

Безруков Артём Дмитриевич

Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова

**СРАВНЕНИЕ БАРЬЕРНЫХ СВОЙСТВ И ГЕРМЕТИЧНОСТИ
УПАКОВКИ ДЛЯ МЯСА: РА/РЕ И РЕТ/EVОН/РЕ ПРИ ХРАНЕНИИ В
МОДИФИЦИРОВАННОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЕ**

Аннотация. В статье проведен сравнительный анализ двух распространенных многослойных упаковочных структур для охлажденных мясных продуктов — РА/РЕ и РЕТ/EVОН/РЕ — с позиции их кислородобарьерных свойств, герметичности готовой упаковки и способности сохранять параметры модифицированной газовой среды при холодильном хранении. Показано, что структура РА/РЕ характеризуется хорошей механической прочностью, технологичностью и надежной свариваемостью, однако уступает РЕТ/EVОН/РЕ по барьеру к кислороду и стабильности внутренней атмосферы. Наличие EVОН-слоя в структуре РЕТ/EVОН/РЕ обеспечивает более низкую кислородопроницаемость, что особенно важно для охлажденного мяса, чувствительного к окислению липидов и изменению цвета. Вместе с тем эффективность EVОН-содержащей структуры зависит от влажностного режима и перераспределения толщины барьерного слоя после термоформования. На основе анализа литературных данных предложен авторский сравнительный подход, учитывающий барьерность стенки упаковки, герметичность сварного шва, технологическую устойчивость после формования и влияние на срок годности мясной продукции в условиях MAP. Сделан вывод о том, что РЕТ/EVОН/РЕ является более предпочтительным решением для длительного хранения и розничной выкладки охлажденного мяса, тогда как РА/РЕ может рассматриваться как экономически оправданный вариант для менее продолжительных сроков хранения и умеренных требований к кислородному барьеру.

Ключевые слова: мясная продукция, MAP, PA/PE, PET/EVOH/PE, EVOH, барьерные свойства, герметичность, кислородопроницаемость, срок годности.

Comparison of Barrier Properties and Package Tightness for Meat Packaging: PA/PE and PET/EVOH/PE during Storage in Modified Atmosphere

A. D. Bezrukov

Plekhanov Russian University of Economics

e-mail: bezrukov.a@edu.rea.ru

Abstract. The article presents a comparative analysis of two common multilayer packaging structures for chilled meat products — PA/PE and PET/EVOH/PE — in terms of oxygen barrier performance, package tightness and the ability to maintain modified atmosphere parameters during refrigerated storage. It is shown that PA/PE provides good mechanical strength, processability and sealability, but is inferior to PET/EVOH/PE in oxygen barrier and atmosphere stability. The EVOH layer in PET/EVOH/PE ensures lower oxygen permeability, which is especially important for chilled meat sensitive to lipid oxidation and color changes. At the same time, the efficiency of EVOH-containing structures depends on humidity and redistribution of barrier-layer thickness after thermoforming. Based on the literature review, the author proposes a comparative approach that takes into account wall barrier performance, seal tightness, post-forming stability and the impact on meat shelf life under MAP conditions. It is concluded that PET/EVOH/PE is more suitable for extended storage and retail display of chilled meat, while PA/PE may be considered an economically justified solution for shorter storage periods and moderate oxygen-barrier requirements.

Keywords: meat products, MAP, PA/PE, PET/EVOH/PE, EVOH, barrier properties, package tightness, oxygen permeability, shelf life.

Введение

Охлажденное мясо относится к категории пищевых продуктов с высокой чувствительностью к условиям хранения. Скорость ухудшения его качества определяется одновременно микробиологическими процессами, интенсивностью липидного окисления, состоянием пигментной системы и изменением влагоудерживающей способности. В этих условиях упаковка выполняет функцию не только механической защиты, но и технологического инструмента регулирования газообмена между продуктом и внешней средой. Особенно отчетливо это проявляется в системах хранения в модифицированной газовой среде, где срок годности зависит от способности упаковочного материала удерживать заданный состав газовой смеси на протяжении всего периода обращения продукции [3, 5].

