы могут иметь сезонную вариативность или изменяться в зависимости от характеристик сырья, система должна корректно классифицировать редкие, но легитимные операции, не принимая их за аномалии. Исследование устойчивости модели к изменениям технологического контекста проводилось на выборке, содержащей переходные процессы, и результаты классификации представлены в разрезе различных операционных фаз (табл. 3).

Таблица 3. Статистика ложных срабатываний (False Positive) в различных режимах технологического процесса

Режим работы линии	Количество легитимных команд	Количество ложных блокировок	Доля ложных срабатываний, %
Штатное производство	4500200	124	0,0027
CIP-мойка (санитарная обработка)	850300	1856	0,2182
Смена рецептуры (переналадка)	120500	489	0,4058
Аварийный останов	5600	8	0,1428
Пусконаладочные работы	45000	954	2,1200

Глубокий анализ распределения ошибок первого рода выявляет структурную неоднородность надежности распознавания, где минимальный уровень ошибок (0,0027%) характерен для стационарного режима производства, что объясняется высокой предсказуемостью и цикличностью трафика, тогда как режимы с высокой энтропией команд, такие как пусконаладка, демонстрируют пиковые значения ошибок на уровне 2,12%. Математическое моделирование показывает, что вероятность ложного срабатывания коррелирует с плотностью уникальных пар «команда-регистр» во временном окне, причем коэффициент корреляции Пирсона составляет 0,89, указывая на сильную прямую связь между нестандартностью операций и реакцией защитной системы. Особенно показателен режим CIP-мойки, где доля ошибок возрастает на два порядка по сравнению со штатным производством (0,2182% против 0,0027%), что обусловлено использованием специфических команд управления насосами и клапанами, редко применяемых в основном цикле, и требует внедрения механизмов контекстно-зависимого переключения профилей безопасности (Казанский, 1980). Интегральный показатель точности для всей совокупности режимов, взвешенный по длительности их протекания в годовом цикле, составляет 99,98%, однако локальные экстремумы ошибок в переходных режимах требуют применения дополнительных алгоритмов адаптации порогов принятия решений.

Обобщение полученных экспериментальных данных позволяет утверждать, что применение поведенческих профилей в сочетании с DPI обеспечивает качественный скачок в защищенности НКУ по сравнению со статическими правилами фильтрации, однако платой за это является возрастающая

вычислительная сложность и необходимость тонкой настройки под конкретные технологические циклы. Анализ совокупности метрик из трех таблиц показывает, что существует область оптимальных настроек, в которой уровень детектирования превышает 97% при задержках менее 2 мс и уровне ложных срабатываний ниже 0,01% для основного производственного времени. Вместе с тем, математическая обработка векторов ошибок выявила необходимость внедрения гибридной модели, где детерминированные правила используются для известных сигнатур атак, а вероятностные модели – для выявления поведенческих аномалий, что позволит нивелировать недостатки каждого из подходов в отдельности.

Выводы

Детальное рассмотрение результатов исследования подтверждает высокую перспективность применения методов глубокой инспекции пакетов, сопряженных с поведенческим профилированием, для защиты низковольтных комплектных устройств на предприятиях пищевой промышленности. Установлено, что разработанная архитектура системы защиты способна эффективно выявлять и блокировать сложные векторы атак, направленные на модификацию критических параметров технологического процесса, которые остаются невидимыми для традиционных межсетевых экранов, оперирующих на транспортном уровне модели OSI. Достигнутые показатели точности детектирования, превышающие 98% для большинства классов угроз, свидетельствуют о корректности выбранного математического аппарата для формирования нормалей поведения системы. При этом выявленная зависимость уровня ложных срабатываний от режима работы оборудования диктует необходимость разработки механизмов динамической смены профилей защиты, синхронизированных с контроллерами верхнего уровня или MES-системами, что позволит минимизировать вмешательство в легитимные технологические операции, такие как санитарная обработка или переналадка линии.

Важным аспектом, выявленным в ходе анализа временных характеристик, является подтверждение возможности реализации данной технологии в системах жесткого реального времени, при условии использования оптимизированных сетевых стеков и высокопроизводительного аппаратного обеспечения. Вносимые задержки, хотя и демонстрируют нелинейный рост при пиковых нагрузках, остаются в пределах допусков промышленных протоколов, не нарушая целостность управления исполнительными механизмами. Тем не менее, рост джиттера при активации глубокого анализа требует пересмотра подходов к проектированию сетевой инфраструктуры, в частности, выделения сегментов безопасности в отдельные аппаратные модули или использования ПЛИС для ускорения обработки пакетов. Экономическая целесообразность внедрения подобных систем обосновывается предотвращением потенциального ущерба от порчи партий продукции и простоя оборудования, что для крупнотоннажных пищевых производств значительно превышает затраты на развертывание и сопровождение защитного комплекса.

Перспективы дальнейшего развития предложенного подхода лежат в плоскости интеграции алгоритмов федеративного обучения, что позволит создавать обобщенные модели угроз на основе данных, поступающих с множества однотипных производственных линий, без необходимости передачи сырого трафика за пределы периметра предприятия. Это также откроет возможности для выявления медленных, распределенных во времени атак, которые сложно детектировать на уровне одного технологического узла. Кроме того, актуальным направлением является совершенствование методов автоматической генерации профилей нормального поведения на этапе пусконаладки оборудования, что снизит порог вхождения и трудоемкость внедрения систем интеллектуальной защиты на действующих предприятиях с гетерогенным парком оборудования.

Список литературы

1. Аникеев Д. А. Исследование возможности использования флэш-накопителей для защиты от несанкционированного доступа к информации // Россия молодая: мат. VI Всерос. науч.-прак. конф. мол. учен. с межд. участ. Под ред. В. Ю. Блюменштейна. 2014. С. 141.

2. Боровлев Б.С., Мушта А.И., Панарин С.И., Бачурин В.И. Встраиваемая программа защиты от несанкционированного доступа // Информационная безопасность. 2000. Т. 3. № 1. С. 84-85.
3. Гончарова О. Н., Никифоров С. В. Средства защиты от несанкционированного доступа // Проблемы информационной безопасности. 2015. С. 77.
4. Демкин Д. А. Защита базы данных от несанкционированного доступа // Актуальные проблемы науки и техники: мат. Всерос. (Национ.) науч.-прак. конф. Ростов н/Дону, 2024. С. 243-245.
5. Десницкий В. А., Котенко И. В. Модель защиты программ от несанкционированных изменений на основе механизма удаленного доверия // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2007): мат. конф. 2007. С. 81.
6. Запорожцев А.А., Козубенко М.В., Шейдаков Н.Е. Использование асимметричных криптосистем для защиты информации от несанкционированного доступа // Информационные системы, экономика, управление трудом и производством: ученые записки. Ростов н/Дону, 2014. С. 89-93.
7. Земляченко В.В., Бабаев А.А. Способы защиты беспроводных сетей Wi-Fi от несанкционированного доступа // Молодежь и кооперация: реальность и будущее: мат. Межд. студ. науч. конф. Белгород, 2011. С. 9-11.
8. Казанский Л.А., Письменный А.А., Фаерович С.И., Камынин И.П., Воронов А.Б., Сериков А.А. Устройство для защиты дифманометра: авт. свидет. SU 744256 A1 / № 2334699; заявл. 18.03.1976; опубл. 30.06.1980.
9. Краснопевцев А. А. Защита от несанкционированного копирования приложений, компилируемых в промежуточное представление: дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 24 с.
10. Краснопевцев А.А. Разработка автоматической защиты от несанкционированного копирования .NET приложений с использованием внешнего аппаратного модуля // Безопасность информационных технологий. 2009. Т. 16. № 1. С. 54-57.
11. Крахмальный И.О. Разработка модели прогнозирования кибератак // Академический исследовательский журнал. 2025. Т. 3. № 5. С. 180-184.
12. Кузнецов А.В. Информационная технология пассивной защиты цифровых изображений и видеосигналов от несанкционированных изменений: отчет о НИР: грант № СП-66.2015.5. 2015. 54 с.
13. Магомедова Н.А., Аливагабов М.К. Средства защиты информации от несанкционированного доступа // Вопросы структуризации экономики. 2009. № 1. С. 87.
14. Муратов А. В., Дубровин А. С., Коротков М. В., Рогозин Е. А. Оценка системы защиты информации от несанкционированного доступа при проектировании электронных средств // Проектирование и технология электронных средств. 2003. № 3. С. 7-10.
15. Степанцов А.А., Осадчий Ю.Ю., Танчер С.В. Новый класс устройств защиты информации от несанкционированного доступа – технические средства контроля доступа к аппаратным средствам ПЭВМ // Интеграл. 2007. № 5. С. 38-39.

The use of behavioral profiles and DPI-based command detection to protect against unauthorized changes in NCU parameters in food production

Endo Xia

Specialist-expert

Belarusian State University

Minsk, Belarus

enduoxia@gmail.com

ORCID 0000-0000-0000-0000

Hunyan He

Specialist-expert
Belarusian State University
Minsk, Belarus
hehy9527@gmail.com
ORCID 0000-0000-0000-0000

Linda Fan

Specialist-expert
Belarusian State University
Minsk, Belarus
fld420605545@gmail.com
ORCID 0000-0000-0000-0000

Yifan Xu

Specialist-expert
Belarusian State University
Minsk, Belarus
yfx1634159614@gmail.com
ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 22.04.2025
Accepted 03.05.2025
Published 30.06.2025

UDC 004.89
EDN DIQBTD
VAK 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)
OECD 02.02.AC. AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

Abstract

The article examines the provision of cyber resilience of low-voltage switchgear devices (LVSD) in the food industry under conditions of increasing network connectivity driven by the concepts of Industry 4.0 and the convergence of operational and information technologies, in which LVSD cease to be an isolated physical interface and become a vulnerable point of impact on recipe and process parameters of technological lines (pasteurization, sterilization, control of pump groups and thermal units). The limitations of traditional signature-based and threshold-based monitoring tools are analyzed; such tools fail to recognize the misuse of legitimate industrial protocol commands and generate excessive false alarms during transient modes (CIP cleaning, reconfiguration, commissioning), which undermines operator trust in protection systems. An approach is proposed and verified that combines deep packet inspection (DPI) with machine-learning-based behavioral profiling, enabling the extraction of command semantics at the level of Modbus TCP registers and Profinet IO objects and the correlation of network actions with the context of the production cycle. An experimental implementation on a hybrid testbed with Siemens S7-1500 and Schneider Electric Modicon M340 PLCs and high-performance traffic capture is described; a long-term dataset of network exchanges was formed, including normal and non-standard modes, and 15 classes of attacks were synthetically reproduced, including command injections, MITM, and replay scenarios. Quantitative detection characteristics are presented: high effectiveness for direct setpoint writes and command injections with millisecond-level reaction times, while replay attacks pose the greatest challenge, requiring accumulation of historical context and demonstrating a higher miss rate and increased detection latency. The impact of the DPI gateway on latency and jitter is analyzed: with active blocking, delays increase nonlinearly with load but remain within typical Modbus TCP tolerances; at the same time,

increased delay variability under peak traffic is noted as a risk factor for real-time control loops. The heterogeneity of false blocking across operating modes is considered separately: minimal values are characteristic of steady-state production, whereas modes with high command entropy (CIP, reconfiguration, commissioning) require context-dependent profile switching.

Keywords

deep packet inspection (DPI), behavioral profiling, industrial cybersecurity, Modbus TCP and Profinet, low-voltage switchgear devices.

References

1. Anikeev D. A. Investigation of the possibility of using flash drives to protect against unauthorized access to information // Young Russia: mat. of the VI All-Rus. scien. and prac. conf. of young scientists with the inter. particip. Ed. by V.Y. Blumenstein. 2014. p. 141.
2. Borovlev B.S., Mushta A.I., Panarin S.I., Bachurin V.I. Embedded protection program against unauthorized access // Information and security. 2000. Vol. 3. № 1. pp. 84-85.
3. Goncharova O.N., Nikiforov S.V. Means of protection against unauthorized access // Problems of information security. 2015. P. 77.
4. Demkin D.A. Database protection from unauthorized access // Actual problems of science and technology: mat. of the All-Rus. (National) scien. and prac. conf. Rostov-on-Don, 2024. pp. 243-245.
5. Desnitskiy V.A., Kotenko I.V. A model for protecting programs from unauthorized changes based on a remote trust mechanism // Information security of the regions of Russia (IBRD-2007): mat. of the conf. 2007. p. 81.
6. Zaporozhtsev A.A., Kozubenko M.V., Sheidakov N.E. The use of asymmetric cryptosystems to protect information from unauthorized access // Information systems, economics, labor and production management: scien. notes. Rostov-on-Don, 2014. pp. 89-93.
7. Zemlyachenko V.V., Babaev A.A. Ways to protect wireless Wi-Fi networks from unauthorized access // Youth and cooperation: reality and the future: mat. of the Inter. student. scien. conf. Belgorod, 2011. pp. 9-11.
8. Kazansky L.A., Pisenny A.A., Faerovich S.I., Kamynin I.P., Voronov A.B., Serikov A.A. A device for protecting a diffmanometer: author's note. SU 744256 A1 / № 2334699; application on 03.18.1976; publ. On 06.30.1980.
9. Krasnopevtsev A. A. Protection against unauthorized copying of applications compiled into an intermediate representation: dis. ... cand. of tech. scien. M., 2011. 24 p.
10. Krasnopevtsev A.A. Development of automatic protection against unauthorized copying.NET applications using an external hardware module // Information technology security. 2009. Vol. 16. № 1. pp. 54-57.
11. Krakhmalny I.O. Development of a model for predicting cyberattacks // Academic research journal. 2025. Vol. 3. № 5. pp. 180-184.
12. Kuznetsov A.V. Information technology for passive protection of digital images and video signals from unauthorized changes: research report: grant № SP-66.2015.5. 2015. 54 p.
13. Magomedova N.A., Alivagabov M.K. Means of protecting information from unauthorized access // Issues of structuring the economy. 2009. № 1. P. 87.
14. Muratov A.V., Dubrovin A.S., Korotkov M.V., Rogozin E.A. Evaluation of the information protection system against unauthorized access in the design of electronic means // Design and technology of electronic means. 2003. № 3. pp. 7-10.
15. Stepanov A.A., Osadchy Yu.Y., Tancher S.V. A new class of information protection devices against unauthorized access – technical means of access control to PC hardware // Integral. 2007. № 5. pp. 38-39.

