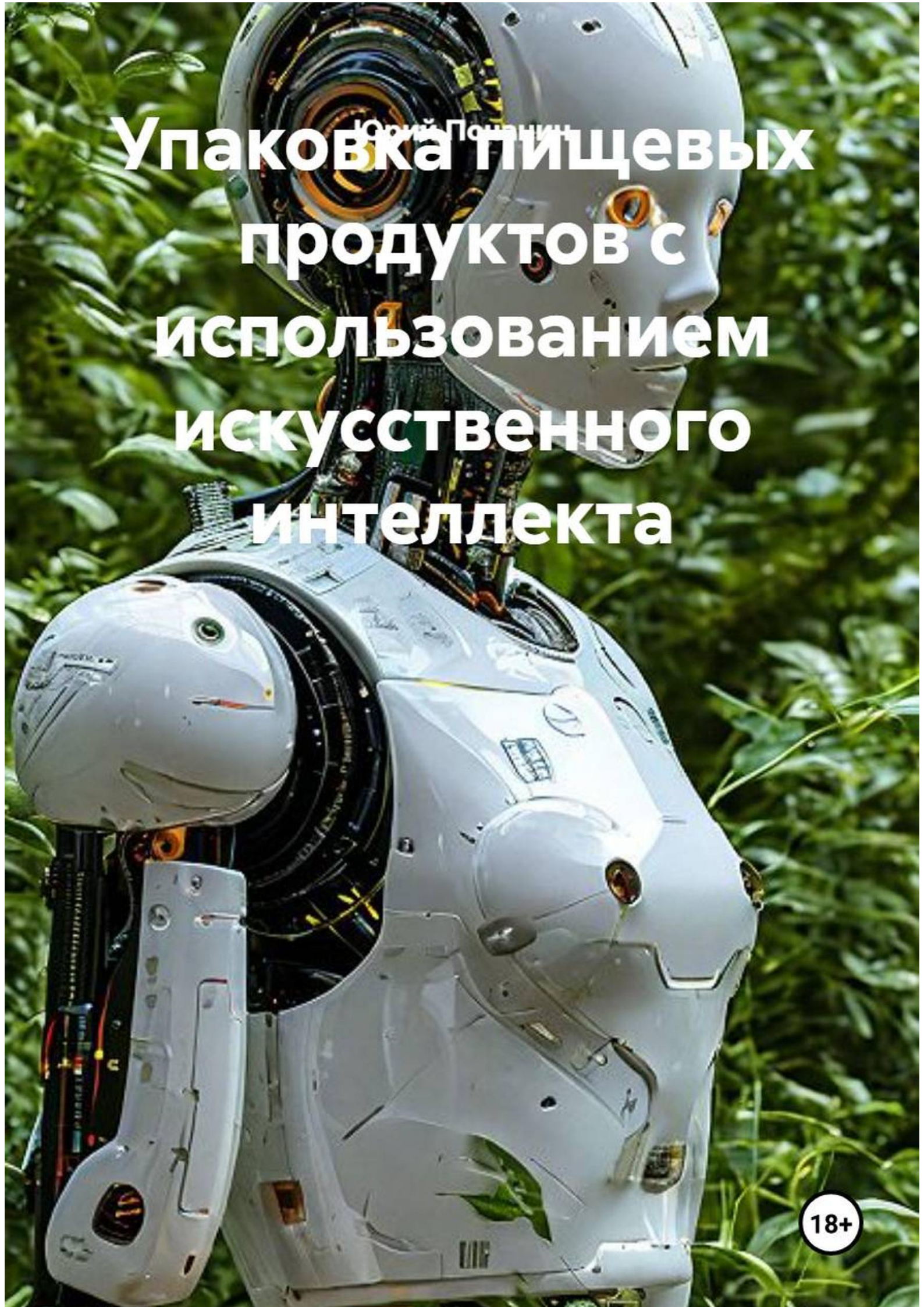




Юрий Починин

Упаковка пищевых продуктов с использованием искусственного интеллекта

18+

Юрий Почанин

**Упаковка пищевых
продуктов с использованием
искусственного интеллекта**

«Автор»

2026

Почанин Ю. С.

Упаковка пищевых продуктов с использованием искусственного интеллекта / Ю. С. Почанин — «Автор», 2026

В книге простым языком описаны технологии активных, биоразлагаемых и интеллектуальных упаковок для пищевых продуктов с использованием современных устройств и инструментальных средств искусственного интеллекта. Рассмотрены основные понятия ИИ, приведены основные типы используемых нейронных сетей. Рассмотрены основные типы машинного и глубокого обучения ИИ, технического зрения и основ цифровизации технологических процессов упаковки с применением интернета вещей, облачных вычислений, ИИ на периферии и использованием технологий блокчейна.

© Почанин Ю. С., 2026

© Автор, 2026

Юрий Почанин

Упаковка пищевых продуктов с использованием искусственного интеллекта

ВВЕДЕНИЕ

Искусственный интеллект меняет индустрию упаковки пищевых продуктов, позволяя быстро и точно отслеживать свежесть продуктов в режиме реального времени. Это помогает сократить количество пищевых отходов и способствует развитию экологичной системы упаковки. Стратегии глубокого обучения, такие как сверточные нейронные сети (СНС), показали высокую точность. Эти модели могут с точностью до 97,82 % различать свежие и подгнившие фрукты с помощью обработки изображений использовали комбинацию колориметрических датчиков штрихкодов и сверточных нейронных сетей для оценки свежести мяса без его повреждения. Kazi and Panda использовали остаточные архитектуры сверточных нейронных сетей для улучшения классификации свежести. Mohi-Alden et al. разработали метод сортировки болгарского перца в режиме реального времени, в котором используются сверточные нейронные сети для сортировки по степени зрелости и размеру. Модели машинного обучения, в том числе искусственные нейронные сети (ИНС), случайные леса и метод опорных векторов (SVM), использовались для оценки свежести напитков, грибов и мяса с точностью до 80% использовали компьютерное зрение на основе плотности для определения свежести яиц.

Модели машинного обучения — это алгоритмы, которые обучаются на данных для решения конкретных задач: классификации, регрессии, кластеризации и других. Среди них — искусственные нейронные сети (ИНС), случайные леса и метод опорных векторов (SVM).

Упаковка пищевых продуктов превратилась из простого способа их хранения в активную систему, которая может отслеживать изменения в качестве продуктов и условиях окружающей среды, взаимодействовать с ними и реагировать на них. Традиционные упаковочные технологии эффективны только для сохранения продуктов, но они не способны обеспечить доступ к упакованным продуктам и их мониторинг в режиме реального времени). Появление упаковки пищевых продуктов с использованием искусственного интеллекта привело к огромным изменениям в продовольственном секторе. Он предоставляет пользователям доступ к решениям на основе данных, которые напрямую связаны с контролем качества, повышением безопасности пищевых продуктов и отслеживанием их происхождения.

Обычная пластиковая упаковка была ключевым элементом рынка с момента его появления. Однако традиционная упаковка приводит к образованию отходов на свалках и значительному загрязнению окружающей среды. В основном упаковка пищевых продуктов состоит из пластика (40%), за которым следуют картон (31%), металлы (15%), стекло (9%) и 3% других материалов. Наиболее часто используемым биоразлагаемым упаковочным материалом является пластик, который наносит значительный ущерб окружающей среде и представляет опасность для здоровья человека. Это указывает на необходимость поиска экологичных альтернатив, таких как биоразлагаемые полимеры и «умная» упаковка. Кроме того, традиционная упаковка для пищевых продуктов не позволяет в полной мере сохранять и контролировать состояние продуктов, что приводит к их порче и большим объемам пищевых отходов. Таким образом, существует острая необходимость в «умных» решениях для упаковки пищевых продуктов, которые могут в режиме реального времени предоставлять данные о местоположении, происхождении, качестве продуктов и их состоянии.

Упаковка пищевых продуктов имеет решающее значение для обеспечения их безопасности, сохранения качества и сокращения пищевых отходов. Однако традиционные упаковочные

системы не могут предоставлять информацию в режиме реального времени или прогнозировать состояние продукта. Это ограничение влияет на прозрачность цепочки поставок и эффективность управления сроками годности. Для решения этих проблем перспективным подходом стала интеграция искусственного интеллекта (ИИ) с инновационными методами упаковки, такими как «умная», активная, интеллектуальная и биоразлагаемая упаковка. Упаковка пищевых продуктов с использованием ИИ позволяет создавать более гибкие, точные и экологичные системы. К ним относятся с использованием ИИ, системы отслеживания экологически чистых упаковочных материалов, демонстрирующие свой потенциал в повышении безопасности пищевых продуктов, эффективности цепочки поставок и сокращении пищевых отходов. Это позволяет в режиме реального времени выявлять порчу продуктов, прогнозировать срок их хранения и повышать отслеживаемость с помощью технологий машинного обучения и блокчейна. Это даст результаты для прогнозирования и разработки устойчивых, масштабируемых упаковочных систем для укрепления глобальной продовольственной безопасности.

Современные разработки в области «умной» упаковки для пищевых продуктов включают съедобные, активные, интеллектуальные и биоразлагаемые системы. Однако большинство современных решений основаны на статических индикаторах или отдельных сенсорных технологиях. Такие проблемы, как нарушение температурного режима, порча продуктов из-за микроорганизмов, фальсификация продуктов и загрязнение окружающей среды небiorазлагаемым пластиком, до сих пор не решены. Кроме того, отсутствие принятия решений на основе данных ограничивает эффективность традиционной «умной» упаковки.

«Умная» упаковка на основе искусственного интеллекта объединяет в себе различные технологии. Она позволяет в режиме реального времени определять степень свежести продуктов, предупреждать о загрязнении и точнее прогнозировать срок годности. Эти новые подходы укрепляют доверие потребителей и помогают сократить количество пищевых отходов за счет мониторинга состояния упаковки и обеспечения точного управления запасами по всей цепочке поставок. В условиях растущего спроса на «умные», безопасные и экологичные решения для упаковки пищевых продуктов технологии на основе искусственного интеллекта создают прозрачную и более эффективную продовольственную систему. Активная упаковка продлевает срок хранения и обеспечивает безопасность продуктов, поддерживая среду вокруг упакованных продуктов. «Умная» упаковка оснащена датчиками, которые в режиме реального времени предоставляют данные о различных качественных характеристиках продукта.

