

Методы активной упаковки: сравнительный анализ технологий продления срока годности продуктов

Сергей М. Махов¹ makhovsm@gmail.com  0009-0001-9626-4689

¹ МГУТУ им. Разумовского, ул. Земляной Вал, д. 73, г. Москва, 109004, Россия

Аннотация. Статья представляет обзор и систематизацию подходов активной упаковки пищевых продуктов с акцентом на механизмы действия и эффективность по ключевым категориям товаров. Цель работы — описать, какие решения (поглотители кислорода и влаги, этилен-ловушки, антимикробные системы, а также упаковка в модифицированной газовой среде, MAP) обеспечивают наибольшее продление срока годности и снижение микробной нагрузки, и в каких случаях их целесообразно комбинировать. Проведено обобщение экспериментальных данных из рецензируемых публикаций и промышленных кейсов с приведением ориентировочных количественных эффектов. Показано, что O₂-поглотители на основе железа в вакууме или в сочетании с MAP снижают остаточный кислород до сотых процента и продлевают хранение мяса до 21–28 суток; для рыбы отмечено двукратное и более увеличение сроков свежести. Для фруктов и овощей наибольший эффект даёт связка этилен-поглотителя с оптимальным газовым режимом (прибавка 2–4 недели), тогда как для хлебобулочных изделий высоко-CO₂-MAP обеспечивает 14–21 день «без плесени». Влагоабсорбенты уменьшают экссудат и косвенно сдерживают порчу, а антимикробные покрытия добавляют 2–5 дней и дают снижение на 1–2 log. Наилучшие результаты достигаются при комбинировании технологий с учётом чувствительности продукта к кислороду, влаге и рисков анаэробного роста; предложена сводная таблица для практического выбора решений.

Ключевые слова: активная упаковка, срок годности, поглотители кислорода, модифицированная атмосфера, антимикробные системы, пищевые продукты.

Active Packaging Methods: A Comparative Analysis of Technologies for Extending Shelf Life of Food Products

Sergey M. Makhov¹ makhovsm@gmail.com  0009-0001-9626-4689

¹ Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management, 73 Zemlyanoy Val Street, Moscow, 109004, Russia

Abstract. This article reviews and systematizes approaches to active food packaging, with emphasis on mechanisms and category-specific efficacy. The aim is to identify which solutions—oxygen and moisture scavengers, ethylene traps, antimicrobial systems, and modified-atmosphere packaging (MAP)—deliver the greatest shelf-life extension and microbial risk reduction, and when their combination is justified. We synthesize peer-reviewed data and industrial cases and provide indicative quantitative effects. Iron-based O₂ scavengers used under vacuum or together with MAP lower residual oxygen to hundredths of a percent and extend chilled meat storage to 21–28 days; for fish and seafood, freshness periods typically double or more. For fresh produce, the most effective pairing is an ethylene scavenger with an optimized O₂/CO₂ balance, adding ~2–4 weeks while preserving sensory quality. In bakery products, high-CO₂ MAP yields 14–21 mold-free days. Moisture absorbers reduce exudate and indirectly slow spoilage, whereas antimicrobial coatings/films add 2–5 days and achieve ~1–2 log reductions in target microorganisms. The best outcomes arise from tailoring and combining technologies to product physiology (oxygen and moisture sensitivity) and safety constraints (e.g., anaerobic growth). A summary table is provided to support practical selection and integration.

Keywords: active packaging, shelf life, oxygen scavengers, modified atmosphere, antimicrobial systems, food products.

Введение

Активная упаковка – это тип упаковки, который модифицирует условия хранения с целью продления срока годности и повышения безопасности продукта [1, 2]. В активной упаковке используют специальные компоненты, поглощающие или выпускающие в упаковочную среду биологически активные вещества (кислород, влагу, этилен, антимикробные агенты и т. д.) [1], что дает возможность замедлить порчу продуктов без добавления химических консервантов.

Критически важным является поддержание низкого содержания кислорода, так как именно кислород способствует прогорклости жиров, утрате витаминов, изменению цвета мяса и интенсивному росту бактерий и плесени [3] [4]. Активная упаковка позволяет справиться с этими проблемами – она тормозит окислительные реакции и микробиологические процессы в процессе поглощения кислорода и выделения углекислого газа [5] [2]. В данной статье будут рассмотрены основные типы активной упаковки – поглотители кислорода, влаги, этилена,

Для цитирования

Махов С.М. Методы активной упаковки: сравнительный анализ технологий продления срока годности продуктов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 77–84. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-77-84

For citation

Makhov S.M. Active Packaging Methods: A Comparative Analysis of Technologies for Extending Shelf Life of Food Products. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 77–84. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-77-84

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

антимикробные системы и модифицированные газовые среды – а также их эффективность для различных пищевых категорий – мясо, рыба, фрукты и овощи, молочные и хлебобулочные изделия.

Результаты и обсуждение

Поглотители кислорода представляют собой химические добавки (чаще всего на основе железа), упакованные в маленькие саше, которые помещают внутрь герметичной упаковки [6] – они активно взаимодействуют с кислородом, т. е. удаляют его из пространства упаковки [4, 7]. Типичный механизм – это окисление железного порошка до Fe_2O_3 при участии влаги [8]. Благодаря окислению внутри упаковки создаётся практически бескислородная среда, предотвращающая окисление жиров, потемнение свежего мяса и развитие аэробных микроорганизмов [8]. Например, использование кислородного поглотителя удвоило срок хранения охлаждённой рыбы (тилапии) – с 10 до 20 дней – по сравнению с хранением без поглотителя [9, 10]. В мясной промышленности кислородные поглотители помогают сохранить ярко-красный цвет говядины (предотвращают образование метмиоглобина) и защитить мясо от плесени; в хлебобулочных изделиях они снижают скорость «прогоркания» жиров и тормозят рост плесневых грибов. При этом в продуктах, чувствительных к влаге, необходимо аккуратно дозировать поглотители кислорода, поскольку реакция окисления порой требует ее присутствия.