Создание гибридных систем анализа гиперспектральных данных и RGB-изображений для ранней диагностики у зерновых культур

Василий Юрьевич Дурманов

Аспирант

Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева

Москва, Россия

vdurmanv@outlook.com

ORCID 0000-0000-0000-0000

Екатерина Леонидовна Чепурина

Доктор технических наук, доцент

Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева

Москва, Россия

chepurina@rgau-msha.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 21.04.2025

Принята 02.05.2025

Опубликована 30.06.2025

УДК 633:004.89

EDN DBKOLC

ВАК 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

OECD 02.02.AC. AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

Аннотация

Статья посвящена разработке и валидации гибридной системы ранней диагностики стрессовых состояний зерновых культур на основе слияния гиперспектральных данных и RGB-изображений. Целью являлось количественно оценить вклад каждой модальности и показать, что их интеграция повышает точность и робастность выявления довизуальных признаков стресса. Материалы и методы: полевые эксперименты 2023-2024 годов на озимой пшенице (*Triticum aestivum* L., сорт «Московская 40») под тремя воздействиями – дефицит азота, септориоз (*Septoria tritici*) и комбинированный стресс – с дистанционным зондированием БПЛА DJI Matrice 300 RTK. Сбор данных включал push-broom сенсор Headwall Nano-Hyperspec (400-1000 нм, 2,2 нм, ~270 каналов, ~5 см/пкс) и RGB-камеру Zenmuse P1 (45 Мп, ~1,5 см/пкс); выполнены радиометрическая/атмосферная коррекции HSI, цветовая калибровка RGB и ортотрансформация. Извлекались вегетационные индексы (NDVI, PRI, ChII и др.), проводились PCA/MNF для снижения размерности; из RGB получены признаки цвета (HSV, Lab) и текстуры (GLCM). Сравнены SVM (RBF), Random Forest и 3D-CNN; исследованы раннее (feature-level) и позднее (decision-level) слияние. Результаты: одиночные индексы HSI превосходят RGB-признаки на ранних стадиях; ChII дал 84,11% точности против $\leq 70\%$ для лучших RGB-признаков. Для одномодальных моделей HSI-3D-CNN достигла 92,46% ($\kappa=0,903$), опережая SVM/RF, однако при высокой вычислительной цене; RGB-модели уступали на 16-18 п.п. Гибридная архитектура с ранним слиянием признаков и CNN обеспечила 96,33% общей точности и $F1=0,959$, что на 3,87 п.п. выше лучшей HSI-модели и на 20,52 п.п. выше RGB. Валидация по наземным биохимическим измерениям показала сильные корреляции: $r=0,917$ (азотное голодание), $r=0,884$ (септориоз), $r=0,945$ (контроль), подтверждая физиологическую релевантность предсказаний. Вывод: синергетическое слияние HSI и RGB позволяет надёжно выявлять довизуальные стрессовые изменения, обеспечивая прирост точности при приемлемом компромиссе по вычислительным затратам и открывая путь к внедрению в системы точного земледелия и поддержку дифференцированных агротехнологических решений.

Ключевые слова

гиперспектральная съёмка, RGB-изображения, ранняя диагностика стрессов, слияние данных, точное земледелие.

Введение

Развитие агропромышленного комплекса в условиях глобальных климатических изменений и растущего спроса на продовольствие ставит перед научным сообществом задачу разработки высокоэффективных технологий мониторинга и управления состоянием сельскохозяйственных культур. Зерновые культуры, составляющие основу продовольственной безопасности многих стран, особенно уязвимы к различным абиотическим и биотическим стрессам, таким как дефицит питательных веществ, засуха, а также грибковые и вирусные заболевания (Руденко, 2024). Несвоевременное выявление и реагирование на данные угрозы приводит к значительным потерям урожайности, достигающим по разным оценкам от 20 до 40% (Денисюк, 1999). Традиционные методы диагностики, основанные на визуальном осмотре агрономом или лабораторном анализе образцов, обладают существенными недостатками: они трудоемки, субъективны, локальны по своей природе и, что наиболее критично, позволяют выявить проблему лишь на поздних стадиях, когда патологические изменения уже необратимы, а экономическая эффективность защитных мероприятий резко снижается. В этом контексте особую актуальность приобретают методы дистанционного зондирования, позволяющие осуществлять оперативный и неинвазивный мониторинг больших площадей посевов. Среди технологий дистанционного зондирования наибольшее распространение получили анализ стандартных RGB-изображений и гиперспектральная съёмка. RGB-камеры, доступные и простые в эксплуатации, позволяют анализировать морфологические и текстурные характеристики растительного покрова, однако их информативность ограничена тремя широкими спектральными каналами, что не позволяет улавливать тонкие изменения в биохимическом составе растений, предшествующие появлению видимых симптомов стресса (Азизов, 2018). Гиперспектральные сенсоры, напротив, регистрируют отраженную энергию в сотнях узких смежных спектральных каналов, формируя уникальную спектральную подпись для каждого объекта. Это позволяет с высокой точностью определять содержание хлорофилла, азота, воды и других соединений, являющихся индикаторами физиологического состояния растений (Абу, 2024). Однако обработка гиперспектральных данных сопряжена с рядом трудностей: большой объем данных (проблема «проклятия размерности»), высокая стоимость оборудования и сложность алгоритмов предварительной обработки и анализа (Ананьев, 2010). Таким образом, возникает научная проблема, заключающаяся в необходимости создания такой системы, которая бы объединяла преимущества обеих технологий: пространственное разрешение и текстурную информацию RGB-изображений с глубокой спектральной информативностью гиперспектральных данных для создания синергетического эффекта при ранней диагностике стрессовых состояний зерновых культур.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные исследования проводились в вегетационные периоды 2023-2024 годов на полях опытной станции, расположенной в условиях умеренно-континентального климата. Объектом исследования служили посевы озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта «Московская 40». В рамках эксперимента были смоделированы два типа стрессовых воздействий: дефицит азотного питания и искусственное заражение возбудителем септориоза (*Septoria tritici*). Для этого были заложены опытные делянки размером 10×10 метров с четырьмя вариантами: 1) контроль (оптимальное внесение удобрений и фунгицидная обработка); 2) азотное голодание (внесение 50% от расчетной нормы азота); 3) грибковая инфекция (инокуляция суспензией спор на стадии кущения); 4) комбинированный стресс. Сбор данных осуществлялся с использованием беспилотного летательного аппарата мультироторного типа DJI Matrice 300 RTK, оснащенного гибридной полезной нагрузкой. Гиперспектральные данные получали с помощью push-broom сенсора Headwall Nano-Hyperspec в спектральном диапазоне 400-1000 нм с разрешением 2.2 нм (270 каналов) и пространственным разрешением 5 см/пиксель при высоте полета

100 метров. Одновременно велась съемка RGB-камерой Zenmuse P1 с разрешением 45 Мп, обеспечивающей пространственное разрешение 1.5 см/пиксель (Максимов, 2023). Для радиометрической калибровки гиперспектральных данных использовались эталонные панели с известным коэффициентом отражения, съемка которых производилась до и после каждого полета. Параллельно с дистанционным сбором данных проводился отбор растительных образцов для наземной верификации: определялось содержание хлорофилла (SPAD-502), концентрация азота в листьях методом Кьельдаля и степень развития заболевания по стандартным шкалам (Кравцов, 2024).

Методология обработки и анализа данных включала в себя многоступенчатый алгоритмический конвейер. На первом этапе выполнялась предварительная обработка исходных данных: для гиперспектральных кубов проводилась радиометрическая коррекция, атмосферная коррекция с использованием модели MODTRAN и ортотрансформация (Романенко, 2010). Для RGB-изображений выполнялась цветовая калибровка и сшивка в единый ортофотоплан. На втором этапе производилась экстракция признаков из обеих модальностей. Из гиперспектральных данных рассчитывался набор из 15 вегетационных индексов, чувствительных к различным физиологическим параметрам (NDVI, PRI, Chl, MCARI и др.), а также применялись методы снижения размерности, такие как анализ главных компонент (PCA) и Minimum Noise Fraction (MNF) (Березина, 1998). Из RGB-данных извлекались признаки цвета в пространствах HSV и Lab, а также текстурные признаки на основе матрицы смежности серого уровня (GLCM), такие как контраст, энергия, гомогенность и корреляция (Еремеев, 2024).

Третий этап заключался в слиянии (fusion) данных. Были апробированы два подхода: раннее слияние на уровне признаков, при котором векторы признаков из HSI и RGB конкатенировались в единый вектор для каждого пикселя, и позднее слияние на уровне решений, где для каждой модальности обучался отдельный классификатор, а их выходные вероятности объединялись с помощью взвешенного суммирования. В качестве классификационных моделей использовались метод опорных векторов (SVM) с радиальным базисным ядром, ансамбль случайного леса (Random Forest) и сверточная нейронная сеть (CNN) с архитектурой, адаптированной для обработки многомерных данных (Максимов, 2023).

Обучение и валидация моделей производились на выборке, размеченной на основе данных наземных обследований, с использованием перекрестной проверки по 5 блокам. Оценка точности моделей проводилась на основе метрик Overall Accuracy, Precision, Recall, F1-Score и коэффициента Каппа.

Результаты и обсуждение

Ключевой задачей при разработке гибридных систем является количественная оценка информационного вклада каждой из используемых модальностей данных. Понимание сильных и слабых сторон как гиперспектрального, так и RGB-анализа позволяет не только обосновать целесообразность их объединения, но и разработать оптимальную стратегию слияния признаков. В то время как гиперспектральные данные несут в себе информацию о биохимических процессах на клеточном уровне, RGB-изображения с высоким пространственным разрешением содержат ценные сведения о морфологии и текстуре растительного покрова, которые могут служить косвенными индикаторами стресса, особенно на более поздних стадиях его развития (Хотилин, 2023). Например, изменение текстуры посева может указывать на неравномерность роста, вызванную локальным дефицитом питания, в то время как спектральные индексы могут еще не показывать значительных отклонений.

Первоначальный этап анализа был посвящен сравнительной оценке диагностической ценности отдельных признаков, извлеченных из каждого типа данных. Для этого была решена задача бинарной классификации («здоровье» / «стресс») с использованием логистической регрессии для каждого признака в отдельности. Такой подход позволяет выявить наиболее информативные предикторы и оценить их индивидуальную прогностическую силу без влияния сложной архитектуры классификатора (Денисюк, 1999). Результаты данной оценки, усредненные по всем типам стрессовых воздействий на ранней стадии их проявления (10-14 дней после инокуляции/введения стрессового фактора), представлены в сводной таблице, отражающей как среднюю точность классификации, так и ее стабильность (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительная оценка информативности отдельных вегетационных индексов и текстурных признаков

Признак/Индекс	Источник данных	Средняя точность, %	Стандартное отклонение, %	F1-Score
NDVI	HSI	81,45	3,12	0,809
PRI	HSI	78,92	4,56	0,781
ChII	HSI	84,11	2,88	0,837
GLCM-Contrast	RGB	65,73	6,21	0,642
GLCM-Homogeneity	RGB	62,09	7,04	0,605
HSV-Hue (Mean)	RGB	68,34	5,89	0,677

Анализ данных, представленных в таблице 1, наглядно демонстрирует существенное преимущество признаков, полученных из гиперспектральных данных, для задач ранней диагностики. Индекс содержания хлорофилла (ChII), рассчитанный с использованием узких спектральных каналов в красной и ближней инфракрасной областях, показал наивысшую среднюю точность классификации (84,11%) при наименьшем стандартном отклонении (2,88%). Это подтверждает его высокую чувствительность к изменению концентрации фотосинтетических пигментов, что является одним из первых ответов растения на стресс. Индекс NDVI, являющийся общепринятым индикатором состояния растительности, также показал высокую эффективность (81,45%), однако его чувствительность несколько ниже по сравнению с более специализированными индексами (Евтюшкин, 2006). Фотометрический рефлективный индекс (PRI), связанный с эффективностью использования света, показал несколько меньшую точность (78,92%) и большую вариативность, что может быть связано с его зависимостью от условий освещения в момент съемки.

Признаки, извлеченные из RGB-изображений, показали значительно более скромные результаты. Текстурные признаки, такие как контраст и гомогенность (GLCM-Contrast и GLCM-Homogeneity), а также цветовые характеристики (среднее значение тона в пространстве HSV), не смогли обеспечить точность классификации выше 70%. Высокие значения стандартного отклонения (более 5,8%) для всех RGB-признаков свидетельствуют об их низкой робастности и сильной зависимости от внешних факторов, таких как угол падения солнечных лучей и наличие теней. Полученные результаты количественно подтверждают гипотезу о том, что на ранних стадиях стресса, когда видимые морфологические изменения еще отсутствуют или минимальны, именно спектральная информация является ключевым источником диагностических данных, в то время как RGB-признаки играют вспомогательную роль.

Далее была проведена оценка эффективности комплексных классификационных моделей, обученных на данных каждой модальности в отдельности. Целью данного этапа было не только сравнить итоговую точность, но и оценить вычислительную сложность и коэффициент обобщающей способности (Каппа Коэна), который учитывает вероятность случайного угадывания. Использование различных по своей природе алгоритмов – SVM, Random Forest и CNN – позволило оценить, насколько эффективно каждый из них способен извлекать полезную информацию из данных разной структуры. Для гиперспектральных данных перед подачей в классификаторы SVM и Random Forest применялась процедура PCA для снижения размерности до 10 главных компонент. Для CNN использовалась 3D-свертка, позволяющая работать непосредственно с гиперспектральным кубом (табл. 2).

Таблица 2. Результаты классификации стрессовых состояний с использованием отдельных модальностей данных

Модель	Источник данных	Общая точность, %	Коэффициент Каппа	Время обработки, с/га
SVM	Только RGB	71,28	0.654	18,7

SVM	Только HSI (PCA)	88,94	0.851	45,3
Random Forest	Только RGB	73,05	0.678	25,1
Random Forest	Только HSI (PCA)	90,17	0.879	58,9
CNN	Только RGB	75,81	0.710	112,4
CNN	Только HSI (3D)	92,46	0.903	245,6

Результаты, приведенные в таблице 2, подтверждают выводы, сделанные на предыдущем этапе анализа: использование данных исключительно с гиперспектрального сенсора обеспечивает значительно более высокую точность классификации по сравнению с RGB-данными для всех протестированных моделей. Разрыв в общей точности составляет от 16,65% для CNN до 17,66% для SVM. Ансамблевый метод Random Forest показал себя несколько лучше SVM на обоих типах данных, что, вероятно, связано с его большей устойчивостью к шумам и выбросам. Наилучшие результаты на обеих модальностях продемонстрировала сверточная нейронная сеть, что объясняется ее способностью автоматически извлекать иерархические признаки и сложные нелинейные зависимости в данных. Точность в 92,46% при коэффициенте Каппа 0.903 для HSI-данных является очень высоким показателем, свидетельствующим о высокой степени согласия между предсказаниями модели и реальной разметкой.