. Во многих мировых компаниях рассматривается, как «умная» упаковка с использованием ИИ взаимодействует с технологиями машинного обучения, блокчейна и Интернета вещей. Эти комбинации могут изменить подходы к безопасности пищевых продуктов, обеспечению их качества и логистике цепочки поставок. Почти треть всех продуктов питания, производимых в мире, выбрасывается, а этого количества хватило бы, чтобы прокормить 2 миллиарда человек. В то же время миллионы людей ежегодно заболевают из-за пищевых отравлений. Современные системы упаковки пищевых продуктов работают, но они недостаточно «умны», чтобы решить эти проблемы. Традиционная система упаковки не может определить, когда продукт действительно испортился, точно отследить его путь или адаптироваться к меняющимся условиям. Именно здесь ключевую роль играет искусственный интеллект. Благодаря внедрению интеллектуальных систем в упаковку с помощью крошечных датчиков, которые определяют порчу продуктов, блокчейн-систем, отслеживающих каждый этап пути от фермы до стола, и алгоритмов, точно прогнозирующих срок годности, можно значительно сократить количество пищевых отходов, повысить безопасность и обеспечить прозрачность в режиме реального времени. Представьте себе упаковки с молоком, которые предупредят вас о том, что продукт скоро испортится, или продуктовые магазины, которые автоматически снижают цены на товары с истекающим сроком годности. Это не просто видение будущего, а практическое решение, которое необходимо пищевой промышленности уже сегодня. Однако роль

искусственного интеллекта не ограничивается удобством. Он становится критически важным для нашей планеты и здоровья людей. По мере того, как становится все труднее выявлять случаи фальсификации продуктов питания, изменение климата усложняет управление цепочками поставок и удовлетворение меняющихся потребностей потребителей по всему миру. Искусственный интеллект помогает упаковке думать самостоятельно, прогнозируя риски заражения до возникновения вспышек, оптимизируя маршруты доставки для снижения энергопотребления и разрабатывая экологичные материалы, которые более эффективно разлагаются. Для бизнеса это означает меньше отзывов о качестве продукции и больше прибыли. Для потребителей это означает более безопасные продукты и меньше чувства вины за их утилизацию. В мире, где важен каждый кусочек, упаковка, созданная с помощью искусственного интеллекта, не просто умна, но и ответственна.

ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИИ «УМНОЙ» УПАКОВКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Технологии «умной» упаковки пищевых продуктов в основном включают в себя активную, интеллектуальную и биоразлагаемую упаковку. Эти методы используются в пищевой промышленности на разных уровнях для обеспечения безопасности, качества и своевременной транспортировки продуктов питания.

Упаковка, при прохождении стадии от производства до конечного потребления, выступает одним из важнейших условий формирования конкурентоспособности товара, а также сохранения его потребительских свойств. В то же время функции упаковки формируются уже начиная с самого производства товара. Их действие распространяется на весь путь следования товара от упаковки товара на складе производителя, до оптового или розничного магазина.

Функции упаковки прекращаются в тот момент, когда покупатель достает из нее товар и уничтожает (или возвращает) ее. До того момента, пока упаковка не уничтожена, она выполняет ряд маркетинговых функций, а также может легко использоваться покупателем любых не предусмотренным производителем образом.

В основном различают маркетинговые и производственно-торговые функции упаковки. К главным маркетинговым функциям упаковки, которые в большей степени проявляются в случае упаковывания потребительских товаров, можно отнести:

- функцию сохранения качества и количества товара. Иногда эту функцию также называют основополагающей, хотя она относится больше к производственно-товароведческим функциям, чем к маркетинговым. Как известно, основным предназначением упаковки является защита товара от возможных повреждений, а также обеспечение неизменности потребительских свойств товара в течение определенного времени при заданных условиях транспортирования и хранения;

- функцию формирования качества товара. Конструктивные особенности упаковки должны легко обеспечивать возможность удобно пользоваться товаром, должны максимально удовлетворять потребности потребителей, а дизайн упаковки должен формировать в глазах покупателей образ высококачественного товара;

- функцию формирования спроса на товар. Упаковка может привлечь внимание потенциального покупателя, сформировать определенный имидж товара, поэтому на ней делают элементы рекламного оформления, то есть она наделяется соответствующим цветовым решением, подбирается нужный шрифт, на ней располагают лозунги и т.д.;

- функцию идентификации товара. Упаковка обеспечивает потребителю возможность увидеть товар до момента его приобретения, например в случае использования прозрачных упаковочных материалов, а также специальных «окошек» и других прозрачных элементов;

-функцию предоставления информации о товаре. Использование маркировки, которая размещена на упаковке, потенциальные потребители легко могут получить нужные им сведения о товаре, о его качестве, входящих в его состав ингредиентов, сроке годности, способах эксплуатации и т.д.;

-функцию стимулирования сбыта товара. Использование упаковки или ее частей при проведении разнообразных рекламных акций, размещение на её поверхности информации о розыгрыше ценных подарков или выигрышных купонов, которые используют затем при проведении конкурсов и розыгрышей призов или для обеспечения определенными льготами при приобретении товара – все это позволяет уменьшить затраты на другие мероприятия стимулирования сбыта;

-функцию маркетинговых исследований. Для производителя очень важна обратная связь со своими потребителями. Установлению такой связи способствует размещение на упаковке подробной информации о производителе (адрес, контактные телефоны, ссылка на сайт в интернете и т.д.), а также размещение внутри нее различных вкладышей в виде опросных листов, анкет и т.п. Уже использованная и выброшенная упаковка тоже может служить источником информации для маркетолога;

-функцию мерчендайзинга. Упаковка конечно же должна быть удобной для сферы торговли, как в случае оптимизации выкладки товаров на прилавках магазинов и полках, так и в случае различных операций на складе.

К основным производственно-торговым функциям упаковки можно отнести:

-защиту товара от воздействия окружающей среды (или же наоборот), а также от различного вида повреждений при погрузочно-разгрузочных работах, при транспортировании, при складировании и хранении;

-обеспечение сохранности потребительских свойств продукции;

-создание оптимальных по весу и объему единиц упаковки для продажи товара;

-беспечение возможности создания рациональных единиц для погрузки и выгрузки товаров;

-облегчение реализации операций транспортирования, хранения и складирования;

Также помимо уже отмеченных выше функций упаковка должна обеспечивать:

-возможность экологически чистого уничтожения материалов, из которых изготовлена упаковка;

-возможность ее повторного использования или повторного использования упаковочных материалов, из которых она изготовлена.

Кроме того, любая упаковка является фактором расходов, которые связаны с производством товаров. Величина издержек должна находиться в разумной пропорции к стоимости упакованного товара. При этом транспортировка товара от предприятия-изготовителя до заказчика должна быть рентабельной. Это означает, что необходимо обеспечить минимальный уровень транспортных издержек. Вот почему в промышленно развитых странах процессы погрузки-разгрузки товаров максимально автоматизируются. Этим целям также должна служить упаковка.

Каким бы новым и оригинальным ни было решение упаковки, оно всегда должно подчиняться требованиям, предъявляемым к упаковываемому товару.

Самой же упаковке необходимо также обладать определенными свойствами:

-защитными;

- потребительскими;
- экологическими;

-рекламно-эстетическими.

Защитные свойства должны обеспечить полную сохранность изделий с момента их упаковки до момента их потребления.

Потребительские свойства упаковки. Их можно охарактеризовать:

- разнообразием форм и размеров упаковки;
- степенью готовности продукта к употреблению;
- удобством обращения с упакованным продуктом;
- удобством потребления;
- возможностью переноса упаковки;
- наличием устройств, которые бы предотвращали несанкционированное вскрытие упаковки и осуществляли бы контроль за содержимым;
- простотой и надежностью укупорки упаковки и её герметизации.

Нужные экологические свойства упаковки необходимы для обеспечения минимального загрязнения уровня окружающей среды потребляемой упаковкой, а также для наиболее эффективной и экономически выгодной утилизации ее отходов.

Упаковка также является составной частью современной массовой культуры, является продуктом дизайна, поэтому она должна не только удовлетворять любые, даже самые изысканные потребности покупателя, но и формировать культурный уровень покупателя.

Факторы, которые влияют на внешний вид упаковки:

-особенности товара. Это габариты, вес, объем и другие параметры, которые, в свою очередь, определяют вид используемых транспортных средств и средств складирования у поставщика;

-уровень приспособленности средств упаковки к средствам автоматизации, транспортировки и складирования у клиентов;

-виды и пути перевозки товара, поскольку имеются существенные различия в упаковке в зависимости от вида используемых транспортных средств.

1.1. Активная упаковка.

Термин “активная упаковка” появился в научно-технической литературе в начале 90-х гг. “Активная упаковка” содержит специальные добавки (поглотители газов и влаги, ароматизаторы, антимикробные и ферментные препараты), способствующие улучшению товарного вида и сохранению органолептических свойств пищевой продукции, то есть признаков, действующих на органы чувств.

С развитием техники и технологии получения упаковочных материалов расширяются функции упаковки.

Одним из наиболее эффективных способов защиты

продуктов от порчи является активная упаковка, однако в силу

сложности изготовления и дороговизны она пока применяется редко. Механизм защиты активной упаковки индифферентным барьером между пищевым продуктом и окружающей средой упаковка представлен на рис. 1.1.

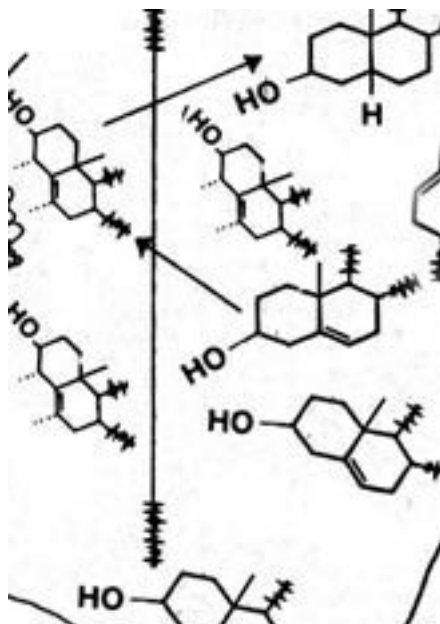


Рис.1.1. Механизм защиты активной упаковки

Из инертного, индифферентного барьера между пищевым продуктом и окружающей средой упаковка в настоящее время все больше превращается в фактор производства, поскольку с ее помощью можно:

--картонная упаковка для пищевых продуктов способна направленно изменять состав продукта. В этом случае для изготовления упаковки применяются биологически активные материалы с иммобилизованными ферментами (добавка плотно удерживается в матрице полимерного материала);

-защищать продукты питания от микробиальной порчи, продлевая тем самым время их “жизни”. К примеру, срок хранения колбасной продукции в “активной”* оболочке увеличивается в 2-3 раза;

-создавать оптимальную газовую среду внутри оболочки, что широко используется при хранении продуктов питания в модифицированной и регулируемой среде. Применение такой упаковки для розничной продажи нецелесообразно из-за довольно высокой цены, однако на западе широко используется метод складского хранения овощей и фруктов в больших мешках с окошечком из селективно-проницаемого материала. Фрукты, сохраненные таким образом, гораздо дольше остаются свежими, упаковка окупается за счет устранения причин порчи и усыхания товара;

-регулировать температуру обработки продуктов питания в условиях микроволнового нагрева (например, используя металлизированные полимерные материалы). Продукт в металлизированной упаковке в СВЧ-печи может разогреваться до 200°C и выше. В этом случае большая часть тепла генерируется в покрытии, и продукт поджаривается как на сковороде, что недостижимо при микроволновом нагреве.