Избыточная влажность внутри упаковки стимулирует рост плесени и бактерий, ухудшает внешний вид и текстуру продуктов. Поглотители влаги (десиканты) – это материалы (силикагель, натриевые соли угольной кислоты и др. [11]) или впитывающие прокладки, которые впускаются в упаковку для поглощения конденсированной влаги. Они особенно эффективны для свежих овощей и фруктов, а также используются для мяса и морепродуктов. Например, отмечено, что во фруктово-овощных упаковках применяют саше с Na_2CO_3 или силикагелем, а в мясных и рыбных – влагопоглощающие прокладки: они впитывают сок (экссудат), уничтожают неприятные запахи и замедляют рост микроорганизмов [12]. Такая технология позволяет дольше сохранять овощи хрустящими и предотвращает «размякание» тортов и пр. кондитерских изделий. Именно в хлебобулочных изделиях снижение влажности препятствует образованию плесени (молекулы воды необходимы грибкам) – при этом важно следить за тем, чтобы продукция преждевременно не пересыхала и не черствела.

Теперь рассмотрим так называемых «поглотителей этилена». Этилен – это газообразный гормон растений, стимулирующий созревание

плодов (например, яблок, бананов, томатов). При хранении фруктов и овощей его концентрация может повышаться и приводить к ускоренному «увяданию». Поглотители этилена (например, химические реагенты на основе перманганата калия, цеолитов, диолов TiO_2 и др.) «удаляют» газ из атмосферы упаковки – системы вступают в химические реакции или физически адсорбируют этилен [13]. В результате замедляется процесс созревания фруктово-овощной продукции – но при этом сохраняются вкус, текстура и витамины. Исследователи утверждают, что этиленовые поглотители продлевают срок годности и сохраняют исходное качество свежих фруктов и овощей [14], а также ограничивают накопление этилена [13]. Для продуктов других категорий (мясо, рыба, «молочка», хлеб) роль этилена минимальна, поэтому целесообразно использовать «поглотители» преимущественно в упаковке свежих овощей и фруктов.

Антимикробная упаковка состоит из материалов, которые содержат в ее структуре или покрытии вещества с антимикробной «активностью» (натуральные и синтетические) – т. е. органические кислоты (сорбиновая, янтарная), эфирные масла, наноагенты (например, серебро), бактериоцидные пептиды (нисины), ферменты и пр. [15] Такие добавки либо высвобождаются из упаковки, либо контактируют с поверхностью продукта и подавляют рост патогенных и порчеобразующих микроорганизмов. Антимикробные системы значительно продлевают «период покоя» микроорганизмов [16, 17] – также улучшается микробиологическая безопасность и качество продуктов; уменьшается риск порчи, продлевается срок годности. Антимикробная упаковка применяется во многих категориях – в мясной и рыбной промышленности (для свежего и копчёного мяса), в производстве сыров и молочных продуктов, в упаковке готовых блюд и салатов, а также в хлебобулочных изделиях (например, для предотвращения распространения плесени). Выбор конкретного агента и его концентрации зависит от типа продукта и ожидаемого срока хранения [17].

Далее рассмотрим упаковку в модифицированной газовой среде (Modified Atmosphere Packaging, MAP), которая основана на изменении газового состава внутри упаковки [18]. Атмосферу обогащают или разбавляют различными газами (обычно CO_2 , N_2 , O_2) в оптимальных для продукта соотношениях [19]. «Замена» воздуха позволяет снизить окисление и сохранить органолептические свойства. Карбонный диоксид действует как антимикробный газ – при концентрациях от 20% и выше он тормозит рост бактерий и грибов [19]. Азот инертен,

используется для вытеснения кислорода и предотвращения деформации упаковки. Например, большинство мясных и рыбных продуктов упаковывают в смеси с 25–80% CO_2 и остальным N_2 , это значительно тормозит развитие патогенов [19]. Для свежих фруктов и овощей зачастую применяют пассивное MAP – подбирают полимерную плёнку с необходимой проницаемостью, поддерживающую оптимальный баланс O_2/CO_2 и уменьшающую потерю влаги и витаминов. Для хлебобулочных изделий MAP с высоким содержанием CO_2 (иногда до 100% CO_2) резко увеличивает так называемый «период хранения без плесени» – так, исследователи утверждают, что количество дней может повыситься до тридцати [19]. Однако стоит помнить, что MAP не устраняет, например, черствение хлеба, вызванное постепенным исчезновением из него влаги.

Теперь проведем сравнительный анализ по категориям продуктов.

– Для свежего мяса важно сохранение красного цвета и сохранение жиров. Кислородные поглотители помогают избежать потемнения (метмиоглобина) и замедлить рост аэробных бактерий [4]. MAP с высоким содержанием O_2 (для сохранения цвета) и CO_2 (для антимикробного эффекта) широко применяется на мясокомбинатах [19]. Антимикробные добавки (нисины, молочные кислоты и др.) в упаковке препятствуют росту патогенов. Поглотители влаги удерживают «мясной сок», снижают активность размножения микрофлоры. Также можно отметить следующую взаимосвязь – кислородные поглотители в сочетании с MAP позволяют снижать остаточный O_2 до сотых процента – это увеличивает срок хранения мяса [4].