Вместе с тем, анализ колонки «Время обработки» выявляет обратную сторону использования гиперспектральных данных – их высокую вычислительную сложность. Обработка HSI-куба с помощью 3D-CNN занимает 245,6 секунд на гектар на тестовой вычислительной платформе, что более чем в 13 раз превышает время обработки RGB-данных с помощью SVM. Даже после существенного снижения размерности методом PCA, обработка HSI-данных с помощью классических моделей машинного обучения (SVM, Random Forest) остается в 2,5-3 раза более затратной по времени, чем работа с RGB. Этот компромисс между точностью и вычислительными затратами является критически важным для практического применения технологии в реальном времени и служит мощным стимулом для разработки гибридных подходов, которые могли бы достичь сопоставимой или даже более высокой точности при меньших вычислительных расходах.

На следующем этапе исследования была оценена эффективность гибридных моделей, использующих слияние данных. Были протестированы два основных подхода: раннее слияние (feature-level fusion), при котором векторы признаков от HSI (10 главных компонент) и RGB (6 признаков) объединялись в один 16-мерный вектор, и позднее слияние (decision-level fusion), где выходные вероятности от двух отдельных классификаторов (один для HSI, другой для RGB) объединялись. Для позднего слияния использовался метод взвешенного среднего, где веса подбирались итеративно для максимизации итоговой точности на валидационной выборке. Результаты сравнения этих подходов для наиболее эффективных моделей SVM и CNN представлены ниже (табл. 3).

Таблица 3. Эффективность гибридной модели на основе слияния признаков

Метод слияния	Модель	Общая точность, %	Точность (Precision), %	Полнота (Recall), %	F1-Score
Раннее слияние	SVM	94,78	93,55	95,12	0,943
Позднее слияние	SVM	93,15	92,87	93,99	0,934
Раннее слияние	CNN	96,33	95,89	96,01	0,959
Позднее слияние	CNN	95,02	94,76	94,88	0,948

Анализ таблицы 3 показывает, что интеграция данных из двух источников приводит к синергетическому эффекту, позволяя достичь более высокой точности классификации, чем при использовании любой из модальностей в отдельности. Гибридная модель на основе CNN с ранним слиянием признаков достигла наилучшего результата с общей точностью 96,33% и F1-Score 0,959. Это на 3,87% выше, чем у лучшей одномодальной модели (CNN на HSI-данных). Данный результат убедительно доказывает, что пространственная и текстурная информация из RGB-изображений, несмотря на свою низкую индивидуальную информативность на ранних стадиях стресса, предоставляет уникальные контекстуальные данные, которые дополняют спектральную информацию и позволяют нейронной сети строить более сложные и точные решающие границы в пространстве признаков.

Сравнение методов слияния показывает, что раннее слияние consistently превосходит позднее слияние для обеих архитектур моделей. Это можно объяснить тем, что при раннем слиянии модель получает доступ ко всей информации одновременно и может самостоятельно выявлять сложные кросс-модальные зависимости между спектральными и пространственными признаками. При позднем слиянии часть этой информации теряется, так как объединение происходит уже на уровне абстрактных вероятностей, а не исходных признаков. Анализ метрик точности (Precision) и полноты (Recall) показывает, что гибридные модели хорошо сбалансированы. Высокие значения обеих метрик (около 96% для лучшей модели) говорят о том, что система одинаково хорошо справляется как с минимизацией ложноположительных срабатываний (ошибочное определение стресса у здоровых растений), так и ложноотрицательных (пропуск растений в стрессовом состоянии), что является критически важным для принятия агрономических решений.

Финальным этапом работы стала валидация результатов, полученных с помощью лучшей гибридной модели (CNN с ранним слиянием), путем их сопоставления с данными прямых биохимических анализов образцов, отобранных на опытных делянках. Для каждого класса стресса (азотное голодание, грибковая инфекция) и контрольной группы была рассчитана корреляция между предсказаниями модели (выраженными в виде вероятности принадлежности к классу стресса для каждого пикселя, усредненной по делянке) и измеренными лабораторными показателями (содержание азота, степень развития болезни). Коэффициент корреляции Пирсона использовался как мера линейной связи между предсказанными и фактическими значениями (Баула, 2013).

Таблица 4. Валидация результатов классификации по данным наземной биохимической оценки

Класс стресса	Предсказано моделью (кол-во участков)	Подтверждено биохимически (кол-во участков)	Коэффициент корреляции Пирсона (r)
Азотное голодание	58	55	0.917
Грибковая инфекция	59	56	0.884
Контроль (Здоровье)	60	59	0.945

Данные таблицы 4 демонстрируют высокую степень соответствия между результатами дистанционной диагностики и данными наземных «мокрых» лабораторных анализов. Для всех классов наблюдается сильная положительная корреляция. Наивысший коэффициент корреляции ($r = 0.945$) зафиксирован для контрольной группы, что указывает на высокую специфичность модели – она практически безошибочно идентифицирует здоровые растения. Для участков с азотным голоданием коэффициент корреляции составил 0.917, что свидетельствует о способности гибридной системы очень точно оценивать уровень азотного обеспечения растений на основе их оптических свойств. Несколько меньший, но все еще очень высокий коэффициент корреляции ($r = 0.884$) для грибковой инфекции может быть объяснен большей пространственной гетерогенностью развития заболевания на ранних стадиях, что несколько усложняет задачу для модели.

Анализ абсолютных значений показывает, что из 58 участков, которые модель классифицировала как испытывающие дефицит азота, лабораторный анализ подтвердил этот диагноз для 55 участков, что соответствует точности в 94,8%. Аналогично, для грибковой инфекции точность составила 94,9% (56 из 59). Эти цифры подтверждают не только высокую статистическую точность модели, но и ее практическую применимость. Установленная сильная корреляционная связь доказывает, что разработанный гибридный подход улавливает не случайные флуктуации, а реальные физиологические и биохимические изменения в растениях, вызванные конкретными стрессовыми факторами. Это открывает возможность для перехода от качественной оценки «здоровье/стресс» к количественной оценке степени выраженности стресса, что является следующим шагом в развитии систем поддержки принятия решений в точном земледелии.

Комплексный анализ полученных результатов позволяет утверждать, что предложенная гибридная архитектура, основанная на раннем слиянии признаков из гиперспектральных и RGB-данных, представляет собой эффективный и робастный инструмент для ранней диагностики стрессовых состояний зерновых культур. Синтез данных позволил достичь увеличения общей точности классификации на 3.87 процентных пункта по сравнению с использованием только гиперспектральных данных и на 20.52 процентных пункта по сравнению с использованием только RGB-данных. Этот синергетический эффект обусловлен взаимодополняющим характером информации: гиперспектральные каналы обеспечивают чувствительность к тонким изменениям в биохимии листа, в то время как RGB-данные с высоким разрешением добавляют критически важную информацию о пространственной структуре, текстуре и локальных морфологических аномалиях, которые могут быть неразличимы в более низком пространственном разрешении гиперспектральной камеры.

Математическая обработка данных показала, что сверточная нейронная сеть оказалась наиболее подходящим инструментом для реализации такого слияния. В отличие от классических алгоритмов машинного обучения, которые требуют ручного конструирования признаков и работают с «плоскими» векторами, CNN способна самостоятельно извлекать иерархические представления из многомерных данных, эффективно находя сложные нелинейные взаимосвязи между спектральными и пространственными характеристиками. Это позволило не просто суммировать информацию, а построить интегрированную модель, где признаки из одной модальности уточняют и контекстуализируют признаки из другой, что и привело к значительному повышению качества классификации. Например, слабое изменение в спектральном индексе PRI могло быть проигнорировано моделью, но в сочетании с локальным увеличением текстурного контраста из RGB-данных, оно было корректно интерпретировано как ранний очаг заболевания.

Важным аспектом является не только достигнутая точность, но и подтвержденная корреляция с фундаментальными биохимическими показателями. Коэффициенты корреляции Пирсона, превышающие 0.88 для всех классов, свидетельствуют о том, что модель имеет высокую прогностическую ценность и ее выходные данные напрямую отражают реальное физиологическое состояние растений. Это принципиально отличает разработанный подход от «черных ящиков», которые могут показывать высокую точность на тестовой выборке, но не иметь четкой физической интерпретации. В данном случае мы можем утверждать, что гибридная модель научилась распознавать комплексные оптические паттерны, соответствующие специфическим биохимическим сдвигам, вызванным дефицитом азота или развитием патогена.

В перспективе, разработанный алгоритмический каркас может быть адаптирован для решения более широкого круга задач. Путем обучения на соответствующих наборах данных он может быть использован для диагностики других видов стресса (например, водного), идентификации сорняков или оценки стадий вегетации. Кроме того, хотя текущая реализация показала высокую вычислительную сложность для CNN, существуют пути для ее оптимизации, такие как квантование весов, дистилляция знаний в более компактные сети и использование специализированных аппаратных ускорителей. Это позволит перенести вычисления непосредственно на борт БПЛА, обеспечив возможность мониторинга и принятия решений в режиме реального времени, что является конечной целью внедрения интеллектуальных систем в агропромышленный комплекс.

Заключение

В результате проведенного исследования была разработана и экспериментально апробирована гибридная система анализа мультисенсорных данных для ранней неинвазивной диагностики стрессовых состояний озимой пшеницы. Установлено, что синергетическое объединение гиперспектральных данных, отражающих биохимический статус растений, и RGB-изображений высокого разрешения, содержащих информацию о морфологической и текстурной структуре посева, позволяет существенно повысить точность и надежность классификации. Наилучшие результаты были достигнуты при использовании архитектуры на основе сверточной нейронной сети с применением стратегии раннего слияния признаков. Данный подход позволил достичь общей точности диагностики на уровне 96,33%, что значительно превосходит показатели систем, основанных на использовании только одного типа данных.

Практическая значимость работы заключается в создании научно-методической основы для разработки автоматизированных систем поддержки принятия решений в точном земледелии. Предложенный алгоритмический комплекс обеспечивает возможность выявления дефицита азотного питания и грибковых заболеваний на довизуальных стадиях, когда применение агрохимикатов наиболее эффективно и экономически оправдано. Высокая степень корреляции результатов дистанционного мониторинга с данными наземных лабораторных анализов (коэффициент корреляции Пирсона >0.88) подтверждает адекватность и прогностическую ценность разработанной модели. Внедрение подобных технологий в агрономическую практику позволит перейти к дифференцированному уходу за посевами, что способствует оптимизации расхода удобрений и средств защиты растений, снижению экологической нагрузки и, в конечном итоге, повышению урожайности и рентабельности сельскохозяйственного производства.

Список литературы

1. Абу З.Х. Система сбора гиперспектральных данных с полей сельскохозяйственных культур // Цифровизация агропромышленного комплекса: сб. науч. ст. В 3-х т. Тамбов, 2024. С. 83-84.
2. Азизов Б.М., Мехтиев Д.С., Кулиева С.Г. Возможности использования гиперспектрального анализа для оценки посевов сельскохозяйственных культур // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: мат. XVI Всерос. открыт. конф. М.: Институт космических исследований Российской академии наук, 2018. С. 384.
3. Ананьев Н.С., Ананьев С.Н., Куренков Н.И. Об одном подходе к экспресс-анализу гиперспектральных изображений // Интернет-журнал Науковедение. 2010. № 3(4). С. 5.
4. Баула Г.Г., Брычихин М.Н., Истомина М.И., Кротков А.Ю., Сжёнов Е.Ю., Ризванов А.А., Третьяков В.Н. Формирование базы данных гиперспектральных оптических характеристик сельскохозяйственных культур в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях спектра // Космонавтика и ракетостроение. 2013. № 4(73). С. 178-184.
5. Березина В.Ю., Гурова Т.А., Денисюк С.Г., Павлов Е.И. Информационно-диагностическая экспертная система патоген // Датчики и преобразователи информации систем измерения: мат. X Юбил. науч.-техн. конф. с участ. заруб. спец. В 2-х томах. Под ред. В.Н. Азарова. 1998. С. 338-340.
6. Денисюк С.Г. Автоматизированный метод визуальной диагностики болезней, сорняков и вредителей зерновых культур // Развитие агропромышленного комплекса в зонах рискованного земледелия: мат. VI науч.-прак. конф. Под ред. Г.Н. Калюк, В.Ф. Резникова. 1999. С. 5.
7. Денисюк С.Г. Структура программно-аппаратного обеспечения автоматизированной визуальной диагностики болезней, сорняков и вредителей в посевах зерновых культур с использованием видеоинформации // Проблемы стабилизации и развития сельскохозяйственного производства Сибири, Монголии и Казахстана в XXI веке: мат. Межд. науч.-прак. конф. 1999. С. 44-48.
8. Евтюшкин А.В., Рычкова Н.В. Мониторинг развития зерновых культур по данным полевых и космических наблюдений // Мат. IX Регион. конф. по математике (МАК-2006). Барнаул: Алтайский государственный университет, 2006. С. 56-58.