Это направление представляет несомненный интерес, поскольку введение добавки не в пищу, а в матрицу полимерной оболочки позволяет пролонгировать действие добавки, регулируя скорость ее массопереноса в пищевой продукт. При этом обеспечивается необходимый градиент концентрации добавки на поверхности защитной оболочки, непосредственно контактирующей с пищевым продуктом. Важным преимуществом “активных” упаковок является то, что благодаря иммобилизации добавок миграция их в пищевой продукт сведена к минимуму (или оптимально регулируется), поскольку по последним данным многие пищевые добавки таят в себе определенную угрозу здоровью. Например, известная всем лимонная кислота, часто

вводимая в состав продуктов, несмотря на свою кажущуюся “безобидность”, может оказаться вредной при избыточном потреблении. Конечно, при нормальном питании такое воздействие будет незаметным, однако для определенной группы людей, в рационе которых консервы и полуфабрикаты составляют значительную часть, такие пищевые добавки могут быть действительно вредными.

Активная упаковка для молока. Организм некоторых людей не усваивает молоко, что генетически обусловлено дефицитом выработки у них фермента, расщепляющего молочный сахар (лактозу). Схема удаления *холестира* из жидкого продукта представлена на рис. 1.2.

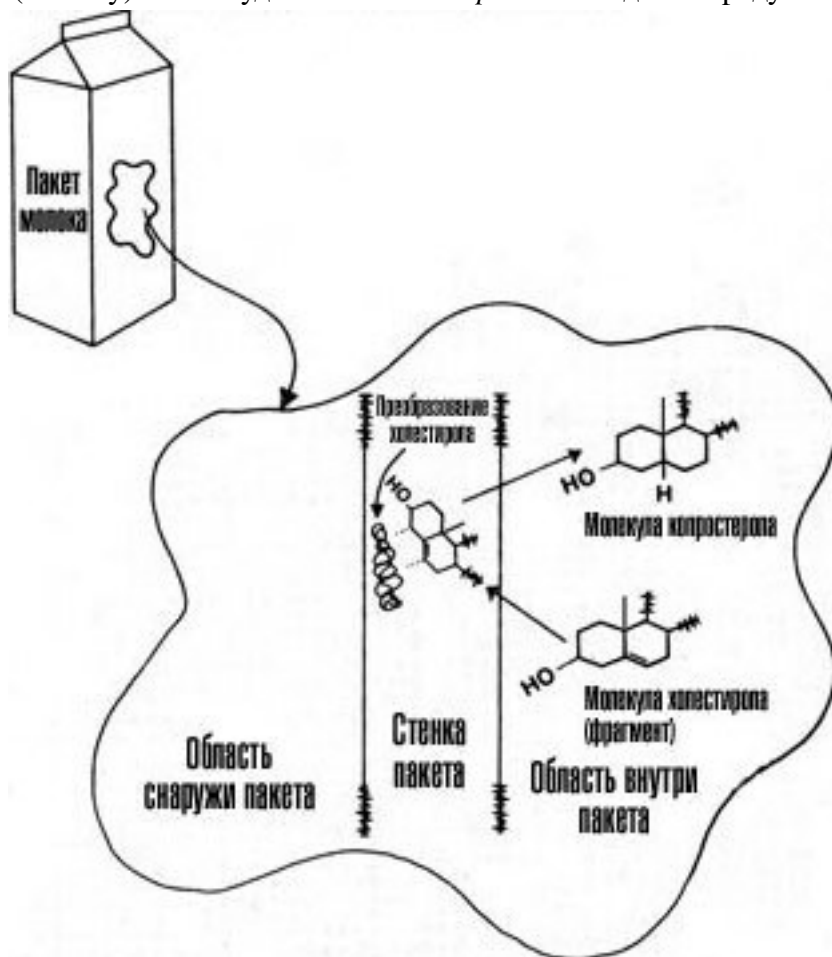


Рис.1.2 Удаление холестира из жидкого продукта

Введение лактазы – фермента, гидролизующего молочный сахар, в полимерную основу упаковочного материала позволяет получать диетический продукт – “безлактозное молоко”

Высокое содержание холестерина (неправильно называемого холестерином) в плазме крови человека обычно связывают с повышением риска сердечно-сосудистых заболеваний.

..1.

Бактерицидные упаковочные материалы

Для защиты пищевой продукции от неблагоприятного воздействия патогенной микрофлоры и токсичных продуктов ее жизнедеятельности в последние годы применяют бактерицидные упаковочные материалы. Примером реализации такого способа является использование антимикробных защитных систем на основе гигиенически безопасных латексов (водных дисперсий синтетических полимеров). Путем создания латексной композиции оригинального состава на основе экологически безопасных водных систем, содержащих антимикробные добавки, и последующего формирования из них покрытий непосредственно на продуктах питания разработан способ защиты мясных изделий и сыров. Предложенный способ отли-

чает сравнительная простота технического решения: нанесение на поверхность продукта многослойных полифункциональных покрытий, исключающих применение высоких температур, которое иногда негативно влияет на свойства продукта. При этом обеспечивается плотное и повсеместное облевание поверхности продукта, гарантирующее отсутствие микрополостей – областей потенциального развития нежелательной микрофлоры. В качестве антимикробных добавок используются отечественные оригинальные препараты – соли дегидрацетовой кислоты с широким спектром действия на различную микрофлору (дрожжи, грибы, актиномицеты), а также комплексы этих добавок в сочетании со специальными регуляторами жизнедеятельности микробных клеток (они защищают главным образом поверхность упакованного продукта, как известно, максимально подверженную инфицированию). Защитные покрытия, формируемые непосредственно на поверхности пищевых продуктов (незрелых сыров, колбас, деликатесной и обычной мясной продукции) отличаются антимикробной активностью, обеспечивают снижение потерь полезной массы, например, для сыра до 2% за период созревания, и экологическую безопасность производства, ускоряют биохимические процессы созревания, улучшают условия труда по уходу за сыром за счет ликвидации стадии мойки, переупаковки, снижения негативного воздействия экотоксикантов на продукт и обслуживающий персонал.

Одним из направлений борьбы с плесневыми грибами является включение добавок биоцидов растительного происхождения в структуру полимерных материалов, используемых для изготовления упаковки. Основная задача антимикробных добавок – снижение количества микробов в массе изделия и на его поверхности. Активность антимикробных соединений зависит от таких параметров, как концентрация активного компонента, pH, температура, тип полимера, метод ввода (с пластификатором или в расплаве) и время их контакта с полимером. Кроме того, следует учитывать такой немаловажный фактор, как чувствительность микроорганизмов.

Современные пленочные полимерные материалы обеспечивают лишь определенный уровень защиты продукции. Они не могут направленно воздействовать на биохимические и микробиологические изменения в упакованном продукте. Необходимо производить новые упаковочные материалы с избирательной проницаемостью, создающие барьер на пути излишне интенсивного газо-и влагообмена, поступления микрофлоры извне, препятствующие развитию нежелательных микроорганизмов на упаковываемых изделиях. В качестве основы для бактерицидного упаковочного материала были выбраны полимеры. Исследованиями установлено, что достаточно хорошо ингибировала (тормозила) рост плесневых грибов композиция ПЭВД 98 % + ДЖК + ДЭТА (ПЭВД – полиэтилен высокого давления; ДЖК – диспропорционированная живичная канифоль; ДЭТА – диэтилентриамин), а также, что композиция ПЭВД с добавками таллового пека и полиэтиленполиамин показали резкое ухудшение прочностных характеристик, а с увеличением добавки предполагаемой смеси сосновой живичной канифоли (СЖК) с ДЭТА (более 2 %) и ДЖК резко ухудшаются прочностные характеристики материала.

Очень интересны бактерицидные упаковочные материалы, призванные для защиты продуктов питания от вредных воздействий патогенной микрофлоры и влияния различных токсичных веществ. Продукты питания, упакованные в плену, изготовленную на этой основе, становятся стерильными. Это происходит из-за того, что на поверхности продукта под воздействием вводимых добавок все вредные микробы и бактерии уничтожаются. Для того, чтобы защитить пищевые продукты от вредного воздействия микроорганизмов более длительное время, в полимерные оболочки, изготовленные на основе водных дисперсий типа ВИМ и полисвэд, вводятся различные специальные противомикробные добавки, типа зарубежного «Дельвоид» или же отечественного ДГК (соль дегидрацетовой кислоты).

У бактерицидной упаковки довольно широкий спектр воздействия на вредную среду. Она может легко воздействовать на грибы, дрожжи, актиномицеты, препятствуя при этом порче пищи (сыр, колбаса, готовые мясопродукты и т.д.) и потере её качества. Вещество «Дель-

воид» обладает ограниченным спектром противомикробного действия, а вот дегитроцетовая кислота и её соли, являясь при этом экологически безопасным средством, обладают более высокой биологической активностью к огромному микроорганизменному спектру, практически не токсичные и имеют пролонгированное действие.

В неблагоприятной экологической обстановке пища может стать источником и носителем потенциально опасных для человека химических и биологически активных соединений, являющихся продуктами жизнедеятельности микроорганизмов. Соединения, опасные для здоровья, содержатся как в сырье, так и в пищевых продуктах на различных технологических стадиях переработки, фасовки, хранения и реализации. В то же время, безопасность и качество пищи – одно из основных условий, определяющих здоровье нации. В России в последние годы из-за резкого спада производства продуктов питания и оттока сельскохозяйственного сырья в сферу предприятий малой мощности возрастает опасность микробного заражения и, как следствие, снижения качества пищевой продукции.

Для снижения содержания влаги внутри упаковки в полимерный материал вводят специальные поглотители, в основном минеральные (например, цеолиты, пермутиты и т. п.) При этом процесс поглощения влаги может сопровождаться подавлением роста микроорганизмов. График, демонстрирующий рост плесени на сырах, обработанных по традиционной и новой технологии представлен на рис.1.3.

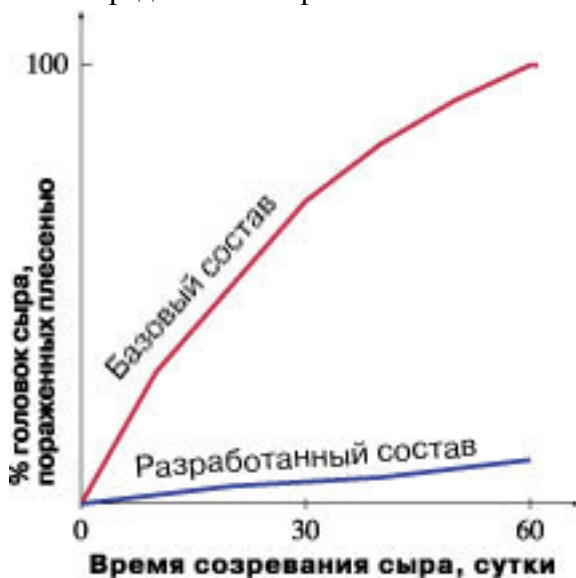


Рис.1.3 График, демонстрирующий рост плесени на сырах

В последние годы в состав полимерных упаковочных материалов начали вводить ферментные добавки. Особый интерес и социальную значимость имеют разработка и использование биологически активных упаковочных материалов с ферментами, иммобилизованными в полимерном материале. Такие материалы способны регулировать состав, биологическую и органолептическую (вкус, консистенция, цвет и запах) ценность продуктов питания, ускорять технологические процессы получения готовой продукции. В России это направление еще недостаточно широко развито и находится в стадии становления. Активная упаковка для сыра позволяет дольше сохранить его свежим, рис.1.4. Слева – сыр, упакованный в обычную пленку, справа – в активную. Все головки сыра выдержаны одно и то же время. Как показали исследования, при иммобилизации на полимерном носителе определенные ферменты, сохраняя свою биологическую активность (на 70-80%), способны приобретать некоторые новые свойства.