– Рыбное филе и охлаждённые морепродукты особенно подвержены окислительной порче и росту присутствия псевдомонад. Использование O_2 -поглотителей удваивает (и даже утраивает) время свежести рыбы при охлаждении [10]. Для поглощения влаги применяются специальные впитывающие прокладки, уменьшающие экссудат и задерживающие появление посторонних запахов [12]. Антимикробные плёнки (на основе фитозлементов, лизоцима и др.) и MAP с высоким содержанием CO_2 дополнительно подавляют микробное загрязнение. На практике специалисты зачастую комбинируют технологии – например, упаковывают филе рыбы в газовую среду с 20–60% CO_2 и добавляют O_2 -поглотитель для минимизации остаточного кислорода [19], что позволяет безопасно хранить свежую рыбу до нескольких недель в холодильнике.

– В случае фруктов и овощей основная проблема – этиленовое созревание и плесневение. Поглотители этилена (саше с KMnO_4 или ферментные системы) задерживают созревание –

например, яблоки и бананы хранятся дольше без потери витаминов [13]. Падение влажности в упаковке за счёт десикантов уменьшает гниение, а антимикробные покрытия (например, из хитозана или протеинов) способны подавлять рост грибков и бактерий на поверхности фруктов и овощей. MAP-подходы подбирают следующим образом – например, используются плёнки с регулируемой проницаемостью, поддерживающие пониженный O_2 (2–5%) и повышенный CO_2 (5–15%) – продлевает срок хранения. Можно предположить, что для свежих овощей / фруктов наиболее эффективна комбинация «этиленовый поглотитель + оптимальная газовая среда», а также удаление избыточной влаги.

– При упаковке сыров и других молочных изделий специалисты заостряют внимание на O_2 -*поглотителях, которые позволяют предотвратить окисление жиров в жирных сырах и сохранить свежее молоко дольше (особенно это касается стерильных упаковок). MAP с CO_2 (10–30%) применяют в сырах для сдерживания распространения плесени и патогенов [20]. Антимикробные добавки (например, нистатин в оболочке сыра или лизоцим) реально увеличивают срок хранения без риска порчи. В молочных напитках (кефир, йогурт) активная упаковка не так распространена, поскольку микрофлора зачастую необходима для вкуса; но может использоваться для удлинения «свежего» периода готовой продукции. Избыток влаги в сухих молочных продуктах (сыроте, сухом молоке) обычно не является проблемой – поэтому влагопоглотители используются редко.

– Для хлебобулочных изделий главными угрозами являются плесень и черствение. O_2 -поглотители здесь помогают задержать рост аэробных грибков (хотя они не убивают споры), а также замедлить автолиз клейковины. MAP с высоким CO_2 (иногда ближе к 100%) существенно увеличивает «безплесневый» период. Специалисты отмечают, что CO_2 -упаковка может продлить срок хранения изделия до нескольких недель [19]. Антимикробные покрытия (на основе сорбиновой кислоты, пропионатов или растительных экстрактов) активно используются для защиты от грибков и бактерий. Влага контролируется иначе – чаще за счёт самих рецептур и ламинирования упаковок (антифог-плёнки уменьшают запотевание). В целом наиболее эффективной для хлеба является комбинация «MAP + антимикробный агент» – так, первый подавляет развитие плесени, второй подавляет уже живущие микробы, а «смесь» газов сохраняет свежесть мякиша.

Итак, различные методы активной упаковки дополняют друг друга и зачастую применяются в комбинации.

Таблица 1.

Продление срока хранения различных продуктов с помощью активной упаковки (приведены примерные значения: срок годности без и с упаковкой, увеличение в%, снижение микробной нагрузки, основные действующие вещества или технологии)