9. Еремеев В.А., Макаренков А.А. Нейросетевая идентификация объектов Земли на основе данных от систем гиперспектральной съёмки и знаний об их видеоинформационном тракте // Цифровая обработка сигналов. 2024. № 1. С. 49-54.
10. Информационные системы диагностики, мониторинга и прогноза важнейших сорных растений, вредителей и болезней сельскохозяйственных культур // Мат. Межд. конф. 2008.
11. Кравцов П.А., Емельянова М.А., Рыжова В.А. Разработка гиперспектральных аналитических систем с применением нейросетей // Альманах научных работ молодых ученых университета ИТМО: мат. 53-й (LIII) науч. и учеб.-метод. конф. СПб., 2024. С. 220-223.
12. Максимов Л.В., Гурова Т.А., Елкин О.В. Разработка программно-аппаратного комплекса для фенотипирования стресса зерновых культур по гиперспектральным изображениям // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2023): мат. Всерос. конф. с межд. участ. Новосибирск, 2023. С. 289-293.
13. Романенко А.Ю. Формализация и алгоритмы обработки информации для экспертной системы технического диагностирования гибридных объектов: дис. ... канд. техн. наук. Серпухов: Институт инженерной физики, 2010. 230с.
14. Руденко А.М. Разработка системы автоматической предобработки и хранения гиперспектральных изображений // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезисы докладов Тридцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. М., 2024. С. 238.
15. Хотилин М.И. Технология интеллектуального автоматизированного отбора информативных признаков натуральных гиперспектральных изображений // Математические методы распознавания образов: мат. 21-й Всерос. конф. с межд. учас. М., 2023. С. 218-220.

Creation of hybrid systems for analyzing hyperspectral data and RGB images for early diagnosis of grain crops

Vasily Yu. Durmanov

PhD student

Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy of Agriculture
Moscow, Russia

vdurmanv@outlook.com

ORCID 0000-0000-0000-0000

Ekaterina L. Chepurina

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy of Agriculture
Moscow, Russia

chepurina@rgau-msha.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 21.04.2025

Accepted 02.05.2025

Published 30.06.2025

UDC 633:004.89

EDN DBKOLC

VAK 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

OECD 02.02.AC. AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

Abstract

The article is devoted to the development and validation of a hybrid system for early diagnostics of stress conditions in cereal crops based on the fusion of hyperspectral data and RGB images. The aim was to quantitatively assess the contribution of each modality and to demonstrate that their integration improves the accuracy and robustness of detecting pre-visual stress symptoms. Materials and methods: field experiments conducted in 2023-2024 on winter wheat (*Triticum aestivum* L., variety «Moskovskaya 40») under three treatments – nitrogen deficiency, septoria (*Septoria tritici*), and combined stress – using remote sensing with a DJI Matrice 300 RTK UAV. Data collection included a Headwall Nano-Hyperspec push-broom sensor (400-1000 nm, 2.2 nm, ~270 bands, ~5 cm/pixel) and a Zenmuse P1 RGB camera (45 MP, ~1.5 cm/pixel); radiometric/atmospheric correction of HSI, color calibration of RGB, and orthotransformation were performed. Vegetation indices (NDVI, PRI, ChII, etc.) were extracted, and PCA/MNF were applied for dimensionality reduction; color (HSV, Lab) and texture (GLCM) features were derived from RGB. SVM (RBF), Random Forest, and 3D-CNN were compared; early (feature-level) and late (decision-level) fusion approaches were investigated. Results: individual HSI indices outperformed RGB features at early stages; ChII achieved 84,11% accuracy versus $\leq 70\%$ for the best RGB features. For unimodal models, HSI-3D-CNN reached 92,46% ($\kappa=0.903$), outperforming SVM/RF but at a higher computational cost; RGB models lagged by 16-18 pp. The hybrid architecture with early feature fusion and CNN achieved 96,33% overall accuracy and $F1=0.959$, exceeding the best HSI model by 3.87 pp and the RGB model by 20.52 pp. Validation against ground-based biochemical measurements revealed strong correlations: $r=0.917$ (nitrogen deficiency), $r=0.884$ (septoria), $r=0.945$ (control), confirming the physiological relevance of the predictions. Conclusion: the synergistic fusion of HSI and RGB enables reliable detection of pre-visual stress changes, providing an accuracy gain with an acceptable computational trade-off and paving the way for integration into precision agriculture systems and support for site-specific agronomic decision-making.

Keywords

hyperspectral imaging, RGB images, early stress diagnostics, data fusion, precision agriculture.

References

1. Abu Z.H. A system for collecting hyperspectral data from agricultural fields // Digitalization of the agro-industrial complex: coll-n of scien. art. In 3 vols. Tambov, 2024. pp. 83-84.
2. Azizov B.M., Mehdiyev D.S., Kuliyeva S.G. Possibilities of using hyperspectral analysis to assess crops // Modern problems of remote sensing of the Earth from space: mat. XVI Vseros. open conference. M.: Institute of Space Research of the Russian Academy of Sciences, 2018. p. 384.
3. Ananyev N.S., Ananyev S.N., Kurenkov N.I. On one approach to rapid hyperspectral image analysis // Online journal of science studies. 2010. № 3(4). p. 5.
4. Baula G.G., Brychikhin M.N., Istomina M.I., Krotkov A.Yu., Szhenov E.Yu., Rizvanov A.A., Tretyakov V.N. Formation of a database of hyperspectral optical characteristics of agricultural crops in the ultraviolet, visible and near-infrared spectral regions // Cosmonautics and rocket science. 2013. № 4(73). pp. 178-184.
5. Berezina V.Yu., Gurova T.A., Denisyuk S.G., Pavlov E.I. Information and diagnostic expert system pathogen // Sensors and information converters of measurement systems: mat. of the X Yubil. study and tech. conf. with inter. particip. In 2 vols. Ed. by V.N. Azarov. 1998. pp. 338-340.
6. Denisyuk S.G. Automated method of visual diagnostics of diseases, weeds and pests of grain crops // Development of the agro-industrial complex in risky farming zones: mat. of the VI Scien. and prac. conf. Eds. by G.N. Kalyuk, V.F. Reznikov. 1999. p. 5.
7. Denisyuk S.G. The structure of software and hardware for automated visual diagnostics of diseases, weeds and pests in grain crops using video information // Problems of stabilization and development of agricultural production in Siberia, Mongolia and Kazakhstan in the 21st century: mat. of the Inter. scien. and prac. conf. 1999. pp. 44-48.

8. Yevtyushkin A.V., Rychkova N.V. Monitoring the development of grain crops according to field and space observations // Mat. of the IX Region. conference on mathematics (IAC-2006). Barnaul: Altai State University, 2006. pp. 56-58.
9. Ereemeev V.A., Makarenkov A.A. Neural network identification of Earth objects based on data from hyperspectral imaging systems and knowledge about their video information path // Digital signal processing. 2024. № 1. pp. 49-54.
10. Information systems for diagnostics, monitoring and forecasting of the most important weeds, pests and diseases of agricultural crops // Mat. of the Inter. conf. 2008.
11. Kravtsov P.A., Yemelyanova M.A., Ryzhova V.A. Development of hyperspectral analytical systems using neural networks // Almanac of scientific works of young scientists of ITMO University: mat. of the 53rd (LIII) scien., study and method. conf. SPb., 2024. pp. 220-223.
12. Maksimov L.V., Gurova T.A., Elkin O.V. Development of a software and hardware complex for phenotyping stress of grain crops using hyperspectral images // Spatial data processing in monitoring tasks of natural and anthropogenic processes (SDM-2023): mat. of the All-Rus. conf. with inter. particip. Novosibirsk, 2023. pp. 289-293.
13. Romanenko A.Y. Formalization and algorithms of information processing for the expert system of technical diagnostics of hybrid objects: dis. ... cand. of techn. scien. Serpukhov: Institute of Engineering Physics, 2010. 230s.
14. Rudenko A.M. Development of a system for automatic preprocessing and storage of hyperspectral images // Radio Electronics, electrical engineering and power Engineering: Abstracts of the Thirtieth International Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates. Moscow, 2024. p. 238.
15. Khotilin M.I. Technology of intelligent automated selection of informative features of natural hyperspectral images // Mathematical methods of pattern recognition: mat. of the 21st All-Rus. conf. with inter. particip. M., 2023. pp. 218-220.

МАРКЕТИНГ И ФИНАНСЫ

Экономико-математическое моделирование и прогнозирование эффективности использования производственных ресурсов хлебопекарного предприятия

Марина Магомедовна Шайлиева

Кандидат экономических наук, декан факультета Экономики и управления имени М.И. Агошкова
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе
Москва, Россия
shailievamm@mgri.ru
ORCID 0000-0001-8381-7873

Юлия Николаевна Нестеренко

Доктор экономических наук, заведующая кафедрой Минерально-сырьевого комплекса
Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе
Москва, Россия
nesterenkojn@mgri.ru
ORCID 0000-0002-1887-7834

Виктор Макарович Заернюк

Доктор экономических наук, профессор кафедры Минерально-сырьевого комплекса
Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе
Москва, Россия
zvm4651@mail.ru
ORCID 0000-0003-3669-0907

Поступила в редакцию 17.04.2025
Принята 21.05.2025
Опубликована 30.06.2025

УДК 65.053
DOI
EDN CVMFDP
BAK 5.2.4. Финансы (экономические науки)
OECD 05.02.DK. BUSINESS, FINANCE

Аннотация

В условиях слишком быстрого увеличения размера основных производственных фондов, особенно в начале реализации нового проекта, снижается их эффективность. Недостаточная обеспеченность основными фондами замедляет преодоление прошлых негативных тенденций, снижает успешность производственных проектов. Актуальность проведенного анализа производственных ресурсов обусловлена необходимостью создания инструмента оценки аналитической информации, объясняющей её влияние на процессы производства и реализации продукции предприятия. Целью исследования стала разработка методического подхода к проведению анализа взаимозависимости производственных ресурсов и финансовых показателей деятельности на основе экономико-математического моделирования. Разработана последовательность расчетов аналитических показателей использования основных ресурсов, позволяющая получить достоверную оценку их эффективности. Выявлен и уточнен состав факторов и резервов повышения эффективности использования основных фондов, что позволит повысить рентабельность основных фондов предприятий хлебопекарной отрасли. Эффективность деятельности хлебопекарных предприятий

предложено оценивать в зависимости от параметров основных фондов, материальных затрат и трудозатрат на основе линейных и нелинейных многомерных эконометрических моделей, полученных по трем периодам жизненного цикла предприятия.

Ключевые слова

моделирование, прогнозирование, пищевая промышленность, производственные ресурсы, линейные и нелинейные модели.

Введение

Понятие ресурсоэффективности подразумевает необходимость совершенствования системы ресурсного обеспечения деятельности предприятий в целях повышения эффективности использования ресурсов, а также проведение комплексного анализа, который включает в себя предоставление, выявление и мобилизацию существующих и потенциальных резервов (Лысенко, 2014). Основной целью проведения анализа эффективности использования производственных ресурсов предприятий пищевой промышленности является своевременность изучения изменений в экономических процессах, которые либо грозят оттоком организации от заданного направления или темпа развития, либо свидетельствуют о появлении дополнительных резервов, которые дадут возможность быстро перевести ее в эффективный режим работы. Ценность проведенного анализа производственных ресурсов зависит от своевременного использования аналитической информации и того, как она влияет на процессы производства и реализации пищевой продукции.

Обеспеченность предприятий объектами жизнеобеспечения в необходимом количестве и ассортименте, степень их использования относятся к числу определяющих факторов повышения эффективности производственной деятельности.

Производственные ресурсы составляют материально-техническую базу любого бизнес-процесса и являются фундаментом для его совершенствования и развития (Лысенко, 2014). Процесс производства продукции происходит как экстенсивным путем роста потенциала производственных ресурсов, так и интенсивным путем, обеспечивающим повышение их эффективности за счет увеличения времени работы оборудования, загрузки имеющего парка транспорта в полном объеме, поддержки его работы наиболее квалифицированным образом и т.д. (Тусков, 2023).

Концептуальные подходы к проблеме оценки эффективности использования производственных ресурсов, анализа обеспеченности предприятий ресурсами на основе экономико-математического моделирования представлены в работах многих отечественных и зарубежных авторов. Учеными были установлены важнейшие закономерности и механизмы, касающиеся вопросов разработки математических моделей анализа и прогнозирования экономических процессов (Артамонов, 2024), (Бредихина, 2021; Гильдеева, 2024), совершенствования методов анализа основных производственных ресурсов предприятия на основе имитационного моделирования (Ханова, 2011), разработки моделей прогнозирования управления для автоматизированных производственных систем (Добриневский, 2024), методического обеспечения риск-моделирования применительно к интегрированным корпоративным образованиям в агропромышленном комплексе (Омельченко, 2023).

Анализ современных исследований показал малочисленность сведений, раскрывающих специфику статистического моделирования и прогнозирования в пищевой промышленности и, в частности в хлебопекарном секторе. Получили известность исследования в области методов математического моделирования пищевых смесей (Зеленина, 2014), моделирования и анализа проектов развития хлебопекарной отрасли (Кошелев, 2022; Балыхин, 2021). На преодоление этого пробела в некоторой степени направлено наше исследование.

Труды этих ученых являются основой для формирования и развития концептуальных принципов анализа использования ресурсов предприятия. Вместе с тем, изменение рыночной конъюнктуры, нестабильность и ряд других характеристик национальной экономики в целом и предприятий пищевой промышленности в частности, актуализируют необходимость теоретического обоснования и разработки методических подходов к анализу эффективности использования основных средств предприятий,

адаптируемых к настоящему непрерывному процессу производства, ориентированного на моделирование стратегии их развития с учетом изменений внешней и внутренней среды.

Материалы и методы исследования

Методологическую основу исследования составили комплекс диалектических методов, новейших взглядов и научных подходов в ведущих ученых при анализе эффективности использования основных фондов предприятий.

Для решения поставленной задачи использовались индукционный и дедуктивный методы познания (при сборе и систематизации информационного ресурса); сравнение, абстрагирование, анализ и синтез (для обеспечения системного подхода к решению отдельных проблемных вопросов анализа использования основных фондов); экспертные оценки и абстрагирования (направленные на обоснование выбора значимых факторов влияния на эффективность основных фондов); методы экономико-математического анализа (Смирнов, 2020).

В исследовании предложен методический подход к проведению анализа взаимозависимости четырех показателей: чистой прибыли от реализации продукции (y_{1k}), валовой прибыли (y_{2k}), баланса (сумма текущих и внеоборотных активов) (y_{3k}) и основного капитала (y_{4k}), от восьми объясняющих переменных: оборотных активов (u_{1k}), производственных запасов (u_{2k}), долгосрочных обязательств (u_{3k}), краткосрочных обязательств (u_{4k}), основных средств (u_{5k}), внеоборотных активов (u_{6k}), материальных затрат (u_{7k}), расходов на заработную плату (u_{8k}).

На основе анализа производственных ресурсов хлебопекарной компании, входящей в число десяти крупнейших хлебопекарных предприятий России (далее – «ХПК»), была разработана модель, показывающая отдельно зависимость результирующих факторов от объясняющих переменных.