Рис.1.4. Активная упаковка для сыра

Так, для материалов с иммобилизованными ферментами характерно расширение диапазонов рабочих температур и pH, что весьма положительно сказывается на скорости технологических процессов гидролиза биологических субстратов (белков, жиров, углеводов). Известно, что свободные ферменты и их смеси относятся к дорогостоящим препаратам, часто закупаемым по импорту. Производственные испытания новых материалов с иммобилизованными ферментами на перерабатывающих предприятиях АПК показали возможность их многократного использования. Так, биологически активный полимерный материал (БАПМ) с иммобилизованным пепсином (фермент, расщепляющий протеины), выдержал свыше 90 производственных циклов при проведении холодной ферментации молока перед приготовлением сырного сгустка. Таким образом, применение БАПМ позволяет в 2-3 раза сократить расход ферментов и ферментных смесей. Одновременно в результате использования БАПМ повышается качество готовой продукции (сортность продукта увеличивается на 20-30%) и достигается более эффективная переработка пищевого сырья (полнота использования пищевого сырья увеличивается на 50-80%).

Съедобные покрытия. Весьма перспективным является также использование таких “активных” оболочек, как съедобные покрытия. Пленкообразующей основой в этом случае являются природные полимеры – полисахариды. Наибольшее распространение получили здесь производные крахмала и целлюлозы. Свойства этих полимеров поистине уникальны: обладая прекрасной пленкообразующей способностью (съедобные пленки), они широко используются как компоненты пищевых продуктов, например, в качестве структурообразующих агентов (загустителей) в пастообразной молочной, кондитерской и плодоовощной продукции. Пленки на основе производных целлюлозы (например, карбоксиметилцеллюлоза и ее натриевая соль) и модифицированных крахмалов (например, карбоксиметилкрахмал, КМК) защищают пищевой продукт от потерь массы (за счет снижения скорости испарения влаги) и создают определенный барьер проникновению кислорода и других веществ извне, замедляя тем самым процессы, обуславливающие порчу пищевого продукта (окисление жира, денатурализация белка и т. д.). Съедобные пленки на основе природных полимеров обладают высокой сорбционной способностью, что предопределяет их положительное физиологическое воздействие. Так, при попадании в организм эти вещества адсорбируют и выводят ионы металлов, радионуклиды (продукты радиоактивного распада) и другие вредные соединения, выступая таким образом в роли детоксиканта. Благодаря введению специальных добавок – ароматизаторов, красителей – в полимерную оболочку можно регулировать вкусо- ароматические свойства собственно пищевого продукта в съедобной пленке. Таким образом, “активная” съедобная оболочка может изменять сенсорное восприятие продукта потребителем, что особенно важно при приеме продуктов лечебно- профилактического действия, например, пищи с пониженным содержанием жира, сахарозы, с добавлением растительного (например, соевого) белка. Кроме того, способность съедобной пленки удерживать различные соединения позволяет обогащать продукты питания минеральными

Примерами областей использования съедобных пленок на основе природных полимеров являются покрытия на быстрозамороженной мясной продукции. Следует напомнить, что глубокое охлаждение признано лучшим способом хранения мяса (при -18°C говядина сохраняется в течение 1 года, при -30°C до 2 лет). Однако в неупакованном виде замороженное мясо в процессе хранения теряет от 1 до 3% массы (за счет вымораживания влаги), а также подвергается негативным качественным изменениям. Формирование же на блоках замороженного мяса покрытий на основе карбоксиметилцеллюлозы существенно снижает действие перечисленных факторов. Кроме того, эти покрытия исключают загрязнение окружающей среды отходами использованной упаковки, поскольку дальнейшая переработка мяса осуществляется вместе с покрытием. Аналогичные съедобные покрытия разработаны и используются для защиты мясных и мясорастительных полуфабрикатов, выпускаемых заводами быстрозамороженных блюд.

Активная упаковка продлевает срок хранения и повышает безопасность продуктов, взаимодействуя с ними или с окружающей средой. Активная упаковка — это не просто пассивный барьер. В ней используются такие элементы, как противомикробные вещества, поглотители кислорода и влагопоглотители. Эти элементы изменяют внутренние условия, чтобы поддерживать высокое качество продукта.

Последние разработки направлены на использование натуральных противомикробных соединений, особенно эфирных масел и растительных экстрактов, смешанных с биополимерными матрицами. Например, покрыли говядину хитозановой пленкой, обогащенной маслом орегано, чтобы подавить рост микроорганизмов. Они пришли к выводу, что пленка подавляет рост *золотистого стафилококка* лучше, чем *кишечной палочки* O157:H7, и при этом срок хранения увеличивается до 10 дней. Аналогичным образом нанокompозитные пленки из оксида графена и серебра в качестве активного упаковочного материала показали снижение количества *золотистого стафилококка* и *кишечной палочки* на 80–85 % в свежих продуктах, что привело к увеличению срока их хранения. Наночастицы серебра и оксида цинка продемонстрировали значительное антибактериальное действие на поверхностях, контактирующих с пищевыми продуктами. Недавно разработали пленку из полимолочной кислоты, пропитанную розмарином (растительным поглотителем кислорода), которая значительно замедляет окислительную порчу говядины.

Кроме того, бактериальные экзополисахариды в последнее время привлекают внимание как перспективные биоматериалы для съедобной и «умной» упаковки пищевых продуктов. По данным Aziz et al. съедобные пленки на основе пенополистирола не только служат эффективным барьером для кислорода и влаги, но и повышают безопасность пищевых продуктов, обладая антимикробными и антиоксидантными свойствами. Однако остаются нерешенными такие проблемы, как восприятие продукта потребителями и долговечность материала, но активная упаковка имеет решающее значение для сокращения пищевых отходов. Она хорошо вписывается в глобальный переход к натуральным консервантам и экологически чистым материалам.

1.2. Биоразлагаемая упаковка

Биоразлагаемая упаковка — это не один материал, а группа полимеров с разными свойствами и требованиями к утилизации.

Умные биоразлагаемые и экологичные материалы — это инновационные решения, которые сочетают способность к биоразложению с дополнительными функциональными свойствами, такими как сенсорность, самовосстановление, контроль условий хранения или адресная доставка веществ. Они играют ключевую роль в снижении экологического воздействия в различных отраслях — упаковке, медицине, сельском хозяйстве, текстильной промышленности и электронике.

Одни материалы действительно способны компостироваться (например, PLA-пластик), другие лишь распадаются на более мелкие фрагменты под воздействием солнечного света и кислорода (например, пластик с оксо-добавками). Поэтому маркировка «био» ещё не озна-

чает, что упаковка безопасно разлагается в природе или домашнем компосте. Наиболее распространённый компостируемый биополимер — PLA (полилактид) — рассчитан на промышленный компост. Без специализированной инфраструктуры он не реализует свои преимущества и может затруднять переработку вторсырья.

Основные типы биоразлагаемых материалов.

1. *Биоразлагаемые полимеры* — материалы, которые разлагаются под воздействием микроорганизмов (бактерий, грибов) и ферментов в естественных условиях (в почве, воде, компосте) до простых веществ: углекислого газа, воды и биомассы. К ним относятся следующие виды:

-*Полилактид (PLA)*. Получают из возобновляемых источников, таких как кукурузный крахмал, сахарный тростник или маниок. Используется для производства упаковки, одноразовой посуды, медицинских имплантатов. В условиях промышленного компостирования при температуре 60°C и влажности 90%. PLA может разлагаться за несколько недель.

-*Полигидроксиалканоаты (PHA)*. Производятся бактериями из возобновляемого сырья — растительных масел, сахара, отходов сельскохозяйственного производства. Обладают хорошей биосовместимостью и биоразлагаемостью, могут быть жёсткими или гибкими, термопластичными или термореактивными.

-*Крахмальные полимеры*. Получаются путём модификации крахмала для улучшения его свойств. Отличаются низкой стоимостью и доступностью, но часто требуют модификации для повышения прочности и водостойкости.

-*Хитозан* — биоразлагаемый полимер, который обладает противомикробной активностью против бактерий, грибов и некоторых вирусов. Его положительная зарядность позволяет взаимодействовать с отрицательно заряженными компонентами клеточных мембран микроорганизмов, нарушая их целостность и проницаемость. Кроме того, хитозан может проникать в клетки, взаимодействовать с нуклеиновыми кислотами, белками и питательными веществами, что приводит к ингибированию роста.

-*Эфирные масла* — многокомпонентные смеси летучих органических соединений (терпенов, терпеноидов, фенилпропаноидов и др.), которые обладают антимикробными свойствами. Однако их активность может снижаться из-за испарения, разложения под воздействием света, тепла или кислорода.

-*Наноэмульсии* используются для инкапсуляции эфирных масел в полимерную матрицу (например, хитозановую), что обеспечивает контролируемое высвобождение активных веществ, повышает их стабильность и эффективность. Это позволяет эффективнее бороться с микроорганизмами.

В некоторых исследованиях наноэмульсии на основе хитозана и эфирных масел применяли для защиты других продуктов, например, томатов или говядины. Также есть данные о создании наноэмульсий с эфирными маслами анибы розовой, орегано, тимьяна и других растений.

Таким образом, технология наноэмульсий с хитозаном и эфирными маслами представляет собой перспективное направление для снижения микробной нагрузки на пищевые продукты,

-*Мицелий (грибной мицелий)*. Волокнистая корневая структура грибов, которую выращивают на сельскохозяйственных отходах (конопляной костре, кукурузных стеблях и т. д.). После сбора урожая материал выпекают, чтобы уничтожить грибки, и получают гибкое, прочное и биоразлагаемое вещество.

2. *Материалы с интегрированными датчиками, красителями или электроникой*. Позволяют мониторить состояние продукта, условия хранения, взаимодействовать с потребителем и производителем.

3. *Экологичные материалы.* Это материалы, которые при производстве используют возобновляемое сырьё, минимизируют использование токсичных химикатов и снижают негативное воздействие на окружающую среду. К ним относятся, например:

- *Бамбук.* Быстро восстанавливается после сбора, используется как альтернатива пластику.

- *Пробка.* Эластична, водонепроницаема и более экологична, чем кожа, пена, пластик и дерево.

- *Материалы на основе целлюлозы.* Лёгкие, прочные, с хорошей термостойкостью, возобновляемые, биоразлагаемые и компостируемые.

- *Ткани из органического хлопка, конопли, водорослей* и другие варианты, созданные с учётом принципов экологичности.

Перспективные направления развития биоразлагаемых материалов:

- развитие нанокompозитов на основе биоразлагаемых полимеров и органо-модифицированных слоистых силикатов, которые могут улучшать механические и теплофизические свойства материалов;

- создание биоразлагаемых сенсоров, аккумуляторов и других компонентов электроники;

- интеграция умных технологий в текстиль и носимую электронику;

- развитие инфраструктуры для промышленного компостирования и правильной утилизации биоразлагаемых материалов.