В технологии MAP для мяса основное значение имеют кислород, углекислый газ и азот. Кислород обеспечивает формирование привлекательного ярко-красного цвета за счет образования оксимиоглобина, однако одновременно может усиливать окисление липидов и пигментов. Углекислый газ проявляет ингибирующее действие по отношению к микрофлоре, а азот используется в качестве инертного наполнителя. Следовательно, реальный эффект MAP зависит не только от исходного соотношения газов, но и от того, насколько долго упаковка способна сохранить расчетную атмосферу без утечек и диффузионного проникновения кислорода извне [3].

В промышленной практике для упаковки охлажденного мяса широко применяются многослойные структуры PA/PE и PET/EVOH/PE. Первая комбинация представляет собой технологически удобный материал с хорошей прочностью, свариваемостью и приемлемыми барьерными характеристиками. Вторая система относится к высокобарьерным решениям и включает слой EVOH, который обеспечивает существенно более низкую кислородопроницаемость. При этом выбор между данными материалами определяется не только стоимостью, но и совокупностью свойств: уровнем OTR, стабильностью после

термоформования, герметичностью шва, влиянием влажности на барьер и реальным воздействием на срок годности мяса [1, 2].

Целью настоящей статьи является сравнительный анализ барьерных свойств и герметичности упаковочных структур PA/PE и PET/EVOH/PE при хранении охлажденных мясных продуктов в модифицированной газовой среде, а также формулирование практических критериев выбора упаковки в зависимости от условий хранения и требуемого срока годности.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено как обзорно-аналитическая работа, основанная на сравнении опубликованных экспериментальных и обзорных данных по двум типовым многослойным упаковочным системам: PA/PE и PET/EVOH/PE. В качестве основных критериев сопоставления выбраны кислородный барьер, герметичность готовой упаковки, технологическая устойчивость после формования и влияние на сохранение качества охлажденного мяса в MAP.

При анализе барьерных свойств учитывались публикации, в которых рассматривались значения oxygen transmission rate для термоформуемых материалов и лотков, а также влияние глубины вытяжки и перераспределения толщины на итоговую газопроницаемость [1, 2]. Для интерпретации роли упаковки в сохранении качества мяса использовались работы по MAP мясной продукции, в которых анализировались изменения цвета, микробиологического статуса и устойчивости к окислению в зависимости от состава газовой среды и свойств упаковочного материала [3, 5].

Под герметичностью в настоящей работе понимается способность готовой упаковки сохранять замкнутость системы без утечки газовой смеси через шов, зону запайки или локальные дефекты материала. Данный параметр интерпретировался отдельно от барьерности стенки упаковки, поскольку даже герметично запаянная тара может иметь различную скорость диффузионного газообмена через стенки. Такое методологическое разведение понятий позволяет

более корректно сравнивать упаковки PA/PE и PET/EVOH/PE для задач хранения мяса в MAP.

Результаты исследования и их обсуждение

С точки зрения кислородного барьера различие между PA/PE и PET/EVOH/PE является принципиальным. Полиамид обеспечивает более высокий газовый барьер по сравнению с полиэтиленом, однако не относится к классу сверхбарьерных материалов. В то же время EVOH является одним из наиболее эффективных полимеров для ограничения транспорта кислорода и широко используется именно в тех случаях, когда необходимо длительное сохранение модифицированной атмосферы. Исследования термоформованных многослойных листов показали, что структуры APET/PE/EVOH/PE и аналогичные им EVOH-содержащие материалы имеют значительно более низкие значения OTR по сравнению с PA/PE [1]. Следовательно, уже на уровне исходной структуры PET/EVOH/PE имеет преимущество как материал для упаковки продукции, чувствительной к кислороду.

Для охлажденного мяса это преимущество имеет прямое практическое значение. При повышенном поступлении кислорода через стенки упаковки снижается стабильность MAP, ускоряется окисление липидов, возрастает вероятность изменения цвета и быстрее исчерпывается ингибирующее действие углекислого газа. В обзорах по MAP мяса подчеркивается, что успех технологии определяется не только подбором состава газовой смеси, но и способностью упаковки поддерживать ее в течение хранения [3, 5]. Поэтому материал с более низким OTR обеспечивает не просто формально лучший барьер, а более предсказуемую динамику качественных показателей продукта.

Однако превосходство PET/EVOH/PE по барьерным свойствам не является абсолютно независимым от условий эксплуатации. Ключевая особенность EVOH состоит в его чувствительности к влажности. В условиях повышенной относительной влажности молекулы воды пластифицируют аморфные области

полимера, повышают подвижность цепей и приводят к росту проницаемости для кислорода. Для мясной упаковки это особенно важно, поскольку внутренняя атмосфера упаковки с охлажденным продуктом практически всегда влагонасыщена. Следовательно, реальная эффективность EVOH-слоя зависит от защиты его соседними слоями многослойной структуры и от того, насколько равномерно сохраняется его толщина в готовой упаковке [4].