Результаты и обсуждение

Использованы методы анализа тенденций формирования состава производственных ресурсов и показателей результатов деятельности организации на основе построения многофакторной линейной модели (Маркова, 2019).

Форму многофакторной линейной модели можно описать как:

$$y_i = \sum_{j=1}^n a_j u_j, \quad i = 1, \dots, 4, \quad (1)$$

где $n = 8$ – количество переменных, от которых зависит результат y .

Зависимость результирующих величин можно описать как:

$$y_{ik} \quad i = 1, \dots, 4,$$

последствия по причинам, то есть исходные величины, запишем как:

$$u_{ik} \quad i = 1, \dots, 8.$$

Значение параметров уравнения многофакторной модели определяются как минимальные отклонения между правой и левой частями формулы (1) во всем факторам $k = 1, \dots, m$.

$$\min \sum_{k=1}^m (y_{ik} - \sum_{j=1}^n a_{ij} u_{jk})^2, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (2)$$

Эффективность деятельности организации целесообразно устанавливать в зависимости от параметров основных фондов U_5 , материальных затрат U_7 и трудозатрат U_8 . Мы конструируем эти производственные функции с помощью полиномиальной многомерной аппроксимации условия

$$y = \sum_{i_0, \dots, i_n}^r c_{i_0} u_0^{i_0} \dots u_n^{i_n} \quad (3)$$

где (i_0, \dots, i_n) – мультииндекс, при этом $i_0 + \dots + i_n \leq r$, где r – степень многомерного многочлена формулы (3).

Коэффициенты приближения с многомерного многочлена могут быть найдены методом наименьших квадратов при условии минимизации (Кумратова, 2024). Однако существенная некорректность этой задачи требует использования методов регуляризации. Поэтому для нахождения коэффициентов аппроксимации была применена модель минимизации функционала регуляризации, предложенная в работе (Аргучинцев, 2022).

$$\min \sum_{k=1}^m (y(t_i) - \sum_{i_0, \dots, i_n=0}^r c_{i_0, \dots, i_n} u_0^{i_0} \dots u_n^{i_n}(t_k))^2 + \alpha \sum_{i_0, \dots, i_n=0}^r c_{i_0, \dots, i_n}^2, \quad (4)$$

С помощью данного метода определена зависимость величин y_{ik} от трех производственных ресурсов компании «ХПК» путем использования процедуры регуляризации на основе метода уменьшения степени аппроксимационного полинома.

$$y_t = P(U_5, U_7, U_8); \quad i = 1, \dots, 5, \quad (5)$$

где P – многомерный многочлен уравнения (формула 5).

Анализ обеспеченности производственными ресурсами, проведенный на примере хлебопекарной компании охватывает последовательность расчетов, представленном на рисунке 1.

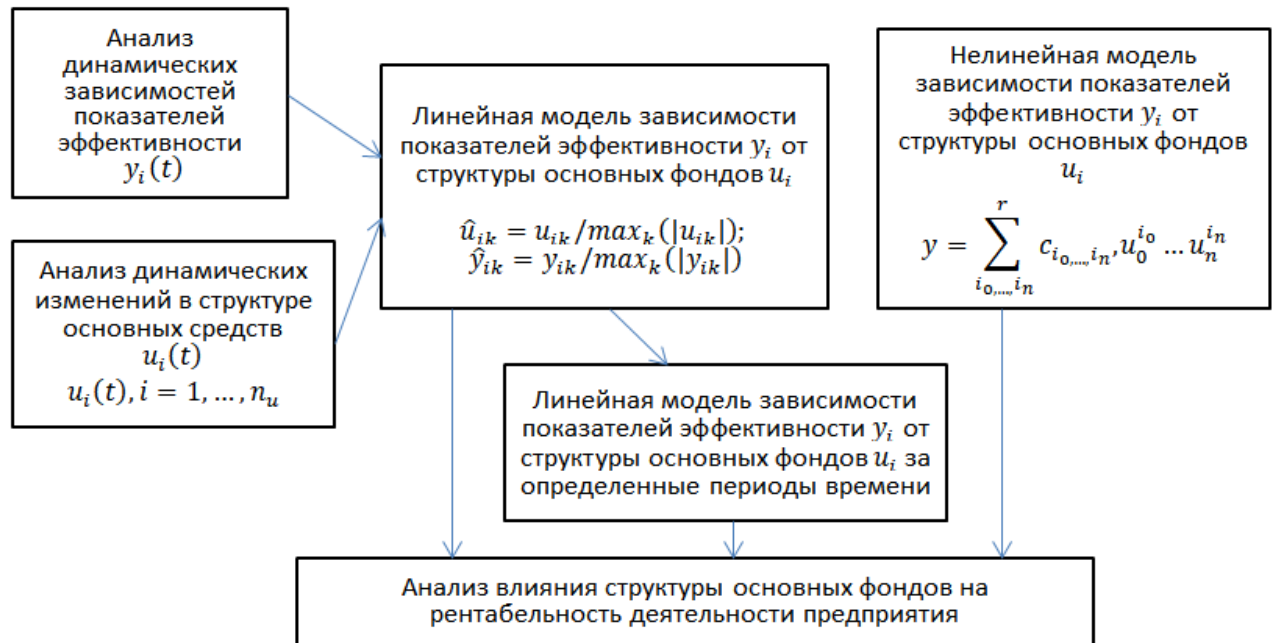


Рисунок 1. Схема расчетов и анализ в исследовании влияния структуры основных фондов на рентабельность деятельности строительной организации

По уравнениям (формулы 1, 2) построена линейная модель зависимости производительности от величин y_{ik} , которые на нее влияют. В результате анализа параметров данной модели, полученных на всем интервале наблюдений $k=1, \dots, 54$, было установлено, что обнаруженная модель является неточной и ее параметры не имеют экономической интерпретации. Кроме того, модель (формула 1) была сконструирована для величин y_{ik} , u_{ik} , стандартизированных для единиц:

$$\hat{u}_{ik} = u_{ik} / \max_k(|u_{ik}|); \quad \hat{y}_{ik} = y_{ik} / \max_k(|y_{ik}|) \quad (6)$$

Но эта модель не привела к решениям, имеющим экономический смысл. То есть, данный отрицательный результат построения линейной модели (3) для всего интервала наблюдения «ХПК» показал, что параметры указанной модели должны быть выделены отдельно для трех различных периодов хозяйственной деятельности организации – спад (1-15 месяцев), период интенсификации производства (15-24 месяцев), устойчивое развитие (24-54 месяцев).

С целью выявления влияния отдельных факторов u_{ik} – элементов структуры капитала на эффективность y_{ik} были отдельно построены отдельные линейные модели (формулы 1, 2) за три периода времени от всего периода наблюдения по «ХПК».

$$П = [1, \dots, 15]; \quad T2 = [15, \dots, 24]; \quad T3 = [24, \dots, 54] \quad (7)$$

Построение модели (формула 1) для «ХПК» за три периода времени (формула 7) по всем восьми параметрам u_{ik} также привела к неточным результатам, согласно которым финансовые показатели деятельности организации зависят только от оборотных средств и материальных запасов. Принимая во внимание неизменность условий обеспечения оборотным капиталом и производственными ресурсами

на трех отрезках времени (7), многофакторная линейная модель по формуле (1) была построена для объясняющих переменных u_{ik} без учета оборотных средств и производственных запасов.

Анализируя значимость этих параметров, нетрудно отметить, что, наряду с повышением производительности деятельности организации, уменьшается влияние на ее доходы долгосрочных обязательств, величина которых прямо пропорциональна чистой прибыли от реализации продукции, в целом, то есть стратегия минимизации этих обязательств неприемлема – очевидно, что необходимо искать их оптимальное значение. Другие обязательства, в частности задолженность по заработной плате, обратно пропорциональны чистой выручке от продаж, и с повышением производительности организации их влияние на прибыльность сводится к нулю.

Влияние основных фондов на производительность труда «ХПК» остается неизменным и низким в течение всех трех выявленных периодов времени. Это свидетельствует о недостаточном обновлении основных средств. Материальные затраты «ХПК» оказывают негативное влияние на доходы и с улучшением финансовых результатов организации их значение снижается. В период экономического спада затраты на оплату труда существенно повлияли на рентабельность «ХПК». Впоследствии, по мере интенсификации производства и его устойчивого развития, их влияние значительно уменьшилось. Сравнивая влияние основных элементов в структуре капитала «ХПК», отметим, что оборотные средства оказывают в целом большее влияние, чем выделяемые ресурсы. На финансовые показатели деятельности компании «ХПК» в период ее роста больше всего повлияла стоимость материальных ресурсов, причем это влияние обратно пропорционально.

Незначительное негативное влияние основных средств на доходы в период экономического роста организации (третий период) свидетельствует о том, что он не обеспечивал полного использования основных средств, и что использование снизилось по сравнению со вторым периодом – периодом «интенсификации».

Графики таких продуцирующих функций поведения, которые представляют собой проекцию трехмерной зависимости, показаны на рисунках 2 и 3.

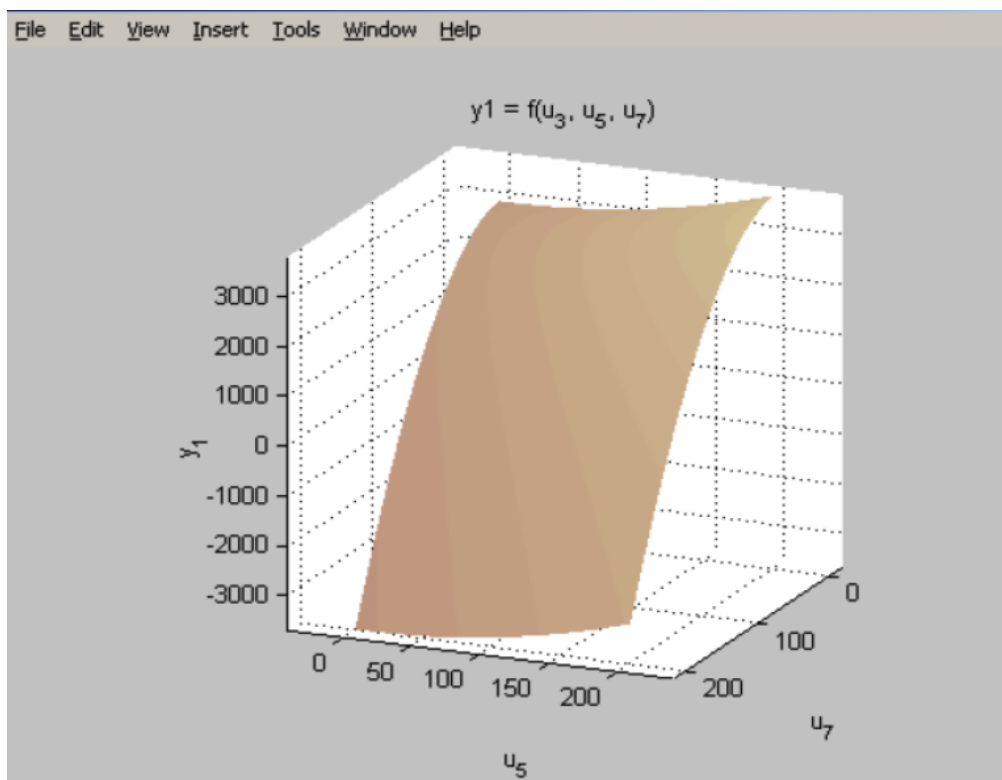


Рисунок 2. График зависимости чистой прибыли от реализации продукции y_1 от оптимизации основных средств u_5 и материальных затрат u_7

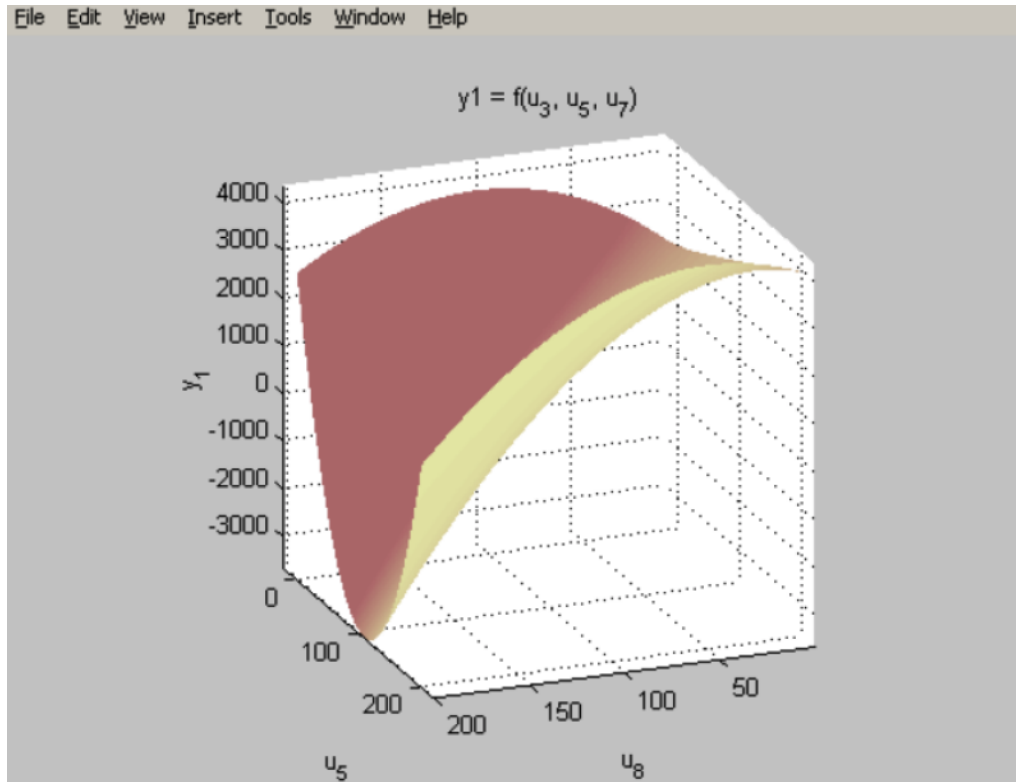


Рисунок 3. График зависимости чистой прибыли от реализации продукции y_1 от оптимизации основных средств u_5 и затрат на оплату труда u_8

Анализируя график зависимости чистой прибыли от основных видов ресурсов (см. рис. 2), мы видим, что увеличение материальных затрат приводит к некоторому замедлению финансового результата, которое, однако, происходит быстрее, чем рост производительности труда в результате улучшения основных средств. Напротив, улучшение основных средств приводит к небольшому, но ускоренному росту. Таким образом, оптимальное управление распределением ресурсов между основными средствами и материальными затратами соответствует линии подъема на плоскости на рисунке 2.