Биоразложение представляет собой разрушение сложных органических соединений под воздействием живых организмов, преимущественно микроскопического размера — бактерий, грибов и водорослей. Процесс протекает в несколько последовательных стадий:

1. *Фрагментация (деполимеризация).* Под влиянием тепла, влаги, ультрафиолетового излучения или механического воздействия длинные полимерные цепи материала распадаются на более короткие фрагменты. На этой стадии материал теряет прочность и рассыпается на мелкие части.

2. *Ассимиляция.* Микроорганизмы колонизируют поверхность фрагментов полимера и выделяют ферменты (внеклеточные белки-катализаторы). Эти ферменты расщепляют короткие углеродные цепи на еще более простые молекулы, которые способны пройти сквозь клеточные мембраны микроорганизмов. 3. *Минерализация.* Внутри клеток микроорганизмов полученные вещества используются в качестве источника энергии. В результате их жизнедеятельности образуются конечные продукты: углекислый газ, вода, минеральные соли и новая клеточная биомасса.

Бактерии, синтезирующие природный полимер полигидроксибутират (PHB) На рис. 1.5, полученном с помощью светового микроскопа, представлены палочковидные бактериальные клетки. Темные округлые включения внутри клеток — это гранулы полигидроксибутирата (PHB), который относится к классу полигидроксиалканоатов (PHA). Микроорганизмы синтезируют этот полимер естественным путем и накапливают его внутри себя в качестве резервного источника питания и энергии. При аэробном разложении (в присутствии кислорода) основным газообразным продуктом является углекислый газ (CO_2). При анаэробном разложении (в условиях отсутствия кислорода) образуется метан (CH_4).

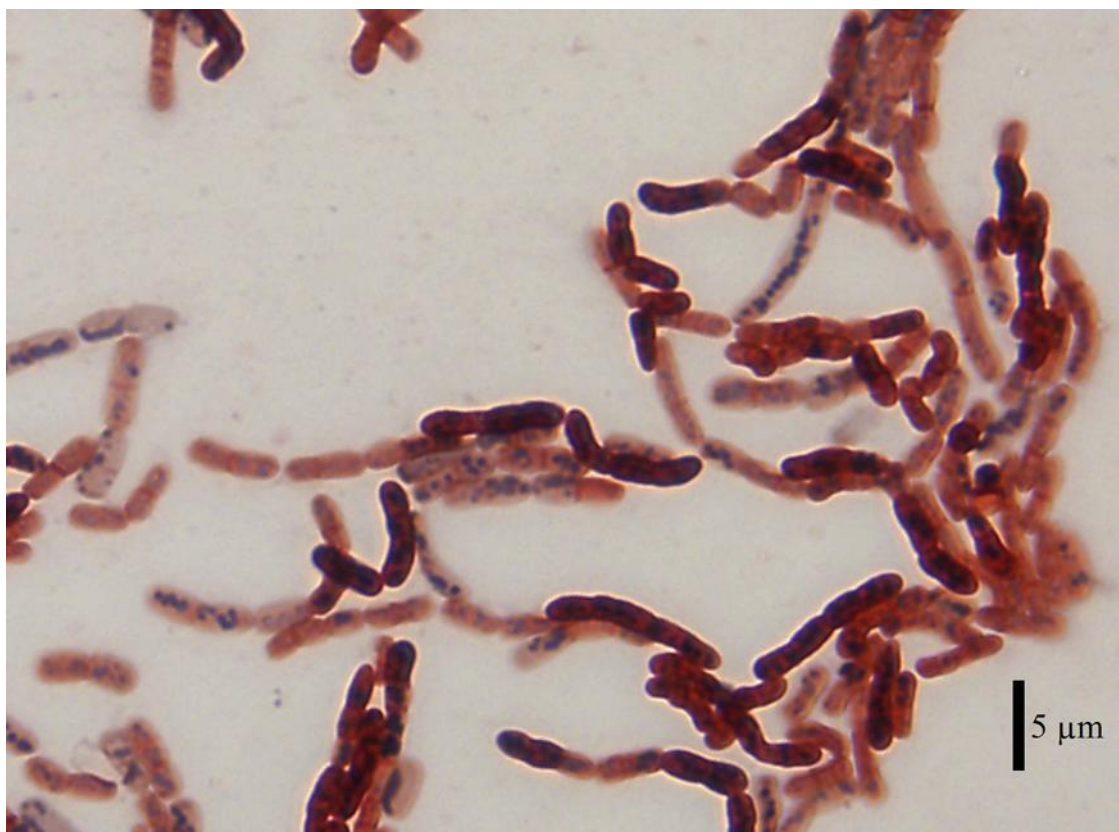


Рис.1.5. Бактерии, синтезирующие природный полимер

Скорость всех трех стадий зависит от структуры самого полимера (наличия гидролизующих связей, степени кристаллическости) и внешних параметров: температуры, влажности, уровня pH, доступности кислорода и концентрации необходимых штаммов микроорганизмов, рис.1.6.

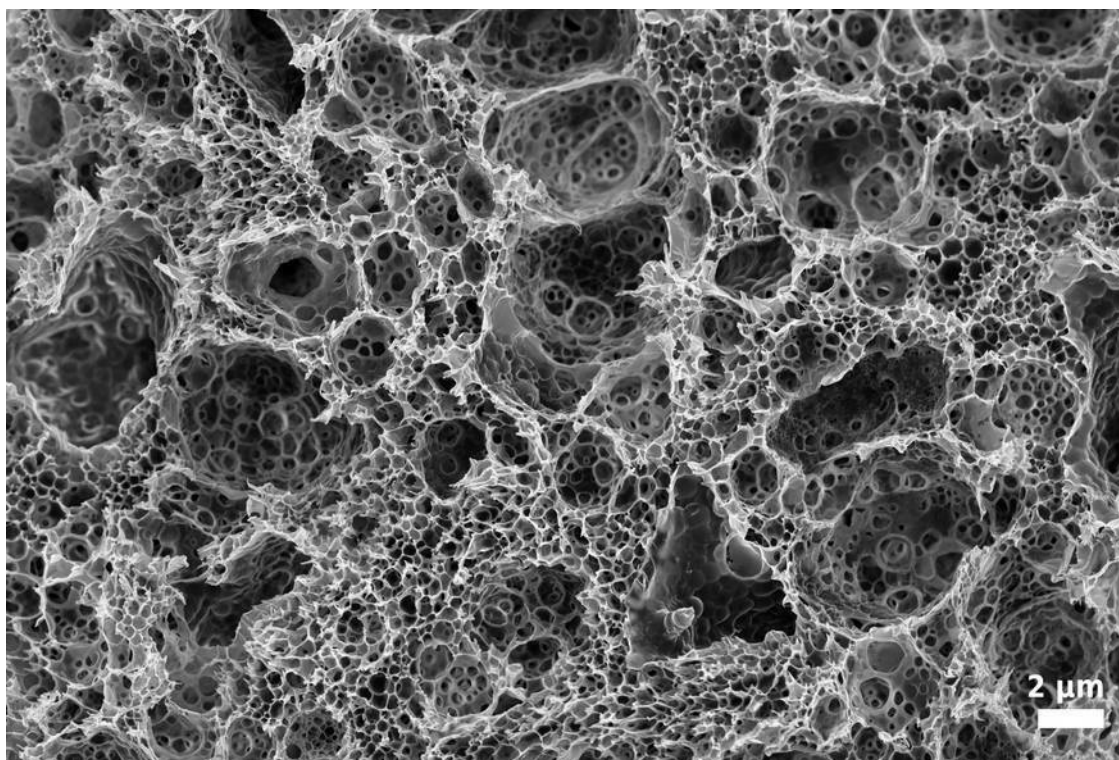


Рис.1.6. Гидролитическая деструкция макромолекул биополимера

Зависимость разложения от типа окружающей среды. Разные среды обладают принципиально разными физико-химическими характеристиками.

1. Промышленное компостирование. Это искусственно созданная среда, оптимизированная для максимально быстрого разложения органики. В промышленных установках поддерживается постоянная температура в диапазоне от 55 до 60°C. Обеспечивается высокая влажность (около 50-60%), непрерывная принудительная подача кислорода (аэрация) и контроль соотношения углерода и азота. В таких условиях большинство сертифицированных биопластиков полностью разлагаются в течение нескольких недель или месяцев.

2. Домашнее компостирование. Условия в обычном садовом компостере нестабильны. Температура в нем напрямую зависит от времени года и редко поднимается выше 30-40 °C. Влажность и доступ кислорода распределяются неравномерно. Материалы, разработанные для промышленного компостирования, в таких условиях могут не разлагаться годами.

3. Почва. В естественном грунте температура значительно ниже, чем в компосте, а состав микрофлоры зависит от географического положения и типа почвы. Разложение полимеров в почве происходит медленнее, так как активность ферментов микроорганизмов снижается при средних уличных температурах.

4. Водная среда (реки, моря, океаны). Морская вода характеризуется низкими температурами (часто ниже 10°C), высокой соленостью и специфическим составом микроорганизмов. Большинство современных биопластиков в воде не разлагаются. Они сохраняют свою структуру, опускаясь на дно или дрейфуя в толще воды, где представляют такую же опасность для морской фауны, как и традиционный пластик.

5. Полигоны твердых коммунальных отходов (свалки). Современные санитарные полигоны устроены так, чтобы изолировать мусор от внешней среды с целью предотвращения загрязнения грунтовых вод. Отходы утрамбовываются тяжелой техникой и пересыпаются слоями грунта. В результате внутри тела полигона создаются анаэробные условия (полное отсутствие кислорода) и дефицит влаги. В таких условиях биологические процессы практически

останавливаются. Даже обычная бумага или остатки пищи могут сохраняться на свалке без изменений в течение десятилетий, не говоря уже о биопластиках.

Анализ полилактида (PLA) как основного биополимера. Полилактид (PLA) — наиболее распространенный биоразлагаемый термопластичный полимер. Его производят из возобновляемых ресурсов, таких как кукурузный крахмал или сахарный тростник. По своим физико-механическим свойствам он близок к полиэтилентерефталату (PET), из которого делают бутылки для напитков.

Химическая структура PLA представляет собой эфирную цепь. Чтобы началось ее разрушение, требуется запустить процесс гидролиза — расщепления связей под воздействием молекул воды. Этот процесс эффективно инициируется только при температуре выше температуры стеклования полимера, которая для PLA составляет около 55-60°C. Если температура ниже этого порога, молекулярная структура PLA остается жесткой, вода не может проникнуть внутрь материала, и гидролиз происходит крайне медленно. Именно поэтому бутылка или стаканчик из PLA, выброшенные в лесу или водоеме, будут сохранять свою форму годами, практически не отличаясь по поведению от обычного пластика нефтехимического происхождения.

Стандарты оценки биоразлагаемости и проблема фрагментации. Для регулирования рынка биоразлагаемой упаковки были разработаны специальные стандарты и методы испытаний. Они определяют, в какой среде и за какой срок материал должен распасться, чтобы получить соответствующий сертификат. Рассмотрим некоторые из них.