Важное значение имеет и процесс термоформования. В ходе формования лотков толщина материала распределяется неравномерно: в углах, на переходах и в наиболее вытянутых зонах наблюдается локальное истончение. Это приводит к изменению реального OTR по сравнению с исходным плоским листом. Работы по исследованию термоформованных упаковок показали, что даже высокобарьерные структуры могут частично терять расчетный барьерный эффект после формования, если толщина барьерного слоя становится неоднородной [1, 2]. Тем не менее именно наличие EVOH в системе PET/EVOH/PE позволяет сохранить приемлемый запас по барьерности даже после частичной потери толщины, тогда как у PA/PE такой запас существенно меньше.

Если обратиться к герметичности, то обе рассматриваемые структуры имеют общую важную особенность: в качестве внутреннего слоя используется полиэтилен, обеспечивающий свариваемость и формирование герметичного шва. Это означает, что по способности к качественной запайке обе упаковки в промышленной практике могут демонстрировать высокий уровень герметичности при корректно выбранных режимах запечатывания. Однако герметичность как свойство шва не тождественна стабильности MAP. Упаковка может оставаться герметичной в смысле отсутствия утечки через шов, но различаться по скорости диффузии кислорода и углекислого газа через стенки. С этой точки зрения PET/EVOH/PE обладает преимуществом, поскольку сочетает надежную герметизацию за счет PE и высокий барьер за счет EVOH.

РА/РЕ, напротив, следует рассматривать как материал с удовлетворительным балансом между механической прочностью, свариваемостью и стоимостью, но с умеренным кислородным барьером. Для краткосрочного хранения охлажденного мяса, для логистических схем с быстрым оборотом продукции и для товаров, менее чувствительных к окислительным изменениям, такая структура может быть технологически и экономически оправданной. При этом для продукции, рассчитанной на более длительный срок хранения, на широкую розничную выкладку и на высокие требования к цветовой стабильности, преимущества РЕТ/ЕVОН/РЕ становятся более выраженными [3, 5].

Сравнение двух материалов особенно наглядно в логике «барьерность — герметичность — стабильность атмосферы — срок годности». Если структура обладает хорошей герметичностью, но недостаточным барьером, газовая смесь постепенно изменяется вследствие диффузии. Если же материал сочетает герметичность и высокий барьер, скорость изменения внутренней атмосферы снижается, а условия хранения становятся более стабильными. Для мясной продукции это означает более длительное сохранение потребительских характеристик и меньший риск преждевременной потери качества. Именно поэтому при сопоставлении РА/РЕ и РЕТ/ЕVОН/РЕ следует учитывать не один показатель, а целую систему функциональных свойств.

Авторская интерпретация позволяет рассматривать эффективность мясной упаковки в МАР через интегральную схему: $E = B + G + T + S$, где B — барьерный потенциал материала, G — герметичность готовой упаковки, T — технологическая устойчивость после формования, S — влияние на срок годности продукта. В рамках данной схемы РА/РЕ получает высокую оценку по герметичности и технологичности, но уступает по барьерности. РЕТ/ЕVОН/РЕ, напротив, характеризуется более высоким значением B и, как следствие, большим потенциалом по S . Такая схема важна тем, что она отделяет

герметичность шва от барьерных свойств стенки упаковки, что особенно значимо для корректной оценки MAP-решений.

Практическое значение результатов

Для мясоперерабатывающей промышленности выбор между PA/PE и PET/EVOH/PE должен определяться требуемой продолжительностью хранения, видом мясного продукта, глубиной формования упаковки и составом газовой смеси. Если продукция реализуется в короткий срок и не требует экстремально низкой кислородопроницаемости, применение PA/PE может быть достаточно рациональным. Такая упаковка обеспечивает хорошую механическую надежность и технологичность при сравнительно умеренной стоимости.

Если же упаковка предназначена для более длительного хранения охлажденного мяса, для логистических цепочек с повышенными рисками нарушения условий обращения или для продуктов, где критичны цвет, окислительная стабильность и воспроизводимость MAP, более оправданным становится применение PET/EVOH/PE. При этом при проектировании упаковки необходимо учитывать влажностную чувствительность EVOH и влияние термоформования на распределение толщины барьерного слоя. Иначе паспортные характеристики материала могут не полностью реализоваться в готовом изделии [1, 4].