Проводя тот же анализ зависимости чистой прибыли от реализации продукции, от стоимости основных средств и от заработной платы (рис. 3), мы видим, что повышение заработной платы приводит к быстрому, но замедляющемуся росту производительности, который достигает некоторого максимума, после чего начинается снижение производительности. Важно, что на графике на рис. 3 показаны реальные данные, и в этой плоскости начинается некоторый спад производства в зависимости от размера заработной платы. То есть фонд оплаты труда на «ХПК» близок к оптимальному (хотя анализ ничего не говорит об оптимальности его структуры). Из графика на рисунке 3, который соответствует области данных, определяющих (1), видно, что средняя стоимость основных средств падает на дно седловидного бассейна, то есть в организации, к сожалению, наблюдается тенденция к наихудшему из возможных вариантов использования основных средств.

Ниже представлены полученные параметры многомерных производственных функций по «ИХК». Данные расчетов показали достаточный запас производственных ресурсов по показателям u_{ik} .

$$\begin{aligned}
 y_1 &= -3.009 + 3.405u_2 - 6.4485u_2 + 9.704u_2 - 1.276u_7^2 - 4.532u_3u_7 + 1.607u_3^3 + \\
 &\quad 1.301u_7u_5^2 + 3.437u_3u_7^2 - 1.387u_5u_7^2, \\
 y_2 &= -1.387 + 1.178u_3 + 8.645u_7 - 2.462u_3^2 - 6.902u_7^2 - 1.195u_3u_5 - 4.088u_3u_7 + \\
 &\quad 5.667u_3u_5^2 + 3.167u_3u_7^2, \\
 y_3 &= -1.309 + 6.487u_3^2 + 1.238u_3u_7 - 2.985u_3^2u_7,
 \end{aligned}$$

$$u_4 = -4.887 + 6.033u_3 + 2.418u_7 - 2.483u_3^2 - 5.147u_7^2 - 1.897u_3u_7 + 3.376u_3^3 - 1.322u_3^5 + 2.265u_3u_5^2 + 2.159u_7u_5^2 + 2.412u_3u_7^2 - 4.876u_3u_5u_7,$$

Анализ параметров производственных функций «ХПК» показывает, что организация в целом стабильна, ее развитие близко к оптимальному, особенно по размеру фонда оплаты труда и объему материальных затрат. Однако размер основных фондов этой организации останется далеким от желаемых значений.

На основе анализа сложившихся производственных функций, увязывающих показатели рентабельности организации с важнейшими структурными элементами основных фондов, установлен ряд существенных закономерностей производственной деятельности организации, продуктивности использования, обновления и замены основных фондов.

Заключение

Предложенная методика разработана для исследования структуры основных фондов предприятий пищевой отрасли, их динамического изменения и их влияния на общие финансовые показатели деятельности предприятия. Данный метод представляет собой сложную комбинацию ряда звеньев анализа экономических закономерностей жизненного цикла предприятия в сочетании с компьютерным моделированием этих закономерностей для последующей их количественной и качественной оценки.

Для предварительного исследования влияния структуры основных фондов на производительные силы предприятия применены методы качественного анализа тенденций составных элементов основных фондов и показателей производительности труда предприятия. Для временных периодов равномерного экономического поведения организации используется метод построения линейной модели, отражающей зависимость показателей производительности труда от структурных элементов основных фондов с последующим анализом полученной модели и экономической интерпретацией качественных и количественных значений параметров модели.

Практическое использование разработанной методики динамического и структурного исследования влияния основных фондов на финансовые показатели деятельности предприятия подтверждает ее практическую эффективность и показывает, что она пригодна как инструмент для изучения экономического состояния предприятий других отраслей народного хозяйства и как средство поддержки принятия решений при планировании управления основными фондами.

Список литературы

1. Аргунинцев А.В., Срочко В.А. Процедура регуляции билинейных задач оптимального управления на основе конечномерной модели // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2022. Т. 18. Вып. 1. С. 179-187.
2. Артамонов А.А. Разработка математических моделей анализа и прогнозирования экономических процессов с использованием формализма феноменологической теории // Прогрессивная экономика. 2024. № 7. С. 208-219.
3. Балыхин М.Г., Шайлиева М.М., Цыпин А.П. Статистическое исследование потребления хлеба и развития хлебопекарной отрасли России // Продовольственная политика и безопасность. 2021. Т. 8. № 1. С. 97-106.
4. Бредихина О.А., Головин А.А., Спицына А.О. Экономико-математические методы и инструменты в решении задачи оптимизации // Фундаментальные исследования. 2021. № 9. С. 5-11.
5. Гильдеева Я.Р. Статистическое моделирование и прогнозирование динамики производства премиксов в России // Экономические науки. 2024. № 12(241). С. 150-154.
6. Добриневский А.В. Разработка моделей прогнозирования и управления для автоматизированных производственных систем // Хлебопечение России. Т. 68. № 2. 2024. С. 76-87.
7. Зеленина Л.И. Методы математического моделирования пищевых смесей // Исследования в области естественных наук. 2014. № 11.

8. Кошелев В.М., Ворожцова Л.В., Алексанов Д.С., Чекмарева Н.В. Моделирование и анализ проектов развития хлебопекарного сектора региона // Экономика сельского хозяйства России. 2022. № 9. С. 92-99.
9. Кумратова А.М., Плотников В.А. Применение методов нелинейной динамики и машинного обучения для прогнозирования экономических волатильных процессов // IT-Economy. 2024. № 17(3). С. 81-95.
10. Лысенко М.В., Лысенко Ю.В., Таипова Э.Х. Экономико-математическое моделирование оптимизации производства продукции // Фундаментальные исследования. 2014. № 11-8. С. 1750-1755.
11. Маркова А.В., Яценко О.Н., Харитонов Н.Д. Возможности применения математического моделирования в работе хлебопекарного предприятия // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. 2019. № 1(16).
12. Омельченко О.М., Лялин А.В. Методика риск-моделирования в бизнесе интегрированных корпоративных образований агропромышленного комплекса // Хлебопечение России. Т. 67. № 1. 2023. С. 34-46.
13. Смирнов С.П. Системный подход к разработке программных систем для многокритериального анализа, применимых для разработки рационов питания // E-Scio. 2020. № 7(46). С. 1-10.
14. Тусков А. А., Ефимов И. П., Ефимов П. П., Грошева Е. С. Эконометрическое моделирование производства продукции крестьянских (фермерских) хозяйств // Вестник Бурятского государственного университета. Экономика и менеджмент. 2023. № 2. С. 152-166.
15. Ханова А.А., Ганюкова Н.П. Совершенствование метода анализа основных фондов предприятия на основе имитационного моделирования // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 318. № 6.

Economic and mathematical modeling and forecasting of the efficiency of using the production resources of a bakery enterprise

Marina M. Shailiyeva

Candidate of Economic Sciences, Dean of the M.I. Agoshkov Faculty of Economics and Management
Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Exploration University
Moscow, Russia
shailievamm@mgi.ru
ORCID 0000-0001-8381-7873

Yulia N. Nesterenko

Doctor of Economics, Head of the Department of Mineral Resources Complex
Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Exploration University
Moscow, Russia
nesterenkojn@mgi.ru
ORCID 0000-0002-1887-7834

Victor M. Zayernyuk

Doctor of Economics, Professor of the Department of Mineral Resources Complex
Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Exploration University
Moscow, Russia
zvm4651@mail.ru
ORCID 0000-0003-3669-0907

Received 17.04.2025
Accepted 21.05.2025
Published 30.06.2025

UDC 65.053
EDN CVMFDP
VAK 5.2.4. Finance (economic sciences)
OECD 05.02.DK. BUSINESS, FINANCE

Abstract

When the size of fixed assets increases too quickly, especially at the beginning of a new project, their effectiveness decreases. Insufficient provision of fixed assets slows down the overcoming of past negative trends and reduces the success of production projects. The relevance of the analysis of production resources is due to the need to create a tool for evaluating analytical information explaining its impact on the processes of production and sales of the company's products. The purpose of the study was to develop a methodological approach to analyzing the interdependence of production resources and financial performance indicators based on economic and mathematical modeling. A sequence of calculations of analytical indicators of the use of basic resources has been developed, which makes it possible to obtain a reliable assessment of their effectiveness. The composition of factors and reserves for increasing the efficiency of the use of fixed assets has been identified and clarified, which will increase the profitability of fixed assets of enterprises in the bakery industry. The efficiency of bakery enterprises is proposed to be assessed depending on the parameters of fixed assets, material costs and labor costs based on linear and nonlinear multidimensional econometric models obtained over three periods of the enterprise's life cycle.

Keywords

modeling, forecasting, food industry, production resources, linear and nonlinear models.

References

1. Arguchintsev A.V., Vramenko V.A. The procedure for regulating bilinear optimal control problems based on a finite-dimensional model // Saint Petersburg University bulletin. Applied mathematics. Computer science. Management processes. 2022. Vol. 18. Iss. 1. pp. 179-187.
2. Artamonov A.A. Development of mathematical models for the analysis and forecasting of economic processes using the formalism of phenomenological theory // Progressive economics. 2024. № 7. pp. 208-219.
3. Balykhin M.G., Shailiyeva M.M., Tsylin A.P. Statistical study of bread consumption and the development of the baking industry in Russia // Food policy and security. 2021. Vol. 8. № 1. pp. 97-106.
4. Bredikhina O.A., Golovin A.A., Spitsyna A.O. Economic and mathematical methods and tools in solving the optimization problem // Fundamental research. 2021. № 9. pp. 5-11.
5. Gildeeva Ya.R. Statistical modeling and forecasting of the dynamics of premium production in Russia // Economic sciences. 2024. № 12(241). pp. 150-154.
6. Dobrinevsky A.V. Development of forecasting and management models for automated production systems // Bakery of Russia. Vol. 68. № 2. 2024. pp. 76-87.
7. Zelenina L.I. Methods of mathematical modeling of food mixtures // Research in the field of natural sciences. 2014. № 11.
8. Koshelev V.M., Vorozhtsova L.V., Aleksanov D.S., Chekmareva N.V. Modeling and analysis of projects for the development of the bakery sector in the region // The economics of agriculture in Russia. 2022. № 9. pp. 92-99.
9. Kumratova A.M., Plotnikov V.A. Application of nonlinear dynamics and machine learning methods for forecasting economic volatile processes // π -Economy. 2024. № 17(3). pp. 81-95.

10. Lysenko M.V., Lysenko Yu.V., Taipova E.H. Economic and mathematical modeling of optimization of production // Fundamental research. 2014. № 11-8. pp. 1750-1755.
11. Markova A.V., Yashchenko O.N., Kharitonova N.D. Possibilities of applying mathematical modeling in the work of a bakery enterprise // Omsk State Agrarian University electronic scientific and methodological journal. 2019. № 1(16).
12. Omelchenko O.M., Lyalin A.V. Methodology of risk modeling in the business of integrated corporate entities of the agro-industrial complex // Bakery of Russia. Vol. 67. № 1. 2023. pp. 34-46.
13. Smirnov S.P. A systematic approach to the development of software systems for multicriteria analysis, applicable for the development of diets // E-Scio. 2020. № 7(46). pp. 1-10.
14. Tuskov A. A., Efimov I. P., Efimov P. P., Grosheva E. S. Econometric modeling of production of peasant (farm) farms // Buryat State University bulletin. Economics and management. 2023. № 2. pp. 152-166.
15. Khanova A.A., Ganyukova N.P. Improvement of the method of analysis of fixed assets of an enterprise based on simulation modeling // Proceedings of Tomsk Polytechnic University. 2011. Vol. 318. № 6.

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Радиационная обработка хлебобулочных изделий: решение проблемы снабжения удалённых районов свежими продуктами

Олег Михайлович Омельченко

Кандидат экономических наук, доцент, директор

Центр коммерциализации и трансфера технологий, Российский биотехнологический университет

Москва, Россия

Omelchenko_OM@roshleb.com

ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 28.04.2025

Принята 04.05.2025

Опубликована 30.06.2025

УДК 664.826

EDN EFHUMW

БАК 4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ (технические науки)

OECD 02.11.JY. FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

Аннотация

В статье рассматриваются аспекты хранения и транспортировки изделий хлебобулочной промышленности и особенности радиационной обработки продуктов питания, которая представляет собой альтернативу традиционным методам. В статье показан механизм, на котором основан данный метод – воздействие на продукты ионизирующего излучения, эффективно уничтожающего патогенные микроорганизмы, предотвращающее порчу и продлевающее срок годности продукции. Исследование посвящено проблеме безопасности микробиологической безопасности продуктов и связанной с этим проблеме обработки хлебобулочных изделий и, в целом, – проблеме качества логистической составляющей цепочки поставок хлебобулочных изделий от продавца – к покупателю.

Ключевые слова

продовольственная безопасность, радиационная обработка, хлебобулочные изделия, удалённые районы, свежие продукты, ионизирующее излучение, патогенные микроорганизмы, срок годности, логистика, инновационные технологии, физиологическая ценность.

Введение

Продовольственная безопасность является приоритетом национальной стратегии Российской Федерации, особенно в условиях нестабильности мировых рынков сельскохозяйственной продукции и угрозы глобального дефицита продовольствия. В Стратегии научно-технического развития РФ (2024 г.) подчёркнута важность снижения рисков и укрепления устойчивости агропромышленного комплекса. Одним из путей решения является внедрение радиационных технологий для повышения качества и длительности хранения продуктов питания (Черняев, 2019).

Развитие городов и рост урбанизации привели к увеличению спроса на безопасные, лёгкие в приготовлении и быстро приготавливаемые продукты питания. Традиционные методы обработки (сушка, пастеризация, охлаждение) не всегда удовлетворяют современным требованиям, ухудшая вкусовые и ароматические качества продуктов, а также повышая риск контаминации патогенными микроорганизмами при изготовлении и транспортировке (Лунг, 2015). Важнейший вопрос возникает в связи с доставкой свежих продуктов в удалённые и труднодоступные регионы России, где доставка свежих продуктов сопряжена с крупными финансовыми затратами и сложностями транспортировки.