1. EN 13432 (Европейский стандарт) и ASTM D6400 (Американский стандарт): эти нормативы регулируют требования к упаковке, утилизируемой путем промышленного компостирования. Согласно стандартам, не менее 90% органического углерода в составе материала должно превратиться в углекислый газ (CO₂) за период, не превышающий 180 дней при температуре около 58°C. Также оценивается влияние полученного компоста на рост растений (тест на экотоксичность) и содержание тяжелых металлов.

2. ISO 14855: описывает метод определения конечной аэробной биоразлагаемости пластиков в контролируемых условиях компостирования путем измерения объема выделившегося углекислого газа.

3. OECD 301: серия тестов Организации экономического сотрудничества и развития, оценивающая «быструю биоразлагаемость» химических веществ в водной среде.

Вещество считается быстроразлагаемым, если в течение 28 дней уровень его биоразложения достигает 60-70% в зависимости от метода измерения.

Проблема промежуточной фрагментации. Серьезным недостатком многих биоразлагаемых материалов является то, что в процессе распада они сначала рассыпаются на мелкие частицы. Этот процесс может занимать недели и месяцы. В течение этого переходного периода фрагменты материала размером менее 5 миллиметров классифицируются как микропластик.

Хотя эти частицы теоретически должны разложиться в будущем, на промежуточном этапе они способны накапливаться в почве, сорбировать на своей поверхности токсичные вещества из окружающей среды и попадать в пищевые цепи животных.

Текущие стандарты сертификации не всегда учитывают экологические риски, возникающие именно на этапе фрагментации материала.

Экологические риски и побочные эффекты биоразложения. Использование биоразлагаемой упаковки сопряжено с рядом неочевидных экологических проблем, которые часто игнорируются при продвижении таких товаров.

1. *Выбросы парниковых газов.* Если биоразлагаемый пластик попадает на обычную свалку, где преобладают анаэробные условия, микроорганизмы перерабатывают его без доступа кислорода. Конечным продуктом такого метаболизма является метан (CH₄).

Метан обладает значительно более высоким потенциалом глобального потепления, чем углекислый газ: в столетней перспективе его парниковый эффект в 28-36 раз сильнее, чем у

аналогичного объема CO₂. Таким образом, захоронение биоразлагаемой упаковки на обычных полигонах способствует ускорению изменения климата в большей степени, чем захоронение традиционного пластика, который в условиях свалки химически инертен и не выделяет газов.

2. Нарушение баланса экосистем (закисление). При попадании больших объемов биоразлагаемых материалов в естественную среду (например, в домашний компост или верхний слой почвы) происходит локальная концентрация продуктов распада. Выделение большого количества органических кислот (в случае PLA — молочной кислоты) приводит к снижению уровня pH среды (закислению). Это меняет структуру локального микробиома: чувствительные к кислотности микроорганизмы погибают, а популяции других видов неконтролируемо растут. Это может замедлить процессы естественного почвообразования и негативно сказаться на росте растений.

3. Токсичность добавок. Для придания пластикам эластичности, цвета и стойкости к ультрафиолету в их состав вводят различные пластификаторы, красители и стабилизаторы. Даже если базовый полимер (например, крахмал или PLA) является полностью биоразлагаемым, эти химические добавки могут не обладать этим свойством. В процессе распада полимерной матрицы они высвобождаются в почву или воду в неизменном виде, оказывая токсичное воздействие на живые организмы.

4. Инфраструктурный тупик и проблемы переработки. Основная проблема биоразлагаемой упаковки заключается в отсутствии инфраструктуры для ее отдельного сбора и переработки в большинстве стран мира.

5. Отсутствие специализированных предприятий. Для утилизации упаковок с маркировкой Industrial Compostable требуются промышленные заводы по компостированию. Однако в большинстве городов системы обращения с отходами рассчитаны только на механическую переработку, сжигание или захоронение на полигонах. Без доступа к промышленным компостерам биоразлагаемая упаковка теряет свои экологические преимущества и утилизируется стандартными методами — сжигается или закапывается.

6. Загрязнение каналов вторичной переработки традиционных пластиков. Биоразлагаемые пластики внешне практически неотличимы от обычных полимеров. Например, бутылка из PLA выглядит точно так же, как бутылка из PET. Если потребитель выбрасывает PLA-бутылку в бак для сбора пластика, она попадает на мусоросортировочный завод, а затем на предприятие по вторичной переработке PET.

При плавлении смеси PET и PLA даже незначительное количество биопластика (более 1-2%) делает всю партию вторичного сырья непригодной для дальнейшего использования. PLA имеет более низкую температуру плавления и начинает коксоваться при температурах, необходимых для переработки PET. Это приводит к засорению оборудования, изменению физических свойств полимера (появлению хрупкости, изменению цвета) и снижению качества конечной продукции. В результате биоразлагаемый пластик непреднамеренно снижает эффективность традиционной вторичной переработки.

Рекомендации по оценке упаковочных материалов для потребителей

Чтобы минимизировать экологический ущерб, необходимо критически подходить к выбору упаковки и способам ее утилизации. Ниже приведены три ключевых вопроса, на которые нужно ответить перед покупкой товара в биоразлагаемой упаковке:

1. Каков точный тип биоразлагаемости материала? Необходимо изучить маркировку на упаковке. Маркировка «Home Compostable» (или логотипы институтов TÜV Austria, DIN CERTCO с соответствующей подписью) указывает на то, что материал разработан для разложения при низких температурах и его можно утилизировать в домашнем компостере.

Маркировка «Industrial Compostable» (или стандарт EN 13432) указывает на то, что материал разлагается только на специализированных промышленных объектах. Выбрасывать его в домашний компост или обычный мусор бессмысленно.

Наличие надписи «COMPOSTABLE» (компостируемый) совместно с официальным знаком «Росток» (Seedling, круглый логотип сверху) указывает на то, что изделие прошло независимые лабораторные испытания и соответствует международным стандартам разложения (таким как европейский EN 13432 или американский ASTM D6400).

На рис.1.7. представлена тисненая маркировка на одноразовой посуде или контейнере.

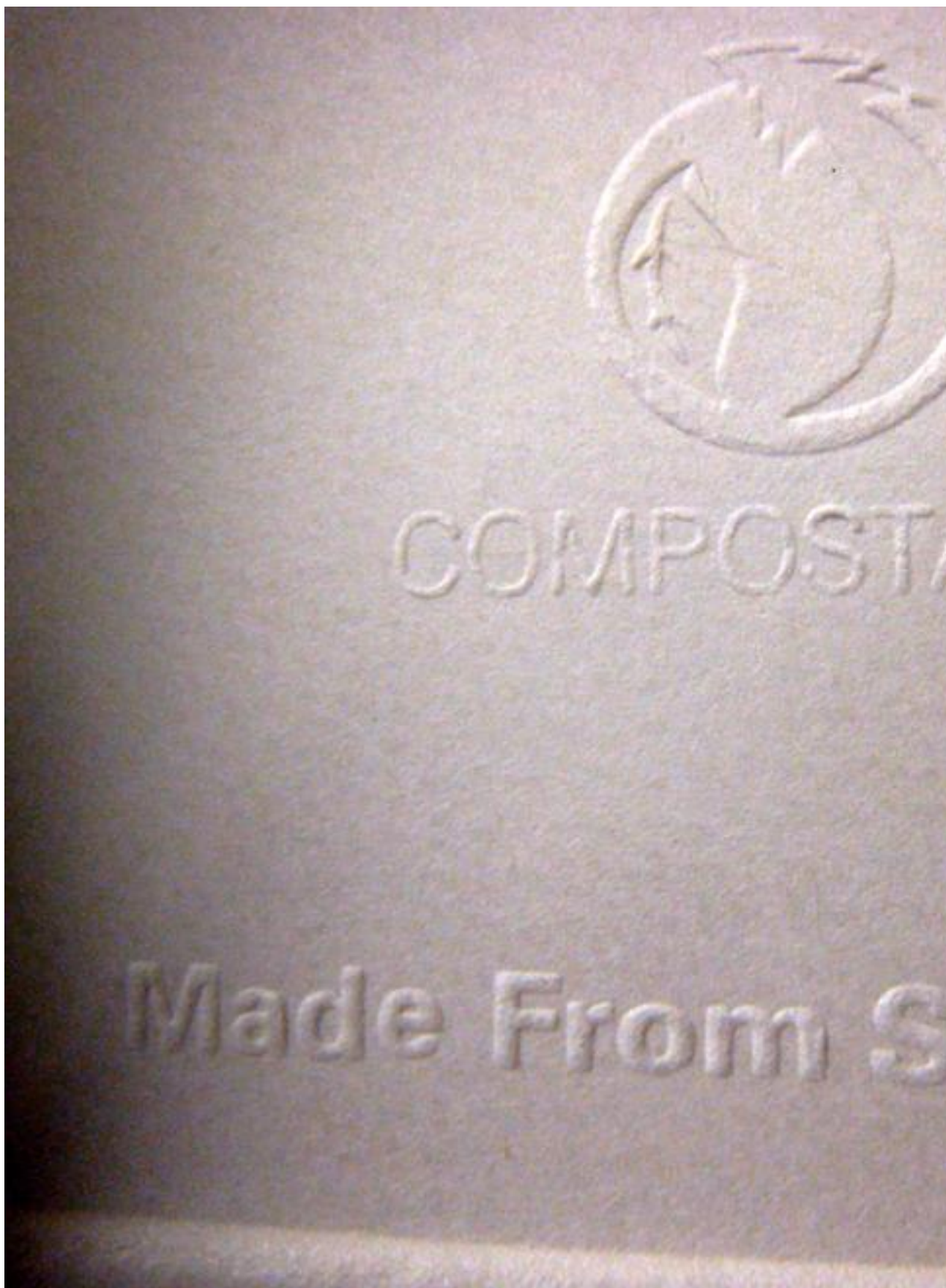


Рис. 1.7. Тисненая маркировка на одноразовой посуде или контейнере.

Нижняя надпись «Made From Sugarcane» сообщает, что сырьем для изделия послужили волокна сахарного тростника (багасса) — побочный продукт переработки тростника при производстве сахара.

2. *Существует ли в регионе система сбора и утилизации данного материала?* Если в городе нет пунктов приема биоразлагаемого пластика или специализированных органических баков, направляющих отходы на промышленное компостирование, то покупка такой упаковки не имеет экологического смысла. В этом случае она гарантированно попадет на полигон или мусоросжигательный завод.

3. *Сертифицирован ли материал независимыми организациями?* Простые текстовые заявления на упаковке вроде «100% экологично» или «биоразлагаемый пакет» без указания конкретных стандартов и кодов сертификации часто являются признаком гринвошинга (зеленого камуфляжа).

Надежная упаковка всегда содержит ссылку на технический стандарт (например, ASTM D6400) и уникальный номер лицензии органа по сертификации.

Для оценки реальной экологической эффективности различных типов упаковки применяется метод анализа жизненного цикла (Life Cycle Assessment, LCA). Он учитывает все стадии существования продукта: от добычи сырья и производства до транспортировки и утилизации.

Биоразлагаемые и экологичные упаковочные материалы помогают решить насущную проблему сокращения количества пластиковых отходов. Они также обладают теми же функциональными возможностями, что и традиционная упаковка.