Категория продукта	O ₂ -поглотители (удаление O ₂)	Поглотители влаги (абсорбция конденсата)	Модифицир. атмосфера (MAP) (газовый состав)	Антимикробные системы (ингибирование микрофлоры)	Этилен-поглотители (удаление C ₂ H ₄)
Мясо (красное мясо, птица)	Срок хранения: ~7–10 дней в обычной атмосфере vs до 21–28 дней с O ₂ -поглотителем в сочетании с вакуумом (увеличение ~+150–200%). Микробная нагрузка: замедлен рост аэробов, подавлено окисление жиров; Вещества: саше с порошком железа (Fe) или аскорбатами, поглощающими кислород	Срок хранения: незначительно влияет отдельно (мясо уже упаковано во влагонепроницаемую плёнку), но влагопоглощающие вкладыши уменьшают «дрип» /подтёки, что косвенно снижает порчу. Микробная нагрузка: снижение общего количества бактерий ~на 0,5–1 log за счёт удаления жидкого субстрата. Вещества: впитывающие подложки с цеолитом и антимикробными пропитками.	Срок хранения: ~7 дней (обычный воздух) vs ~10–14 дней в газовой смеси 60–80% O ₂ + 20–40% CO ₂ (High-O ₂ MAP); при Low-O ₂ MAP (0% O ₂ , 20–30% CO ₂ , N ₂ баланс) – до 21 дня (с последующим «воспусканием» кислорода для покраснения мяса). Увеличение ~+50–100%. Микробная нагрузка: замедлен рост аэробных психротрофов, но возможен рост анаэробов – требуется охлаждение. Газы: типично либо 70% O ₂ /30% CO ₂ (для красного цвета, короткое хранение), либо 0% O ₂ /30% CO ₂ /70% N ₂ (для длительного хранения без окисления).	Срок хранения: +2–5 дней к вышеуказанному (например, охлаждённая говядина ~21 день в обычной вакуумной упаковке vs до 26 дней с антимикробной плёнкой). Микробная нагрузка: снижение на ~1–2 log (в т. ч. <i>Listeria</i> , <i>Pseudomonas</i>) за счёт постепенного высвобождения антибактериальных агентов. Вещества: диоксид хлора, органические кислоты (молочная, сорбиновая), серебро- и цинксодержащие наночастицы, ферменты.	Не применяется (мясные продукты не выделяют этилен; контроль этилена не влияет на срок хранения мяса).
Рыба и морепродукты	Срок хранения: ~4–6 дней в льду (обычно) vs ~10–12 дней с O ₂ -абсорбером в упаковке (например, стейки сома: 10 дн. → 20 дн. при 0 °С, +100%). Микробная нагрузка: подавлен рост аэробных психрофильных бактерий, замедлено прогоркание жиров. Вещества: железный порошок, активированный уголь (для поглощения O ₂ и летучих аминов – запахов рыбы).	Срок хранения: влагопоглощающие вставки уменьшают количество свободной жидкости (талой воды от льда, экссудат), что снижает рост бактерий на поверхности. Приrost срока хранения незначителен (рыба главным образом ограничена микробами и окислением). Микробная нагрузка: снижение ~0,5 log общей микрофлоры. Вещества: абсорбенты на основе целлюлозы, глины; иногда с антисептиками (например, соль бензойной кислоты).	Срок хранения: ~4–5 дней (воздух, охлаждение) vs ~11–15 дней в Modified Atmosphere (обычно 40–60% CO ₂ + 40–60% N ₂) – увеличение ~в 2–3 раза. Микробная нагрузка: значительное замедление роста псевдомонад, <i>Shewanella</i> и др. аэробов; возможен привкус CO ₂ при высоких концентрациях. Газы: 40–60% CO ₂ , остаток N ₂ ; O ₂ обычно исключается во избежание порчи жиров и обесцвечивания.	Срок хранения: +2–4 дня за счёт противомикробных упаковок (например, плёнки с экстрактом семян грейпфрута продлевают хранение филе рыбы с 12 до ~15–16 дней при 4 °С). Микробная нагрузка: подавление специфических патогенов (<i>Listeria monocytogenes</i> , <i>Vibrio</i> spp. и др.) на ~1–2 log. Вещества: антибактериальные покрытия с эфирными маслами (тимол, эвкалиптол), хиты, или биополимерные плёнки с ферментами.	Не применяется (рыба и морепродукты не выделяют значимого количества этилена).
Свежие фрукты и овощи	Срок хранения: некоторая выгода для измельчённых салатов и продуктов с высокой дыхательной активностью – поглотители O ₂ замедляют потемнение и рост плесени (например, резаный салат: +1–2 дня к хранению при 4 °С). Микробная нагрузка: снижение роста аэробных спор образующих плесеней. Вещества: саше с аскорбатом натрия, феррозолю, поглощающие O ₂ внутри упаковки.	Срок хранения: увеличение на ~20–30% за счёт удаления конденсата (например, огурцы без конденсата хранятся ~14 дней vs 10–12 с конденсатом). Поглотители влаги предотвращают гниение и рост плесени на поверхности продуктов (ягод, зелени). Микробная нагрузка: косвенно снижается (сухая среда подавляет грибы). Вещества: фильтры и вкладыши с силикагелем, цеолитом; впитывающие салфетки в лотках с ягодами.	Срок хранения: в модифицированной атмосфере (например, для салата 5% O ₂ + 5% CO ₂) увеличивается примерно в 1,5 раза (листья салата ~5 дн. → 7–8 дней). Для фруктов (яблоки, ягоды) комбинация пониженного O ₂ и повышенного CO ₂ замедляет дыхание и созревание, продлевая хранение на недели. Микробная нагрузка: не основное ограничение (главное – замедление физиологических процессов продукта). Газы: низкий O ₂ (3–5%), CO ₂ 5–10%, остальное N ₂ (для овощей); для фруктов иногда повышенный CO ₂ или добавка N ₂ для инертной среды.	Срок хранения: существенно увеличивается за счёт антимикробных упаковок против плесени и бактерий – например, плёнка с яблочным экстрактом продлевает свежесть ягод на +3–4 дня, снижая плесневение. Микробная нагрузка: уменьшение спор грибов (<i>Botrytis</i> , <i>Penicillium</i>) и бактерий на ~1 log. Вещества: натуральные экстракты (тимьян, розмарин, хмелевые кислоты) в упаковке, противогрибковые препараты (низин, натамицин) для плодов.	Срок хранения: значительно возрастает для чувствительных к этилену плодов: +2–4 недели к хранению при поглощении C ₂ H ₄ . Например, бананы: ~2 недели (без) vs ~4 недели с этилен-фильтром; томаты: ~20 дней → 30–40 дней. Микробная нагрузка: косвенно снижается порча (задерживается созревание, при котором развиваются плесени). Вещества: поглотители на основе перманганата калия (KMnO ₄) на носителе, активированный уголь, цеолит, а также фильтры с озонаторами для овощехранилищ.