Радиационная обработка продуктов питания, начиная с послевоенных лет, являлась объектом многочисленных токсикологических исследований. Первоначальные подтверждения безопасности были получены ещё в 1926 году, когда немецкие учёные заявили, что радиационная обработка не приводит к образованию токсичных веществ в продуктах питания. Впоследствии данная тематика оставалась предметом регулярных научных обсуждений и исследований, проводимых на лабораторных животных (Урбейн, 1986).

Центральным критерием оценки безопасности выступали различные показатели здоровья, такие как продолжительность жизни, способность к воспроизводству потомства, предрасположенность к развитию опухолевых заболеваний и прочие биологические маркеры. С течением времени стало очевидно, что радиационная обработка продуктов питания не оказывает отрицательных воздействий на здоровье человека (Сатин, 1993).

Несколько авторитетных учреждений, таких как Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ), Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединённых Наций (ФАО) и Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), организовали серию совещаний экспертов, на которых было подтверждено отсутствие токсического риска от потребления продуктов, подвергнутых радиационной обработке. Эти заседания состоялись в 1964, 1969, 1976 и 1980 годах и подтвердили общую концепцию безопасности радиационной обработки продуктов питания (WHO, 1981).

Дополнительно, многие национальные инстанции, такие как Агентство по контролю за продуктами питания и лекарствами США (FDA), также признали радиационную обработку безопасной для человека. Национальные регуляторы других стран, включая Австралию, Канаду, Францию, Германию, Японию, Великобританию и Соединённые Штаты, также присоединились к данным выводам (Мерритт, 1989).

Интересным примером служат исследования, проведённые лабораторией Raltech в США. В рамках этих исследований сравнивались продукты, подвергавшиеся радиационной обработке с дозой до 58 кГр, с традиционно пастеризованной продукцией. Исследования охватывали различные показатели здоровья животных, включая генетические отклонения и мутагенность. Испытания длились продолжительное время, и в итоге не было выявлено ни одного случая неблагоприятного воздействия на здоровье животных вследствие потребления облучённых продуктов (Тхакур, 1994).

Один из вопросов, вызвавших общественный резонанс, касается возможного воздействия радиационной обработки на генетическую структуру организма. Некоторые критики утверждали, что употребление облучённых продуктов может привести к изменению структуры хромосом, известному как полиплоидия. Это состояние характеризуется наличием большего числа хромосом, чем обычно. У человека нормальное количество хромосом равно 46, тогда как при полиплоидии их число может достичь 92 или даже 138 (Дионисио, 2009).

Однако многочисленные исследования, проведённые разными учеными, не подтвердили связь между радиационной обработкой продуктов и возникновением полиплоидии. Напротив, большинство экспериментов показывает, что подобные явления происходят в организме естественным образом и не связаны с приемом облучённых продуктов.

Еще одна дискуссионная тема – свободные радикалы, образующиеся при радиационной обработке. Однако они возникают и при обычных формах обработки продуктов, таких как приготовление пищи или естественное старение. Радикалы нестабильны и быстро вступают в реакции с другими веществами, образуя стабильные соединения. Например, во влажной среде рта они нейтрализуются и не оказывают вредного воздействия. Однако радиационная обработка не делает продукты питания радиоактивными – она представляет собой альтернативу традиционным методам. Этот метод основан на воздействии ионизирующим излучением, эффективно уничтожающим патогенные микроорганизмы, предотвращающим порчу и продлевающим срок годности продукции (Томак, 2015). Радиационная обработка позволяет сохранить полезные вещества, сократить затраты на логистику и ввести в оборот инновационную технологию стерилизации продуктов питания, сохранив их физиологическую ценность.

Материалы и методы исследования

Радиационная обработка продуктов основана на воздействии ионизирующего излучения (электроны, гамма-лучи или рентгеновские лучи) на упакованные или рассыпчатые продукты. Энергия, поглощённая продуктом, разрушает ДНК микроорганизмов, останавливая их размножение и предотвращая порчу. Такой подход позволяет существенно повысить микробиологическую безопасность продуктов питания (Козьмин, 2015).

Современные предприятия оснащены специализированными установками для радиационной обработки, преимущественно использующими ускорители электронов, или гамма-установки. Электронные ускорители обеспечивают точность регулировки глубины проникновения излучения, низкую себестоимость и возможность автоматизации процессов. Однако при избыточной дозировке возможны повреждения органолептических и нутриционных свойств продуктов, поэтому необходимы строгие методы оценки радиационного воздействия, в том числе основанные на применении «биомаркеров» (Чемат, 2023).

Таблица 1. Рекомендуемые дозы радиационного облучения продуктов питания

Категория облучения	Диапазон доз (кГр)	Примеры продуктов
Низкая доза	до 1	Картофель, лук, чеснок, морковь, перец
Средняя доза	1-10	Рыба, мясо, ягоды, овощи, сухофрукты, орехи
Высокая доза	>10	Мясные полуфабрикаты, готовые блюда, медикаменты

Таблица наглядно демонстрирует, какой категории продуктов соответствуют разные дозы радиационного облучения. Рекомендуется выбирать наименьшую возможную дозу, соответствующую задаче обработки. Точной дозировки для обработки хлеба и выпеченных изделий в научных источниках не определялось, так как по результату, датированному 2008 годом, в исследовании стерилизации хлеба (Г.Н. Слабыня) не приведено методики, дающей основание точно определить поглощенную дозу. После этой даты подтвержденных научных исследований с применением в том числе и «биомаркеров» не проводилось (Ченг, 2011).

Законодательство Российской Федерации регулирует вопросы радиационной обработки продуктов питания. Федеральный закон № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» закрепляет обязательные нормы радиационной безопасности, запрещая накопление остаточной радиоактивности в продуктах питания. Санитарно-эпидемиологические нормы, согласованные с требованиями Кодекса Алиментариус (Codex Alimentarius), устанавливают верхнее ограничение дозы облучения на уровне 10 кГр и требования к оборудованию и квалификации персонала (Codex..., 2003).

Результаты и обсуждение

В повседневной жизни любые предметы, включая продукты питания, содержат следовые количества естественной радиоактивности. Обычное потребление калия в продуктах добавляет в рацион около 150-200 беккерелей на килограмм. Государство строго контролирует источники и уровни энергии, используемые при радиационной обработке. Продукты проходят сквозь специальную установку, где подвергаются строго дозированному воздействию излучения, не соприкасаясь напрямую с источником. Максимально допустимая энергия для электронов и рентгеновских лучей составляет 10 и 5 мегавольт электронов соответственно. Даже при сильнейших дозах концентрация радиоактивности в продуктах не превысит тысячной доли беккереля на килограмм, что примерно в 200 000 раз меньше естественного уровня. Таким образом, радиационно обработанные продукты абсолютно безопасны и не становятся радиоактивными, как, например, товары, проверяемые в аэропорту или зубы пациента при рентгеновском обследовании (IAEA, 2006).

Образование так называемых радиолитических продуктов при радиационной обработке продуктов питания представляет собой знакомое явление. К ним относятся глюкоза, муравьиная кислота, ацетальдегид и углекислый газ, которые либо содержатся в продуктах питания естественным

образом, либо образуются при термической обработке (термолизе). Безопасность этих радиолитических продуктов тщательно изучалась специалистами, и не было найдено доказательств их вредности (Моррисон, 1997).

Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США (FDA) провело расчёты, согласно которым при облучении продуктов питания дозой в 1 кГр общая масса незамеченных радиолитических продуктов не превысит трёх миллиграммов на килограмм пищи, что соответствует менее чем трем частям на миллион (Джо, 2018).

Часто высказывалось беспокойство по поводу стабильности свободных радикалов, образуемых при радиационной обработке, особенно в сухих продуктах. Однако такие радикалы также образуются при других видах обработки продуктов, таких как обжарка хлеба, жарка и вакуумная сушка, а также в ходе обычного процесса окисления продуктов питания. Свободные радикалы, будучи весьма реактивными и нестабильными структурами, мгновенно вступают в реакцию с другими веществами, образуя стабильные соединения. Они исчезают, взаимодействуя друг с другом в присутствии жидкости, например слюны во рту. Таким образом, их приём с пищей не вызывает токсических или иных вредных эффектов (Дионисио, 2009).

Это подтверждено результатами долгосрочного исследования, проведённого Федеральным институтом питания в Карлсруэ, Германия. Животные в течение девяти поколений получали сухой молочный порошок, облучённый электронным пучком с дозой 45 кГр. Никакие мутагенные эффекты или опухоли не наблюдались. Точно так же ломоть поджаренного хлеба, содержащий больше свободных радикалов, чем облучённые сухие продукты, вряд ли нанесёт вред. Химические изменения в продуктах питания после радиационной обработки:

Образующиеся при радиационной обработке так называемые «радиолитические» продукты являются хорошо известными соединениями, такими как глюкоза, уксусная и муравьиная кислоты, ацетальдегид и углекислый газ. Эти вещества либо уже присутствуют в продуктах питания естественным образом, либо формируются при термической обработке (термолизе). Специалисты внимательно изучили безопасность радиолитических продуктов, и не обнаружили никаких доказательств их вредного воздействия на организм (Тхакур, 1994).

Американское Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (FDA) вычислило, что при облучении продуктов дозой в 1 кГр общее количество незамеченных радиолитических продуктов не превышает 3 мг на килограмм пищи, что составляет менее 3 частей на миллион.

Иногда высказывались опасения относительно стабильности свободных радикалов, образующихся при радиационной обработке, особенно в сухих продуктах. Однако аналогичные радикалы возникают и при других формах обработки, таких как обжарка хлеба, жарка, вакуумная сушка, а также при естественном процессе окисления продуктов. Будучи крайне нестабильными и реактивными, свободные радикалы немедленно вступают в реакцию с другими веществами, образуя стабильные соединения. В ротовой полости, попадая в слюну, они быстро нейтрализуются, не вызывая токсических или вредных эффектов (Момчилова, 2023).

Эти выводы подтверждаются результатами многолетнего исследования, проведённого немецким Федеральным институтом питания в Карлсруэ. В нём девять поколений животных питались сухим молоком, облучённым электронным пучком с дозой 45 кГр. Никаких мутагенных эффектов или опухолей зафиксировано не было. Точно так же кусок поджаренного хлеба, содержащий больше свободных радикалов, чем облучённые сухие продукты, не принесёт вреда организму.

Стоит отметить, что помимо радиолитических продуктов, радиационная обработка не приводит к таким химическим изменениям, как, например, реакция Майяра или образование акриламида, характерные для других видов обработки, таких как обжаривание или выпекание:

- Реакция Майяра образуется при нагревании продуктов, богатых углеводами и белками. Она придает пище коричневый оттенок и характерный аромат, но также приводит к образованию меланоидинов и акролеина, которые могут обладать антиоксидантными и противовоспалительными

свойствами, но в больших количествах способны оказывать негативное воздействие на организм (Блайчер, 2022).

- Акриламид формируется при высокотемпературной обработке крахмалистых продуктов, таких как печенье, чипсы, кофе и картофель-фри. Акриламид классифицируется как потенциальный канцероген и фактор риска сердечно-сосудистых заболеваний (Хольмер, 2009).

Таким образом, радиационная обработка продуктов питания не приводит к подобным химическим изменениям, присущим термической обработке, и, следовательно, может считаться безопасным методом продления срока годности и повышения микробиологической безопасности продуктов.

Выводы, сделанные в ходе исследований, подтверждающих безопасность радиационной обработки, подкреплены долголетней работой немецкого Федерального института питания. Ученые провели исследование, в котором кормление животных происходило с использованием сухого молока, подвергнувшегося радиационной обработке (дозой 45 кГр). Несмотря на столь высокую дозу облучения, не было обнаружено ни мутагенных эффектов, ни признаков токсичности (Chmielewski, 2023).

Заключение

Радиационная обработка продуктов питания, в том числе хлебобулочных изделий представляет собой инновационный подход к решению проблемы обеспечения удаленных регионов свежими продуктами питания. Активное развитие этой технологии позволит не только стабилизировать поставки свежих продуктов, но и существенно снизить риски для здоровья населения, укрепив продовольственную безопасность страны.

Для достижения успеха необходимо продолжать научные исследования, выбирать оптимальные параметры радиационной обработки, оценивать радиобиологическую эффективность и вести активную информационно-просветительскую работу среди населения. Эти шаги позволят радикально изменить отношение общества к радиационной обработке и вывести ее на принципиально новый уровень.

Список литературы

1. Козьмин Г. В., Гераськин С. А., Санжарова Н. И. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015. 400 с.
2. Черняев А.П. Радиационные технологии. Наука. Народное хозяйство. Медицина. М.: Изд-во Московского университета, 2019. 231 с.
3. Abraham A. G., Wellington T. T., Victoria A. Microbiological quality of chicken sold in accra and determination of D10-value of E. coli // Food and nutrition sciences. 2012. Vol. 3. pp. 693-698.
4. Bleicher J., Ebner E. E., Bak K. H. Formation and analysis of volatile and odor compounds in meat – A review // Molecules. 2022. Vol. 27. Art. 6703.
5. Bliznyuk U., Borshchegovskaya P., Chernyaev A., Ipatova V., Kozlov A., Khmelevskiy O., Mezhetova I., Nikitchenko A., Rodin I., Kozlova E. Hemoglobin derivatives in beef irradiated with accelerated electrons // Molecules. 2023. Vol. 28. pp. 57-73.
6. Chemat A. Shade of innovative food processing techniques: potential inducing factors of lipid oxidation // Molecules. 2023. Vol. 28. № 24. pp. 38-81.
7. Cheng A. Effect of Irradiation and Storage Time on Lipid Oxidation of Chilled Pork // Radiation physics and chemistry. 2011. Vol. 80. № 3. pp. 475-480.
8. Chmielewski A.G. Radiation technologies: The future is today // Radiation physics and chemistry. 2023. pp. 111-233.
9. Code of conduct on the safety and security of radioactive sources. Vienna: IAEA, 2004.
10. De la Torre C. A. L., Conte-Junior C. A., Da Cruz Silva A. C. V., Monteiro M. L. G., Da Costa Lima B. R. C., Mársico E. T., Mano S. B., Franco R. M. Biochemical changes in alternative poultry meat during refrigerated storage // Brazilian journal of veterinary science. 2012. Vol. 19. pp. 195-200.
11. Dionísio A. P., Gomes R. T., Oetterer M. Ionizing radiation effects on food vitamins: A review // Brazilian archives of biological technology. 2009. Vol. 52. pp. 1267-1278.