1.3. Интеллектуальная упаковка

Интеллектуальная упаковка — это упаковка, снабжённая цифровыми компонентами: датчиками, микрочипами, модулями беспроводной связи и элементами автоматической идентификации. Она может не только «знать», что находится внутри, но и фиксировать условия хранения, отслеживать местоположение и даже передавать данные в режиме реального времени.

Некоторые функции интеллектуальной упаковки:

- контроль состояния содержимого;
- предупреждение о нарушениях условий хранения;
- отслеживание логистического пути;
- защита от подделок и вскрытия.

Некоторые преимущества интеллектуальной упаковки:

1. *Повышение качества продукции.* Система уведомлений о нарушениях условий хранения позволяет оперативно реагировать на отклонения и предотвращать порчу продукции.

2. *Снижение потерь.* Контроль условий транспортировки и хранения помогает минимизировать случаи порчи, особенно в цепочках поставок «холодной логистики».

3. *Прозрачность поставок.* IoT-решения обеспечивают сквозной контроль: от производства до конечного потребителя.

4. *Ускорение логистики.* Упрощение процессов учёта и идентификации товара (через RFID, QR и GPS) значительно сокращает время приёмки и отгрузки на складах.

5. *Устойчивость и экология.* Своевременное выявление сбоев в логистике позволяет избежать излишнего количества отходов.

1.3.1. Устройства, используемые в интеллектуальной упаковке.

1. *Индикаторы времени и температуры (TTI — Time-Temperature Indicators)*

Это самый известный и распространенный тип сенсоров. Их задача — отследить совокупное температурное воздействие на продукт за все время его жизни. Чаще всего это этикетка, на которой происходит необратимая химическая или физическая реакция (например,

диффузия окрашенного вещества через пористый материал), скорость которой напрямую зависит от температуры.

Пример: на упаковке замороженной рыбы есть этикетка с белым кругом и зеленым фоном. Пока продукт хранится при правильной отрицательной температуре, ничего не происходит. Но если рыбу разморозили и заморозили снова, или она долго лежала в тепле, цветной индикатор начнет проникать в центральный круг. Чем дольше и сильнее было нарушение, тем темнее станет круг. Когда он сравняется по цвету с фоном — продукт употреблять небезопасно.

Идеально подходят для замороженных и охлажденных продуктов, вакцин, донорской крови — всего, где критически важен непрерывный контроль холодовой цепи.

Для ритейлеров и производителей позволяет внедрить систему FEFO (First-Expired-First-Out — «первый истекает, первый уходит») вместо стандартной FIFO (First-In-First-Out). Это значит, что на полку в первую очередь будут выставляться не те товары, что раньше поступили, а те, у которых раньше истекает реальный срок годности.

Сокращение списаний: прямое следствие оптимизации логистики и уменьшения порчи на складе и в торговом зале.

Снижение риска инцидентов с пищевыми отравлениями, связанных с продукцией компании, укрепляет репутацию.

Инновационная упаковка привлекает внимание и повышает доверие покупателей.

1. Индикаторы свежести продуктов.

Индикаторы свежести являются ключевым компонентом интеллектуальной упаковки, обеспечивающим мониторинг качества продуктов в реальном времени. Эти устройства работают на основе обнаружения химических изменений, происходящих при порче пищевых продуктов. Основной принцип действия базируется на реакции индикатора с летучими соединениями, которые выделяются при микробиологической деградации продукта, такими как летучие амины и сульфиды.

Современные индикаторы свежести используют различные механизмы обнаружения. Колориметрические индикаторы изменяют свой цвет при взаимодействии с продуктами метаболизма микроорганизмов.

Например, при разложении мяса и рыбы выделяются такие соединения, как триметиламин и аммиак, которые вызывают визуально заметное изменение окраски индикатора от зеленого или желтого к красному или фиолетовому цвету, что сигнализирует о начале процесса порчи. Исследователи из Университета Анны в Индии разработали интеллектуальную пленку на основе хитозана с включением антоцианов из черного риса для мониторинга свежести морепродуктов.

Индикатор демонстрирует четкое изменение цвета с фиолетового на желто-зеленый при накоплении летучих азотистых оснований выше критической концентрации, что коррелирует с микробиологическими показателями порчи продукта.

Индикаторы свежести продуктов представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Индикаторы свежести продуктов

Аминовые
Реакция с летучими
Морепродукты,
рыба

индикаторы
аминами

рН-чувствительные
Изменение кислотности среды
Мясо, птица,
молочные
продукты

Газовые сенсоры
Детектирование газообразных метаболитов
Фрукты,
овощи,
мясо

Ферментативные
Биохимические реакции с ферментами
Универсальное
применение

2. Время-температурные индикаторы. Время-температурные индикаторы представляют собой одну из наиболее развитых и коммерциализированных технологий интеллектуальной упаковки. Эти устройства отслеживают кумулятивное температурно-временное воздействие на продукт на протяжении всей холодовой цепи, от производства до момента потребления. Функционирование время-температурных индикаторов основано на температурно-зависимых физических, химических, ферментативных или микробиологических процессах. Существует три основные категории этих устройств: -критические температурные индикаторы, которые показывают, был ли продукт нагрет выше или охлажден ниже допустимого порога;

-частичные историографические индикаторы, фиксирующие превышение критических температур;

-полные историографические индикаторы, записывающие весь температурный профиль продукта на протяжении логистической цепи.

Активационная энергия время-температурного индикатора должна максимально соответствовать активационной энергии процессов потери качества продукта. Для большинства пищевых продуктов энергия активации порчи составляет от 50 до 120 килоджоулей на моль. Время-температурные индикаторы разрабатываются с учетом уравнения Аррениуса, где скорость реакции индикатора изменяется экспоненциально с температурой.

Критерий совместимости. Разница между энергией активации индикатора и энергией активации процесса порчи продукта должна быть менее 40 килоджоулей на моль для обеспечения надежного прогнозирования остаточного срока годности.

3. Газовые сенсоры для контроля порчи. Газовые сенсоры представляют собой высокотехнологичные устройства, способные обнаруживать и количественно определять концентрацию специфических газов внутри упаковки, которые являются индикаторами свежести продукта. Эти сенсоры особенно эффективны для мониторинга мясных и рыбных продуктов, где микробиологическая порча сопровождается выделением характерных летучих соединений.

Когда продукты (особенно мясо, рыба и птица) начинают портиться, деятельность микроорганизмов приводит к выделению определенных летучих соединений — «газов порчи». Газовые сенсоры улавливают их появление.

Внутри упаковки размещается небольшая метка, содержащая химический реагент. Этот реагент чувствителен к конкретным газам. При контакте с ними он меняет свой цвет. Реагент отслеживает следующие газы.

1. Диоксид углерода (CO_2): Его концентрация растет при порче многих продуктов, упакованных в модифицированной газовой среде.

2. Аммиак (NH_3) и триметиламин: Характерные маркеры порчи рыбы и морепродуктов.

3. Сероводород (H_2S): часто указывает на порчу мяса и яиц.

4. Этилен (C_2H_4 газ созревания. Индикаторы этилена показывают степень спелости фруктов и овощей (например, авокадо или груш). Критические концентрации гаа представлены в таблице 1.2

. Таблица 1.2. Критические концентрации газа

Аммиак (NH_3)

Разложение белков

5-50 ppm

Триметиламин

(ТМА)

Бактериальный

метаболизм

1-10 ppm

Сероводород

(H_2S)

Анаэробная порча

0.1-1 ppm

Этилен (C_2H_4)

Созревание плодов

0.1-10 ppm

Диоксид углерода

(CO_2)

Дыхание,

ферментация

Зависит от продукта

Пример: на прозрачной пленке, которой затянута упаковка с куриной грудкой, есть небольшой желтый кружок. Если продукт свежий, он остается желтым. По мере размножения бактерий и выделения ими аммиака, кружок необратимо меняет цвет на синий. Синий цвет — сигнал: «Внимание, продукт испорчен

Современные разработки в области газовых сенсоров включают бумажные электрические газовые сенсоры. Эти устройства производятся путем печати углеродных электродов на целлюлозной бумаге и способны детектировать водорастворимые газы, такие как аммиак и триметиламин, с нижним пределом обнаружения около 0,2 частей на миллион при относительной влажности семьдесят процентов, таблица 1.2.

Ключевое преимущество этих сенсоров заключается в их интеграции с технологией связи ближнего поля, что позволяет считывать данные с помощью обычного смартфона.

Группа исследователей создала колориметрический индикатор на основе гидрогеля с антоцианами из батата для обнаружения триметилamina с пределом обнаружения 2,52 микро-моль на литр. Система была успешно протестирована для мониторинга свежести мяса и лосося,

демонстрируя видимые изменения цвета при превышении критических концентраций газа, что коррелирует с началом микробиологической порчи.

4. *Индикаторы на основе pH*: кислотность как маркер свежести. Порча многих продуктов сопровождается изменением их кислотно-щелочного баланса (pH). Например, свежее молоко имеет нейтральный pH, а при скисании из-за деятельности молочнокислых бактерий становится более кислым.

Сенсор представляет собой полимерную матрицу с внедренным в нее красителем-индикатором, чувствительным к pH. Он может быть нанесен непосредственно на внутреннюю поверхность упаковки.

Пример: на крышке контейнера с йогуртом есть индикаторная полоска. Пока продукт свежий, она одного цвета. Когда pH продукта меняется до критического уровня, полоска меняет цвет, сигнализируя о том, что процесс порчи зашел слишком далеко. Эта технология также актуальна для мяса и рыбы.

5. *Биосенсоры*. Это наиболее сложный и точный тип сенсоров. В отличие от предыдущих, которые реагируют на общие побочные продукты порчи, биосенсоры нацелены на обнаружение конкретных молекул. В основе биосенсора лежит биологический компонент (например, антитела или ферменты), который специфически связывается с определенной «молекулой-мишенью». Этой мишенью могут быть:

- патогенные бактерии: сальмонелла, кишечная палочка;
- токсины: вещества, выделяемые микроорганизмами;
- аллергены;
- антибиотики.

Пример, упаковка с мясным фаршем оснащена биосенсором, который содержит антитела к сальмонелле. Если в мясе присутствует эта опасная бактерия, антитела свяжутся с ней, что вызовет изменение цвета или флуоресцентный сигнал на индикаторе.

Биосенсоры пока еще достаточно дороги для массового применения в пищевой промышленности, но их потенциал для обеспечения безопасности огромен.

Реальные примеры и технологии, которые уже меняют полки магазинов

Некоторые технологии умной упаковки коммерциализированы и находят применение в ритейле по всему миру.

RipeSense® — индикатор спелости фруктов. Это один из первых и самых известных примеров. Этикетка RipeSense, разработанная в Новой Зеландии, реагирует на ароматические соединения (эфирные масла и этилен), которые выделяют фрукты по мере созревания. Сенсор меняет цвет от красного (хрустящий, неспелый) через оранжевый к желтому (сочный, сладкий, спелый). Это позволяет покупателям выбирать груши или авокадо идеальной для них степени спелости.

Bump Mark — это желатиновая этикетка, которая на ощупь становится неровной, когда продукт портится. Желатин — это белок, и он портится примерно с той же скоростью, что и белковые продукты (молоко, мясо, сыр). Пока продукт свежий, этикетка гладкая. Когда желатин внутри нее распадается и превращается в жидкость, вы начинаете ощущать под пальцами рельефную подложку. Это интуитивно понятный сигнал, доступный даже для людей с нарушениями зрения.