Молочные продукты (сырая и кисломолочная продукция, сыры)	Практически не применяется (упаковка молочки обычно без доступа O ₂ – герметичные ёмкости или вакуум). В сыроделии в редких случаях используют упаковки, поглощающие кислород, для предотвращения вздутия упаковки из-за газообразующих бактерий.	Не применяется (лишняя влага обычно не проблема для молочных – напротив, сохранение влаги важно для мягких сыров; конденсат контролируется температурой).	Срок хранения: для сыров и свежей молочки модифицированная атмосфера (например, 100% N ₂ для сыра) предотвращает рост плесени и сохраняет качество (сыр в 100% N ₂ вместо воздуха: +50% к сроку без консервантов). Микробная нагрузка: замедлен рост плесени и дрожжей, но анаэробные молочнокислые бактерии могут развиваться (учитывается рецептурой). Газы: часто 100% азот (инертная среда) или 30% CO ₂ /70% N ₂ для сыров; для свежего молока – не применяется (только вакуум или отсутствие доступа воздуха).	Срок хранения: существенное продление для сыров: напр., сыр с антимикробным покрытием (натамицин) хранится ≥ 30 дней vs ~15 дней без обработки (+100%). Для пастеризованного молока активные вставки (с серебром, цинком) могут +2–3 дня дать при холодильном хранении. Микробная нагрузка: подавление плесени на поверхности сыров (натамицин предотвращает рост <i>Penicillium</i>), снижение бактерий в молоке (ионные серебряные фильтры убивают ~99% бактерий). Вещества: натамицин, сорбат калия в оболочке сыров; активные пленки с эфирными маслами (тимол) для йогуртов; серебряные наночастицы в контейнерах.	Не применяется (молочные продукты не производят этилен).
Хлебобулочные изделия	Срок хранения: ~3–4 дня для свежего хлеба (без упаковки) vs ~8–10 дней с поглотителем O ₂ в пакете (+~100%). Поглотитель замедляет рост плесени (аэробной), хотя споры не убивает. Микробная нагрузка: снизился рост плесневых грибов на поверхности (невидимых спор) – задержка появления колоний ~на несколько дней. Вещества: саше с железом, активным углем; иногда комбинируются с поглотителями CO ₂ , выделяемого хлебом.	Срок хранения: основная проблема – черствение при потере влаги, поэтому влагопоглотители не используют (наоборот, сохраняют влагу). Примечание: для некоторых изделий (торты) бывают влагорегулирующие вкладыши с солью, поддерживающие относительную влажность.	Срок хранения: упаковка в модифицированной атмосфере с CO ₂ существенно удлиняет период без плесени: напр., хлеб в атмосфере ~100% CO ₂ – до 14–21 дня без роста плесени (в 3–5 раз дольше обычного). Микробная нагрузка: высокий CO ₂ подавляет спорообразование грибов и рост бактерий, однако может вызывать незначительное изменение вкуса. Газы: обычно 60–100% CO ₂ , остальное N ₂ ; O ₂ исключается полностью для предотвращения плесени.	Срок хранения: комбинированные методы дают лучший эффект – напр., хлеб в MAP + антимикробный препарат: ≈ 21 день без плесени. Отдельно антимикробные добавки в упаковке (например, импрегнация сорбиновой кислотой пакета) увеличивают хранение ~в 2 раза (с 4 до 8 дней). Микробная нагрузка: подавление ростковой стадии спор плесени, снижение дрожжевой контаминации; сорбат и пропионат препятствуют развитию <i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> . Вещества: соли пропионовой и сорбиновой кислот, этанол-выпарители (поглощают влагу и выделяют пары этанола против плесени), фитоциды (экстракт горчицы, гвоздики) в пакетах.	Не применяется (для выпечки ключевое – плесень и черствость, а не этилен).

Table 1.

Shelf-life extension of various products using active packaging (indicative values provided: shelf life without and with packaging, increase in%, reduction of microbial load, main active substances or technologies)