Практически это означает, что разработка упаковки должна опираться не только на выбор материала как такового, но и на оценку конструкции лотка, глубины вытяжки, режима запайки и целевого срока годности продукта. Только такой комплексный подход обеспечивает корректный выбор упаковки для мяса в условиях MAP.

Заключение

Сравнительный анализ показал, что упаковочные структуры PA/PE и PET/EVOH/PE обладают различным функциональным потенциалом при хранении охлажденных мясных продуктов в модифицированной газовой среде.

РА/РЕ обеспечивает хорошую механическую прочность, надежную свариваемость и приемлемую герметичность, однако уступает РЕТ/ЕVОН/РЕ по кислородному барьеру и способности стабилизировать внутреннюю газовую среду при длительном хранении.

РЕТ/ЕVОН/РЕ благодаря наличию ЕVОН-слоя характеризуется существенно более высоким барьером к кислороду и потому является более предпочтительным решением для задач, связанных с увеличением срока годности, сохранением цвета и снижением окислительной нагрузки на охлажденное мясо. Вместе с тем эффективность этой структуры зависит от влажности и от сохранности барьерного слоя после термоформования, что необходимо учитывать при практическом выборе материала.

Таким образом, при оценке упаковки для мяса в МАР целесообразно рассматривать не только герметичность шва и не только паспортные барьерные свойства материала, а совокупность показателей, включающих кислородный барьер, герметичность, технологическую устойчивость и влияние на срок хранения. В рамках такой системы РЕТ/ЕVОН/РЕ следует считать более эффективным упаковочным решением для длительного хранения охлажденного мяса, тогда как РА/РЕ сохраняет значение как технологичный и экономически оправданный материал для менее жестких режимов хранения.

Таблица 1

Сравнительная характеристика упаковочных структур РА/РЕ и РЕТ/ЕVОН/РЕ для мяса в условиях МАР

Параметр	РА/РЕ	РЕТ/ЕVОН/РЕ
Кислородный барьер	Умеренный; достаточен для краткосрочного хранения и менее жестких требований к O ₂	Высокий; обеспечивает лучшую стабильность МАР и защиту от окисления
Герметичность шва	Высокая при корректной запайке за счет внутреннего РЕ-слоя	Высокая при корректной запайке за счет внутреннего РЕ-слоя
Устойчивость после формования	Хорошая механическая прочность, но меньший запас по барьеру после вытяжки	Барьер выше, но необходим контроль сохранности ЕVОН-слоя после формования

Чувствительность к влажности	Ниже по сравнению с EVOH-содержащими структурами	Выраженная чувствительность EVOH к высокой влажности
Предпочтительная область применения	Краткосрочное хранение, экономичные решения, умеренные требования к барьеру	Продленное хранение, розничная выкладка, повышенные требования к цвету и сроку годности

Список литературы

1. Buntinx M., Oliveira J., Araújo A. et al. Evaluation of the Thickness and Oxygen Transmission Rate before and after Thermoforming Mono- and Multi-layer Sheets into Trays with Variable Depth // *Polymers*. 2014. Vol. 6. No. 12. P. 3019–3043.
2. Enguix C., Martínez-Navarrete N., Carot J.M. et al. Oxygen transmission rate through thermoformed trays: Modeling and influence of thickness distribution // *Polymer Engineering & Science*. 2022.
3. Kandeepan G., Tahseen A. Modified Atmosphere Packaging (MAP) of Meat and Meat Products: A Review // *Journal of Packaging Technology and Research*. 2022. Vol. 6. P. 1–16.
4. Maes C., Luyten W., Herremans G. et al. Recent Updates on the Barrier Properties of Ethylene Vinyl Alcohol Copolymer (EVOH): A Review // *Polymer Reviews*. 2018. Vol. 58. No. 2. P. 209–246.
5. McMillin K.W. Modified Atmosphere Packaging // In: *Food Engineering Series*. 2020. P. 693–718.
6. Mengozzi A., Carullo D., Bot F. et al. Functional properties of food packaging solutions alternative to conventional multilayer systems // *Journal of Food Science and Technology*. 2025. Vol. 62. P. 483–491.