12. Food irradiation. A technique for preserving and improving the safety of food. Geneva: World Health Organization, 1988.
13. Grispoli L., Chalias A., Barzi E., Pecorari L., Tassinari M., Saraiva C., García-Díez J., Karama M., El-Ashram S., Traina G., и др. Effect of packaging and storage conditions on some quality traits of bovine meat // Italian journal of food safety. 2022. Vol. 11. Art. 10038.
14. Guidance on the import and export of radioactive sources. Vienna: IAEA, 2005.
15. Holmer S.F., McKeith R.O., Boler D.D., Dilger A.C., Eggert J.M., Petry D.B., McKeith F.K., Jones K.L., Killefer J. The effect of pH on shelf-life of pork during aging and simulated retail display // Meat science. 2009. Vol. 82. pp. 86-93.
16. International Atomic Energy Agency. Calibration of radiation protection monitoring instruments. Vienna: IAEA, 2000. 72 p. (Safety Reports Series No. 16).
17. International Atomic Energy Agency. Case studies in the application of probabilistic safety assessment techniques to radiation sources: final report of a coordinated research project, 2001-2003. Vienna: IAEA, 2006. 92 p.
18. International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series № RS-G-1.3. Vienna: IAEA, 1999.
19. International Atomic Energy Agency. Inspection of radiation sources and regulatory enforcement: supplement to IAEA safety standards series № GS-G-1.5. Vienna: IAEA, 2007. (IAEA-TECDOC-1526).
20. International Atomic Energy Agency. Security of radioactive sources. Vienna: IAEA, 2009. 84 p.
21. International Atomic Energy Agency. Workplace monitoring for radiation and contamination, practical radiation technical manual. Vienna: IAEA, 2004.
22. Jo Y., и др. Effects of E-Beam irradiation on amino acids, fatty acids and volatiles of smoked duck meat during storage // Innovative food science and emerging technologies. 2018. Vol. 47. pp. 101-109
23. Lung H., Cheng Y., Chang Y., Huang H., Yang B., Wang Y. Microbial decontamination of food by electron beam irradiation // Trends in food science and technology. 2015. Vol. 44. pp. 66-78.
24. McKinnon R. G. Safety Considerations in the design of gamma irradiation facilities and handling of Cobalt-60 sources // Radiation physics and chemistry. 1988. Vol. 31. № 4-6. pp. 563-565.
25. McMurray C.H., Stewart E.M., Gray R., Pearce J. Detection methods for irradiated foods – current status. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1996.
26. Merritt C. Radiolytic products – are they safe? Safety factors influencing the acceptance of food irradiation technology. Vienna: IAEA, 1989. 490 p.
27. Momchilova S. Effect of gamma irradiation on fat content, fatty acids, antioxidants and oxidative stability of almonds and Electron Paramagnetic Resonance (EPR) study of treated nuts // Molecules. 2023. Vol. 28. № 3. pp. 14-39.
28. Morrison R. M., Buzby J. C., Lin C.-T. J. Irradiating ground beef to enhance food safety // Food review. 1997. Vol. 20. pp. 33-35.
29. Morrison R., Roberts T. Cost variables for food irradiators in developing countries // Food irradiation for developing countries in Africa. Vienna: IAEA, 1990.
30. Moy J. H. Radiation disinfestation of food and agricultural products // Honolulu: Proceedings of an International conference, 1983.
31. Pzczola D.E. Irradiated produce reaches midwest market // Food technology. 1992. Vol. 45. № 5. pp. 89-92.
32. Satin M. Food Irradiation – A Guidebook. Lancaster: Technomic Publishing Co., Inc., 1993.
33. Thakur B.R., Singh R.K. Food irradiation – chemistry and applications // Food reviews international. 1994. Vol. 10. № 4. pp. 437-473.
34. Tomac A. Texture, color, lipid oxidation and sensory acceptability of gamma-irradiated marinated anchovy fillets // Radiation physics and chemistry. 2015. Vol. 106. pp. 337-342.
35. Urbain W. M. Food Irradiation. London: Academic Press Inc., 1986.

36. Wholesomeness of Irradiated Food. Geneva: WHO, 1981. 80 p. (Technical Report Series No. 659).
37. World Health Organization. Safety and Nutritional Adequacy of Irradiated Food. Geneva: World Health Organization, 1994.
38. Zhao F., Wei Z., Zhou G., Kristiansen K., Wang C. Effects of different storage temperatures on bacterial communities and functional potential in pork meat // Foods. 2022. Vol. 11. Art. 2307.

Radiation treatment of bakery products: solving the problem of supplying remote areas with fresh produce

Oleg M. Omelchenko

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Director
Center for Commercialization and Technology Transfer, Russian University of Biotechnology
Moscow, Russia
Omelchenko_OM@roshleb.com
ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 28.04.2025

Accepted 04.05.2025

Published 30.06.2025

UDC 664.826

EDN EFHUMW

VAK 4.3.5. Biotechnology of food and biologically active substances (technical sciences)

OECD 02.11.JY. FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

Abstract

The article discusses the aspects of storage and transportation of bakery products and the features of radiation treatment of food, which is an alternative to traditional methods. The article shows the mechanism on which this method is based – the effect of ionizing radiation on products, which effectively destroys pathogenic microorganisms, prevents spoilage and prolongs the shelf life of products. The study is devoted to the problem of microbiological safety of products and the related problem of processing bakery products and, in general, the problem of the quality of the logistical component of the bakery supply chain from the seller to the buyer.

Keywords

food safety, radiation treatment, bakery products, remote areas, fresh food, ionizing radiation, pathogenic microorganisms, shelf life, logistics, innovative technologies, physiological value.

References

1. Kozmin G. V., Geraskin S. A., Sanzharova N. I. Radiation technologies in agriculture and the food industry. Obninsk: VNIIRAE, 2015. 400 p.
2. Chernyaev A.P. Radiation technologies. Science. National economy. Medicine. M.: Publishing House of Moscow University, 2019. 231 p.
1. Abraham A. G., Wellington T. T., Victoria A. Microbiological quality of chicken sold in accra and determination of D10-value of E. coli // Food and nutrition sciences. 2012. Vol. 3. pp. 693-698.
2. Bleicher J., Ebner E. E., Bak K. H. Formation and analysis of volatile and odor compounds in meat – A review // Molecules. 2022. Vol. 27. Art. 6703.

3. Bliznyuk U., Borshchegovskaya P., Chernyaev A., Ipatova V., Kozlov A., Khmelevskiy O., Mezhetova I., Nikitchenko A., Rodin I., Kozlova E. Hemoglobin derivatives in beef irradiated with accelerated electrons // *Molecules*. 2023. Vol. 28. pp. 57-73.
4. Chemat A. Shade of innovative food processing techniques: potential inducing factors of lipid oxidation // *Molecules*. 2023. Vol. 28. № 24. pp. 38-81.
5. Cheng A., и др. Effect of Irradiation and Storage Time on Lipid Oxidation of Chilled Pork // *Radiation Physics and Chemistry (научный журнал)*. 2011. Vol. 80. № 3. pp. 475-480.
6. Chmielewski A.G. Radiation technologies: The future is today // *Radiation physics and chemistry*. 2023. pp. 111-233.
7. Code of conduct on the safety and security of radioactive sources. Vienna: IAEA, 2004.
8. De la Torre C. A. L., Conte-Junior C. A., Da Cruz Silva A. C. V., Monteiro M. L. G., Da Costa Lima B. R. C., Mársico E. T., Mano S. B., Franco R. M. Biochemical changes in alternative poultry meat during refrigerated storage // *Brazilian journal of veterinary science*. 2012. Vol. 19. pp. 195-200.
9. Dionísio A. P., Gomes R. T., Oetterer M. Ionizing radiation effects on food vitamins: A review // *Brazilian archives of biological technology*. 2009. Vol. 52. pp. 1267-1278.
10. Food irradiation. A technique for preserving and improving the safety of food. Geneva: World Health Organization, 1988.
11. Grispoli L., Chalias A., Barzi E., Pecorari L., Tassinari M., Saraiva C., García-Díez J., Karama M., El-Ashram S., Traina G., и др. Effect of packaging and storage conditions on some quality traits of bovine meat // *Italian journal of food safety*. 2022. Vol. 11. Art. 10038.
12. Guidance on the import and export of radioactive sources. Vienna: IAEA, 2005.
13. Holmer S.F., McKeith R.O., Boler D.D., Dilger A.C., Eggert J.M., Petry D.B., McKeith F.K., Jones K.L., Killefer J. The effect of pH on shelf-life of pork during aging and simulated retail display // *Meat science*. 2009. Vol. 82. pp. 86-93.
14. International Atomic Energy Agency. Calibration of radiation protection monitoring instruments. Vienna: IAEA, 2000. 72 p. (Safety Reports Series No. 16).
15. International Atomic Energy Agency. Case studies in the application of probabilistic safety assessment techniques to radiation sources: final report of a coordinated research project, 2001-2003. Vienna: IAEA, 2006. 92 p.
16. International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series № RS-G-1.3. Vienna: IAEA, 1999.
17. International Atomic Energy Agency. Inspection of radiation sources and regulatory enforcement: supplement to IAEA safety standards series № GS-G-1.5. Vienna: IAEA, 2007. (IAEA-TECDOC-1526).
18. International Atomic Energy Agency. Security of radioactive sources. Vienna: IAEA, 2009. 84 p.
19. International Atomic Energy Agency. Workplace monitoring for radiation and contamination, practical radiation technical manual. Vienna: IAEA, 2004.
20. Jo Y., и др. Effects of E-Beam irradiation on amino acids, fatty acids and volatiles of smoked duck meat during storage // *Innovative food science and emerging technologies*. 2018. Vol. 47. pp. 101-109
21. Lung H., Cheng Y., Chang Y., Huang H., Yang B., Wang Y. Microbial decontamination of food by electron beam irradiation // *Trends in Food Science and Technology (научный журнал)*. 2015. Vol. 44. pp. 66-78.
22. McKinnon R. G. Safety Considerations in the design of gamma irradiation facilities and handling of Cobalt-60 sources // *Radiation physics and chemistry*. 1988. Vol. 31. № 4-6. pp. 563-565.
23. McMurray C.H., Stewart E.M., Gray R., Pearce J. Detection methods for irradiated foods – current status. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1996.
24. Merritt C. Radiolytic products – are they safe? Safety factors influencing the acceptance of food irradiation technology. Vienna: IAEA, 1989. 490 p.

25. Momchilova S. Effect of gamma irradiation on fat content, fatty acids, antioxidants and oxidative stability of almonds and Electron Paramagnetic Resonance (EPR) study of treated nuts // *Molecules*. 2023. Vol. 28. № 3. pp. 14-39.
26. Morrison R. M., Buzby J. C., Lin C.-T. J. Irradiating ground beef to enhance food safety // *Food review*. 1997. Vol. 20. pp. 33-35.
27. Morrison R., Roberts T. Cost variables for food irradiators in developing countries // *Food irradiation for developing countries in Africa*. Vienna: IAEA, 1990.
28. Moy J. H. Radiation disinfestation of food and agricultural products // Honolulu: Proceedings of an International conference, 1983.
29. Pzczola D.E. Irradiated produce reaches midwest market // *Food technology*. 1992. Vol. 45. № 5. pp. 89-92.
30. Satin M. *Food Irradiation – A Guidebook*. Lancaster: Technomic Publishing Co., Inc., 1993.
31. Thakur B.R., Singh R.K. Food irradiation – chemistry and applications // *Food reviews international*. 1994. Vol. 10. № 4. pp. 437-473.
32. Tomac A. Texture, color, lipid oxidation and sensory acceptability of gamma-irradiated marinated anchovy fillets // *Radiation physics and chemistry*. 2015. Vol. 106. pp. 337-342.
33. Urbain W. M. *Food Irradiation*. London: Academic Press Inc., 1986.
34. *Wholesomeness of Irradiated Food*. Geneva: WHO, 1981. 80 p. (Technical Report Series No. 659).
35. World Health Organization. *Safety and Nutritional Adequacy of Irradiated Food*. Geneva: World Health Organization, 1994.
36. Zhao F., Wei Z., Zhou G., Kristiansen K., Wang C. Effects of different storage temperatures on bacterial communities and functional potential in pork meat // *Foods*. 2022. Vol. 11. Art. 2307.

Печатное издание «Хлебопечение России»
Том 69 (2025). № 1-2

ISSN 2073-3569

Реестровая запись о регистрации 014330 от 10.01.1996г.
Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и
массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Издание включено в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК и Российский
индекс научного цитирования.

Рукописи подвергаются редакционной обработке. Точки зрения авторов и редакционной коллегии могут
не совпадать. Авторы публикуемых материалов несут ответственность за их научную достоверность.

Адрес редакции: 109028, г. Москва, а/я 50, Российский Союз пекарей
e-mail: xcleb-vak@mail.ru, <https://hbreview.ru>

Подписано к размещению 30.06.2025.
Отпечатано в типографии ООО «Российский союз пекарей», 109028, г. Москва, а/я 50.
Подписано в печать 30.06.2026. Тираж 300 экз. Формат А4. Свободная цена.

© Учредитель ООО «Российский союз пекарей», 2025

Printed edition «Bakery of Russia»
Volume 69 (2025). Issue 1-2

ISSN 2073-3569

Registry record of registration 014330 dated 10.01.1996г.
Registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass
Communications (Roskomnadzor).

The edition is included into The List of The Reviewed Scientific Publications recommended by The Highest
Certifying Commission and The Russian Index of Scientific Citing.

Manuscripts are exposed to editorial processing. The points of view of authors and an editorial board can not
coincide. Authors of the published materials bear responsibility for their scientific reliability.

Address of the editorial office: 109028, Moscow, a/ya 50, Russian Union of Bakers
e-mail: xcleb-vak@mail.ru, <https://hbreview.ru>

Signed for placement on 30.06.2025.
Printed at the printing house of the NGO «Russian Bakers Union», 109028, Moscow, P.O. Box 50.
Signed for printing on 30.06.2025. Print run of 300 copies. A4 format. Free price.

© Founder NGO «Russian Bakers Union», 2025