Product Category	O ₂ -absorbers (oxygen removal)	Moisture absorbers (condensate absorption)	Modified Atmosphere Packaging (MAP, gas composition)	Antimicrobial systems (microflora inhibition)	Ethylene absorbers (C ₂ H ₄ removal)
Meat (red meat, poultry)	Shelf life: ~7–10 days in regular atmosphere vs up to 21–28 days with O ₂ -absorber combined with vacuum (increase ~+150–200%). Microbial load: slowed aerobic growth, inhibited fat oxidation. Substances: sachets with iron powder (Fe) or ascorbates absorbing oxygen.	Shelf life: minimal effect when used alone (meat is already in moisture-proof film), but moisture-absorbing pads reduce “drip”/leakage, indirectly lowering spoilage. Microbial load: reduction of total bacteria by ~0.5–1 log due to removal of liquid substrate. Substances: absorbent pads with zeolite and antimicrobial coatings.	Shelf life: ~7 days (air) vs ~10–14 days in gas mix 60–80% O ₂ + 20–40% CO ₂ (High-O ₂ MAP); under Low-O ₂ MAP (0% O ₂ , 20–30% CO ₂ , balance N ₂) – up to 21 days (with later “re-blooming” of O ₂ for red color). Increase ~+50–100%. Microbial load: aerobic psychrotrophs slowed, but anaerobes may grow – cooling required. Gases: either 70% O ₂ /30% CO ₂ (for red color, short storage), or 0% O ₂ /30% CO ₂ /70% N ₂ (for longer storage without oxidation).	Shelf life: +2–5 days in addition (e.g., chilled beef ~21 days in vacuum vs up to 26 days with antimicrobial film). Microbial load: ~1–2 log reduction (incl. Listeria, Pseudomonas) due to gradual release of antibacterial agents. Substances: chlorine dioxide, organic acids (lactic, sorbic), silver – and zinc-based nanoparticles, enzymes.	Not applied (meat products do not release ethylene; ethylene control does not affect shelf life).
Fish & seafood	Shelf life: ~4–6 days in ice (typical) vs ~10–12 days with O ₂ -absorber in pack (e.g., catfish steaks: 10 d → 20 d at 0 °C, +100%). Microbial load: aerobic psychrophiles suppressed, fat rancidity slowed. Substances: iron powder, activated carbon (for O ₂ and fishy odor absorption).	Shelf life: pads reduce free liquid (melted ice water, exudate), lowering surface bacterial growth. Extension minimal (fish spoilage mostly microbe – and oxidation-limited). Microbial load: ~0.5 log reduction. Substances: cellulose or clay-based absorbers, sometimes with antiseptics (e.g., benzoate salts).	Shelf life: ~4–5 days (air, chilled) vs ~11–15 days in MAP (typically 40–60% CO ₂ + 40–60% N ₂) – 2–3× longer. Microbial load: Pseudomonas, Shewanella and other aerobes strongly slowed; CO ₂ may cause off-flavor at high concentrations. Gases: 40–60% CO ₂ , balance N ₂ ; O ₂ usually excluded (prevents lipid oxidation/discoloration).	Shelf life: +2–4 days with antimicrobial packaging (e.g., films with grapefruit seed extract extend fish fillet from 12 → ~15–16 days at 4 °C). Microbial load: ~1–2 log reduction of pathogens (Listeria monocytogenes, Vibrio spp. etc.). Substances: antimicrobial coatings with essential oils (thymol, eucalyptol), chitosan, or enzyme-loaded biopolymer films.	Not applied (fish/seafood emit negligible ethylene).
82 Fresh fruits & vegetables	Shelf life: some benefit for cut salads and high-respiration produce – O ₂ -absorbers delay browning and mold (e.g., cut lettuce: +1–2 days at 4 °C). Microbial load: reduced mold spore growth. Substances: sachets with sodium ascorbate, ferrozole, O ₂ absorbers.	Shelf life: ~+20–30% via condensate removal (e.g., cucumbers: ~14 d without condensation vs 10–12 d with). Pads prevent surface rot and mold (berries, greens). Microbial load: indirectly reduced (dry environment suppresses fungi). Substances: silica gel, zeolite filters/pads; absorbent liners in berry trays.	Shelf life: MAP (e.g., lettuce 5% O ₂ + 5% CO ₂) extends ~1.5 × (lettuce: 5 d → 7–8 d). For fruits (apples, berries), low O ₂ + higher CO ₂ slows respiration/ripening, extending storage by weeks. Microbial load: not main factor (physiology dominates). Gases: low O ₂ (3–5%), CO ₂ 5–10%, balance N ₂ (for vegetables); fruits: elevated CO ₂ or added N ₂ for inertness.	Shelf life: significantly longer via antimicrobial films against mold / bacteria – e.g., apple-extract films prolong berries + 3–4 days, reducing mold. Microbial load: fungal spores (Botrytis, Penicillium) and bacteria reduced by ~1 log. Substances: natural extracts (thyme, rosemary, hop acids), antifungals (nisin, natamycin) in packaging.	Shelf life: greatly extended for ethylene-sensitive produce: +2–4 weeks. E.g., bananas: ~2 wks (normal) vs ~4 wks with filter; tomatoes: 20 d → 30–40 d. Microbial load: indirectly reduced spoilage (delayed over-ripening reduces mold risk). Substances: KMnO ₄ -based absorbers on carriers, activated carbon, zeolite, or ozonator filters for storage rooms.
Dairy products (raw, fermented, cheeses)	Rarely used (most dairy sealed/vacuum-packed). In cheesemaking, O ₂ -absorbing packs sometimes prevent pack swelling from gas-forming bacteria.	Not applied (excess moisture not an issue – moisture retention is desired in soft cheeses; condensation managed by temperature).	Shelf life: MAP for cheese/dairy (e.g., 100% N ₂) prevents mold, preserves quality (cheese in 100% N ₂ vs air: +50% shelf life without preservatives). Microbial load: slowed mold/yeast growth; anaerobic lactic bacteria may still develop (recipe-dependent). Gases: often 100% N ₂ (inert) or 30% CO ₂ /70% N ₂ for cheese; fresh milk – not applied (only vacuum/sealed).	Shelf life: significantly extended for cheeses: e.g., cheese with natamycin coating ≥ 30 days vs ~15 d untreated (+100%). Pasteurized milk with active inserts (silver, zinc) may gain + 2–3 d refrigerated. Microbial load: mold on cheese surface suppressed (natamycin prevents Penicillium), bacteria in milk reduced (~99% killed by silver ion filters). Substances: natamycin, potassium sorbate in cheese rinds; active films with essential oils (thymol) for yogurts; silver nanoparticles in containers.	Not applied (dairy does not emit ethylene).
Bakery products	Shelf life: ~3–4 d fresh bread (unpacked) vs ~8–10 d with O ₂ -absorber in bag (+~100%). Slows mold (aerobic), though spores not killed. Microbial load: mold spore germination delayed by several days. Substances: sachets with iron, activated carbon; sometimes combined with CO ₂ absorbers (bread emits CO ₂).	Shelf life: main issue = staling from moisture loss, so absorbers not used (moisture retention desired). Note: some items (cakes) use humidity-regulating inserts (e.g., salts) to balance RH.	Shelf life: MAP with CO ₂ greatly delays mold: e.g., bread in ~100% CO ₂ lasts 14–21 d mold-free (3–5× longer). Microbial load: high CO ₂ suppresses mold spore germination and bacterial growth, may slightly alter flavor. Gases: 60–100% CO ₂ , rest N ₂ ; O ₂ fully excluded to prevent mold.	Shelf life: best effect with combined methods – e.g., MAP + antimicrobials: ~21 d mold-free. Alone, antimicrobial packaging (e.g., sorbic acid-impregnated bags) doubles life (4 → 8 d). Microbial load: mold spore germination blocked, yeast contamination reduced; sorbate/propionate inhibit Aspergillus, Penicillium. Substances: propionate/sorbate salts, ethanol vapors (absorb moisture, release ethanol antifungal), phytochemicals (mustard, clove extract) in bags.	Not applied (main issues = mold & staling, not ethylene).