Индикаторы OnVu™ от Ciba/BASF. Это классические ТП-индикаторы, которые используют специальные пигменты, необратимо меняющие цвет под воздействием ультрафиолета и температуры. Изначально они бесцветны, а после активации УФ-лампой на заводе становятся темными. Затем, под влиянием времени и температуры, они постепенно светлеют. Когда цвет индикатора становится светлее эталонного образца на этикетке, это означает, что срок годности продукта истек.

Fresh-Check® от Temptime. Еще один ТТИ-индикатор, который часто можно увидеть на упаковках с охлажденным мясом в США. Он представляет собой круг внутри другого круга. Внутренний круг темнеет быстрее при более высоких температурах. Пока он светлее внешнего кольца, продукт безопасен.

6. Биоразлагаемые и съедобные сенсоры. Экологический аспект выходит на первый план. Уже разрабатываются сенсоры на основе натуральных полимеров (например, из крахмала или хитозана) и природных красителей (например, антоцианов из краснокочанной капусты), которые полностью безопасны и разлагаются вместе с пищевыми отходами. В перспективе — съедобные сенсоры, которые станут частью самого продукта.

7. *RFID и NFC технологии в упаковке.* Все чаще простые визуальные индикаторы дополняются цифровыми технологиями. Вы можете отсканировать QR-код на упаковке с помощью смартфона, и он не просто приведет вас на сайт производителя. Он может показать всю историю температурного режима продукта, зафиксированную RFID/NFC-меткой с функцией термоматчика. Это дает беспрецедентный уровень прозрачности всей цепочки поставок.

RFID-метки и NFC-метки — это электронные устройства, которые используют радиочастотную технологию для идентификации объектов и обмена данными. Обе технологии связаны с радиочастотной идентификацией, но имеют различия в принципах работы, дальности действия, функционале и сферах применения.

RFID— радиочастотная идентификация — технология автоматической идентификации объектов с помощью радиоволн. RFID-метка (транспондер) содержит данные об объекте и взаимодействует со считывающим устройством.

Состав RFID-метки:

- микрочип для хранения информации;
- антенна для приёма и передачи сигнала;
- корпус с креплением к объекту.

Виды RFID-меток.

1. По типу питания: активные (с собственным источником питания), пассивные (получают энергию от считывателя), полупассивные (сочетают функции активных и пассивных).
2. По диапазону частот: низкочастотные (LF), высокочастотные (HF — около 13,56 МГц), сверхвысокочастотные (UHF — 860–960 МГц).
3. По типу памяти: R/W (чтение и запись), WORM (одноразовая запись и многократное чтение), R/O (только чтение).

Принцип работы: считыватель посылает радиосигнал на метку, антенна принимает его, а чип обрабатывает и отправляет обратно данные.

Сферы применения RFID-меток: логистика, розничная торговля, складской учёт, контроль доступа, здравоохранение, сельское хозяйство, транспорт, библиотечное дело и другие.

NFC— связь ближнего поля — специализированный подвид RFID, разработанный для связи на очень малом расстоянии (обычно до 10 сантиметров).

NFC-метка — это небольшой электронный носитель данных со встроенным чипом и антенной, который может иметь форму наклейки, брелока, пластиковой карты и т. д.

Принцип работы: при сближении устройств создаётся электромагнитное поле, через которое происходит обмен данными. Пассивные NFC-метки не имеют собственного источника питания — они получают энергию от активного устройства (например, смартфона), которое их сканирует.

Особенности NFC:

- работает на частоте 13,56 МГц;
- поддерживает двусторонний обмен данными (может работать в двух режимах: пассивном, аналогичном RFID, и активном — одноранговом);
- скорость передачи данных — от 106 до 424 кбит/с;

-обеспечивает минимальное энергопотребление и не требует предварительного сопряжения устройств.

Ключевые различия между RFID и NFC представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3. Ключевые различия между RFID и NFC

Критерий

RFID

NFC

Дальность действия

Может достигать нескольких метров (в зависимости от типа и частоты)

Обычно несколько сантиметров

Тип связи

Обычно односторонняя: метка передаёт данные считывателю

Двусторонняя (может быть как односторонней, так и одноранговой)

Частотный диапазон

LF, HF, UHF

Только HF (13,56 МГц)

Скорость передачи данных

Может быть различной в зависимости от типа и применения

От 106 до 424 кбит/с

Применение

Логистика, учёт товаров, контроль доступа и т. д.

Бесконтактные платежи, обмен данными между устройствами, смарт-метки и т. п.

Типы NFC-меток: одноразовые, перезаписываемые, защищённые с паролем, интерактивные (позволяют не только передавать информацию, но и выполнять команды: запускать приложение, подключаться к Wi-Fi и т. д.). Сферы применения NFC-меток: бесконтактные платежи, управление умным домом, контроль доступа (электронные ключи, пропуски), продажа электронных билетов, идентификация продукции, логистика, гостиничный бизнес и другие.

Таким образом, RFID и NFC дополняют друг друга, но применяются в разных сценариях в зависимости от задач: первая — для масштабного отслеживания и учёта, вторая — для быстрого и безопасного взаимодействия на малом расстоянии

8. GPS-трекер — это небольшое электронное устройство, которое с помощью сигналов спутниковых систем (GPS, а в некоторых моделях ещё и ГЛОНАСС) определяет свои координаты и передаёт их на сервер или в приложение, чтобы вы могли видеть местоположение объекта в реальном времени, рис. 1.8.

Устройство работает по такому алгоритму:

1. Приём сигналов. Трекер ловит сигналы как минимум от четырёх спутников. На основе разницы во времени прихода сигналов он вычисляет свои географические координаты (широту, долготу).

2. Передача данных. Полученные координаты устройство отправляет дальше — через сотовую сеть (GSM/GPRS), иногда с использованием спутниковой связи или Wi-Fi. Часто в трекер вставляют SIM-карту для передачи данных.

3. Мониторинг. Пользователь (владелец, диспетчер) подключается к серверу через веб-интерфейс или приложение на смартфоне/компьютере и видит на карте, где сейчас объект и какой у него маршрут.



Рис. 1.8. *GPS-трекер*

Многие современные трекеры используют вспомогательные технологии (A-GPS, LBS — определение местоположения по базовым станциям сотовой связи или Wi-Fi), чтобы быстрее находить спутники и точнее позиционировать объект, особенно в закрытых помещениях.

Обычно в *GPS* трекере есть несколько ключевых компонентов:

- GPS-приёмник (для определения координат);
- передатчик (GSM-модуль, спутниковый модем или другой канал связи);
- антенна (может быть встроенной или внешней);
- аккумулятор (от его ёмкости зависит, как долго устройство проработает без подзарядки);
- встроенная память (для записи данных, если нет постоянного канала связи).

Связь. Для работы многих трекеров нужна SIM-карта и активный мобильный тариф.

9. *Сенсоры вскрытия и удара* — это устройства, которые фиксируют попытки несанкционированного доступа или механические воздействия на объекты, обеспечивая защиту от краж, повреждений или несанкционированного вмешательства. Они широко применяются в системах безопасности, логистике, промышленности, «умном доме» и других сферах.

9. *Сенсоры вскрытия* - это датчики, которые обнаруживают факт вскрытия корпуса устройства, пломбы, двери или другого элемента упаковки. Они могут реагировать на изменение состояния контакта при открытии корпуса, например, через размыкание или замыкание электрической цепи.

Некоторые типы сенсоров вскрытия:

- тамперы — электромеханические датчики, которые срабатывают при снятии крышки устройства или попытке его демонтажа;
- герконовые датчики (герконы) — работают на основе магнитного поля: при удалении магнита от геркона контакты размыкаются или замыкаются, что фиксируется системой безопасности;
- фотоэлектрические датчики — могут отслеживать не только вскрытие крышки, но и нарушение целостности корпуса (например, появление отверстий).

После обнаружения факта вскрытия система может активировать сигнализацию, отправить уведомление администратору, записать событие в журнал безопасности или автоматически отключить питание оборудования.

10. Сенсоры удара. Эти устройства фиксируют механические воздействия, такие как удары, вибрации или резкие движения. Они преобразуют механические колебания в электрический сигнал, позволяя оперативно фиксировать события и реагировать на них.

Некоторые типы сенсоров удара:

- акселерометры — измеряют ускорение (перегрузку) в единицах силы тяжести (g). Резкое изменение ускорения интерпретируется как удар;

- пьезоэлектрические датчики — обладают высокой чувствительностью и быстро фиксируют механические воздействия.

- микромеханические датчики с фиксацией замкнутого положения — обеспечивают замыкание контактов при действии перегрузки, превышающей предельное значение.

Датчики удара могут фиксировать силу удара, его вектор (по какой оси произошло воздействие), время и координаты события (при наличии геолокации).

Применение датчиков.

1. В логистике — для контроля условий транспортировки хрупких грузов, контейнеров, рефконтейнеров. Фиксируют удары, наклон, попытки вскрытия, что позволяет создать доказательную базу для выявления виновной стороны в случае претензий.

2. В системах безопасности — для защиты от взлома, например, в охранных сигнализациях, умных домах, банкоматах, серверных стойках, платёжных терминалах.

Современные устройства часто представляют собой цифровые модули, которые интегрируются в системы мониторинга (например, на базе IoT) и позволяют в режиме реального времени получать данные о событиях.

QR-код и DataMatrix — это два типа двумерных (2D) штрихкодов, которые хранят информацию в виде матрицы чёрных и белых элементов. Они используются для разных задач, хотя внешне могут быть похожи.

QR-код (Quick Response — быстрый отклик) — двумерный штрихкод, разработанный японской компанией Denso Wave в 1994 году для автомобильной промышленности.

Особенности:

- состоит из чёрных и белых квадратов (модулей), расположенных в квадратной сетке;
- имеет три крупных квадратных маркера в углах, которые помогают сканеру определить ориентацию кода;
- может хранить до 7089 цифр или 4296 буквенно-цифровых символов;
- использует коррекцию ошибок (например, алгоритм Рида-Соломона), что позволяет считывать код даже при повреждении до 30% площади;
- сканируется большинством смартфонов через встроенную камеру или специальные приложения.

Применение:

- маркетинг и реклама — для доступа к ссылкам, промокодам, инструкциям;
- финансы — для передачи платёжных реквизитов через СБП;
- логистика — для отслеживания товаров на складах;
- медицина и госуслуги — для доступа к медкартам, справкам;
- мероприятия — для электронных билетов, сбора контактов.

DataMatrix — двумерный матричный штрихкод, который может быть выполнен в виде квадрата или прямоугольника, заполненного чёрными и белыми элементами.

Особенности:

- имеет сплошную линию по двум сторонам (левой и нижней) и пунктирную по двум другим, что образует L-образную границу;

- может содержать до 2335 алфавитно-цифровых символов или до 3116 цифр;
- использует алгоритмы коррекции ошибок (например, Reed-Solomon в версии ECC200), что позволяет считывать код при повреждении до 30–50% площади;
- может быть выполнен в разных размерах — от 10×10 до 144×144 точек.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.