Заключение

Поглотители кислорода и MAP (особенно с CO₂) наиболее универсальны для мяса, рыбы и блюд готового приготовления, так как они эффективно замедляют окисление и рост бактерий; поглотители влаги полезны для свежих овощей и фруктов, мяса – они предотвращают заплесневение и гниение; поглотители этилена незаменимы при хранении плодовых и овощных культур (задерживают созревание); антимикробные упаковки могут применяться практически во всех категориях, где микробное загрязнение ограничивает срок годности – сыры, выпечка и т. д.

Наконец, модифицированная атмосфера сама по себе является «активной» технологией, но именно вместе с поглотителями (O₂ или этилена) и антимикробными агентами даёт наибольший синергетический эффект продления свежести продукта и сохранения его качества. Выбор оптимального сочетания зависит от свойств конкретного продукта – его состава, чувствительности к кислороду или влаге, характера микрофлоры и требуемого времени хранения. Исследования учёных подтверждают, что правильно подобранная активная упаковка способна существенно увеличить срок годности продуктов, улучшить их органолептику и безопасность при соблюдении нормативных требований.

Литература

- 1 Vilela C., Kurek M., Hayouka Z. et al. A concise guide to active agents for active food packaging // Trends in Food Science & Technology. 2018. Vol. 80. P. 212–222. doi: 10.1016/J.TIFS.2018.08.006.
- 2 López-Rubio A., Gavara R., Lagaron J.M. Active food packaging: Development and potential of new bioactive materials // Advances in Food and Nutrition Research. 2011. Vol. 62. P. 149–180.
- 3 Domínguez R., Pateiro M., Gagaoua M. et al. A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products // Antioxidants. 2019. Vol. 8. No. 10. P. 429. doi: 10.3390/antiox8100429
- 4 Suppakul P., Miltz J., Sonneveld K., Bigger S.W. Active packaging technologies with an emphasis on antimicrobial packaging and its applications // Journal of Food Science. 2003. Vol. 68. No. 2. P. 408–420. doi: 10.1111/j.1365-2621.2003.tb05687.x
- 5 Coles R., McDowell D., Kirwan M.J., editors. Food packaging technology. Oxford: Blackwell Publishing, 2003.
- 6 Gupta P. Role of oxygen absorbers in food as packaging material, their characterization and applications // Journal of Food Science and Technology. 2024. Vol. 61. No. 2. P. 242–252.
- 7 Gutierrez-Aguirre B.R. et al. Effect of potassium permanganate as an ethylene scavenger and physicochemical characterization during the shelf life of fresh banana (*Musa paradisiaca*) // International Journal of Food Science. 2023. Vol. 2023. No. 1. P. 4650023. doi: 10.1155/2023/4650023
- 8 Cichello S.A. Oxygen absorbers in food preservation: a review // Journal of food science and technology. 2015. Vol. 52. No. 4. P. 1889–1895. doi: 10.1007/s13197-014-1265-2
- 9 Remya S., Mohan C.O., Ravishankar C.N. Oxygen scavenger packaging for seafood preservation // Fish Technology. 2020. Vol. 57. P. 147–155.
- 10 Sivertsvik M., Rosnes J.T., Nielsen H. Effect of oxygen scavenger on the shelf-life of catfish (*Pangasius sutchi*) steaks during chilled storage // Journal of Food Science. 2002. Vol. 67. No. 9. P. 3412–3417.
- 11 Drago E. et al. Innovations in smart packaging concepts for food: An extensive review // Foods. 2020. Vol. 9. No. 11. P. 1628. doi: 10.3390/foods9111628
- 12 Kirwan M.J., Plant S. Moisture barriers for food packaging // Packaging Technology and Research [Электронный ресурс]. URL: https://www.packagingtechnologyandresearch.com/uploads/2/4/1/1/24118835/moisture_barriers_for_food.pdf (дата обращения: 11.05.2025).
- 13 Charles F., Sanchez J., Gontard N. Ethylene scavengers for active packaging of fresh produce: a review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2016. Vol. 56. No. 4. P. 666–682.
- 14 Mariah M.A.A., Tahir H.E., Mahmud Z.H. et al. The emergence and impact of ethylene scavengers techniques in delaying the ripening of fruits and vegetables // Membranes. 2022. Vol. 12. No. 2. P. 117.
- 15 Fadji T., Rashvand M., Daramola M.O. et al. A review on antimicrobial packaging for extending the shelf life of food // Processes. 2023. Vol. 11. No. 2. P. 590. doi: 10.3390/pr11020590
- 16 Meena M., Prasad V., Zehra A. et al. Natamycin: a natural preservative for food applications—a review // Food Science and Biotechnology. 2021. Vol. 30. No. 12. P. 1481–1496.
- 17 Kurek M., Bialobrzaska M., Pankiewicz U. Advances in antimicrobial active packaging for food: A review // Processes. 2023. Vol. 11. No. 2. Art. No. 590.
- 18 DeWitt C.A.M., Oliveira A.C.M. Modified atmosphere systems and shelf life extension of fish and fishery products // Foods. 2016. Vol. 5. No. 3. P. 48. doi: 10.3390/foods5030048
- 19 Campden BRI. Modified Atmosphere Packing – how it works and why it helps // Campden BRI Blog [Электронный ресурс]. URL: <https://www.campdenbri.co.uk/blogs/modified-atmosphere-packing.php> (дата обращения: 11.05.2025).
- 20 Mašková E., Pospíšilová M., Velíšek J., Bedáňová I., Svobodová Z. Modified atmosphere packaging and its influence on meat quality and shelf life // Acta Veterinaria Brno. 2023. Vol. 92. No. 3. P. 95–102.

References

- 1 Vilela C., Kurek M., Hayouka Z. et al. A concise guide to active agents for active food packaging. Trends in Food Science & Technology. 2018. vol. 80. pp. 212–222. doi: 10.1016/J.TIFS.2018.08.006.
- 2 López-Rubio A., Gavara R., Lagaron J.M. Active food packaging: Development and potential of new bioactive materials. Advances in Food and Nutrition Research. 2011. vol. 62. pp. 149–180.

- 3 Domínguez R., Pateiro M., Gagaoua M. et al. A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products. *Antioxidants*. 2019. vol. 8. no. 10. pp. 429. doi: 10.3390/antiox8100429
- 4 Suppakul P., Miltz J., Sonneveld K., Bigger S.W. Active packaging technologies with an emphasis on antimicrobial packaging and its applications. *Journal of Food Science*. 2003. vol. 68. no. 2. pp. 408–420. doi: 10.1111/j.1365-2621.2003.tb05687.x
- 5 Coles R., McDowell D., Kirwan M.J., editors. *Food packaging technology*. Oxford: Blackwell Publishing, 2003.
- 6 Gupta P. Role of oxygen absorbers in food as packaging material, their characterization and applications. *Journal of Food Science and Technology*. 2024. vol. 61. no. 2. pp. 242–252.
- 7 Gutierrez-Aguirre B.R., Hernández-Santos B., Herman-Lara E., Martínez-Sánchez C.E., Ruiz-López I.I. Effect of potassium permanganate as an ethylene scavenger and physicochemical characterization during the shelf life of fresh banana (*Musa paradisiaca*). *International Journal of Food Science*. 2023. vol. 2023. pp. 4650023. doi: 10.1155/2023/4650023
- 8 Cichello S.A. Oxygen absorbers in food preservation: a review. *Journal of Food Science and Technology*. 2015. vol. 52. no. 4. pp. 1889–1895. doi: 10.1007/s13197-014-1265-2
- 9 Remya S., Mohan C.O., Ravishankar C.N. Oxygen scavenger packaging for seafood preservation. *Fish Technology*. 2020. vol. 57. pp. 147–155.
- 10 Sivertsvik M., Rosnes J.T., Nielsen H. Effect of oxygen scavenger on the shelf-life of catfish (*Pangasius sutchi*) steaks during chilled storage. *Journal of Food Science*. 2002. vol. 67. no. 9. pp. 3412–3417.
- 11 Drago E., Campardelli R., Pettinato M., Perego P. Innovations in smart packaging concepts for food: An extensive review. *Foods*. 2020. vol. 9. no. 11. pp. 1628. doi: 10.3390/foods9111628
- 12 Kirwan M.J., Plant S. Moisture barriers for food packaging. *Packaging Technology and Research*. URL: https://www.packagingtechnologyandresearch.com/uploads/2/4/1/1/24118835/moisture_barriers_for_food.pdf (accessed 11 May 2025)
- 13 Charles F., Sanchez J., Gontard N. Ethylene scavengers for active packaging of fresh produce: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2016. vol. 56. no. 4. pp. 666–682.
- 14 Mariah M.A.A., Tahir H.E., Mahmud Z.H. et al. The emergence and impact of ethylene scavengers techniques in delaying the ripening of fruits and vegetables. *Membranes*. 2022. vol. 12. no. 2. pp. 117.
- 15 Fadji T., Rashvand M., Daramola M.O., Iwarere S.A. A review on antimicrobial packaging for extending the shelf life of food. *Processes*. 2023. vol. 11. no. 2. pp. 590. doi: 10.3390/pr11020590
- 16 Meena M., Prasad V., Zehra A., Gupta V.K., Upadhyay R.S. Natamycin: a natural preservative for food applications – a review. *Food Science and Biotechnology*. 2021. vol. 30. no. 12. pp. 1481–1496.
- 17 Kurek M., Bialobrzaska M., Pankiewicz U. Advances in antimicrobial active packaging for food: A review. *Processes*. 2023. vol. 11. no. 2. pp. 590.
- 18 DeWitt C.A.M., Oliveira A.C.M. Modified atmosphere systems and shelf life extension of fish and fishery products. *Foods*. 2016. vol. 5. no. 3. pp. 48. doi: 10.3390/foods5030048
- 19 Campden BRI. Modified Atmosphere Packing – how it works and why it helps. Campden BRI Blog. URL: <https://www.campdenbri.co.uk/blogs/modified-atmosphere-packing.php> (accessed 11 May 2025)
- 20 Mašková E., Pospíšilová M., Velíšek J., Bedáňová I., Svobodová Z. Modified atmosphere packaging and its influence on meat quality and shelf life. *Acta Veterinaria Brno*. 2023. vol. 92. no. 3. pp. 95–102.

Сведения об авторах

Сергей М. Махов аспирант, кафедра биологии и биоинформатики, МГУТУ им. Разумовского, Земляной вал, 73, г. Москва, 109004, Россия, makhovsm@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0001-9626-4689>

Information about authors

Sergey M. Makhov PhD student, biology and bioinformatics department, Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management, Zemlyanoy Val, 73, Moscow, 109004, Russia, makhovsm@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0001-9626-4689>

Вклад авторов

Сергей М. Махов написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Contribution

Sergey M. Makhov wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/03/2025	После редакции 18/04/2025	Принята в печать 22/04/2025
Received 01/03/2025	Accepted in revised 18/04/2025	Accepted 22/04/2025