

УДК 621.798

**ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ, БАРЬЕРНЫХ И АКТИВНЫХ  
СВОЙСТВ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ****Кудряшова Валерия Сергеевна,**

студентка

E-mail: kudryashova\_val@list.ru

**Куренщиков Александр Владимирович,**кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии, стандартизации и  
сертификации, Национальный исследовательский Мордовский государственный  
университет имени Н. П. Огарёва, г. Саранск

E-mail: akur@inbox.ru

**Аннотация**

Статья посвящена исследованиям экологически чистых упаковочных материалов. Отмечается, что, несмотря на свою экологичность, упаковка должна обладать хорошими механическими и барьерными свойствами для выполнения своего прямого назначения. Приводится обзор результатов исследований механических, барьерных и активных свойств различных экологически чистых упаковочных материалов. В заключение делается вывод о необходимости продолжения исследований в этом направлении.

**Ключевые слова:** упаковка, механические свойства, барьерные свойства, активные свойства, экология, охрана окружающей среды.

**RESEARCH OF MECHANICAL, BARRIER AND ACTIVE PROPERTIES OF  
ENVIRONMENTALLY FRIENDLY PACKAGING MATERIALS****Valeria S. Kudryashova,**

student

E-mail: kudryashova\_val@list.ru

**Alexander V. Kurenshchikov**Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metrology,  
Standardization and Certification, National Research Mordovia State University named after N. P.  
Ogaryov, Saransk

E-mail: akur@inbox.ru

**ABSTRACT**

The article is devoted to research into environmentally friendly packaging materials. It is noted that, despite its environmental friendliness, packaging must have good mechanical and

barrier properties to fulfill its intended purpose. A review of research results on the mechanical, barrier and active properties of various environmentally friendly packaging materials is provided. In conclusion, it is concluded that it is necessary to continue research in this direction.

**Keywords:** packaging, mechanical properties, barrier properties, active properties, ecology, environmental protection.

Механические свойства биоразлагаемых материалов зависят от химического состава, архитектуры полимера, условий обработки, хранения и старения. Экологически чистые упаковочные материалы, как правило, имеют плохие механические свойства, когда используются только биоразлагаемые полимеры. Для повышения прочности и долговечности применяют пластификаторы, армирующие материалы и сшивку. Поскольку механические свойства изменяются в зависимости от относительной влажности и температуры, материалы тестируют в целевых условиях использования, то есть при температуре охлаждения или условиях окружающей среды. Обычно для оценки механических характеристик определяют предел прочности (МПа), удлинение при разрыве (%) и модуль Юнга (модуль упругости) (ГПа). Механические испытания включают испытания на растяжение, испытания на прокол и прочность на разрыв для пленок, а также испытания на прочность на сжатие, прочность на разрыв и трехточечный изгиб для термоформовочных материалов. Механическая прочность и долговечность являются важнейшими требованиями к экологически чистым («зеленым») упаковочным материалам.

Натуральные волокна, такие как койра, конопля, джут, рисовая шелуха, сизаль и жом, широко используются для армирования терморезистивных или термопластичных материалов как для повышения механической прочности, так и для использования отходов. Они предпочтительны из-за низкой плотности (1,25-1,50 г/см<sup>3</sup>), дешевизны, высокой доступности, биоразлагаемости и нетоксичности. Волокна растительного происхождения получают из семян, стеблей, листьев и плодов. Их вклад в механические свойства зависит от их состава, межфазной адгезии внутри матрицы, а также диаметра и длины волокна. Поскольку натуральные волокна гидрофильны, возникающая в результате этого плохая адгезия между волокнами и гидрофобными полимерами представляет собой проблему. Волокна бамбука, льна, кенафа, дерева и конопли могут быть включены в термопластичный полимер PLA (полилактид) для улучшения механических свойств [1]. Для получения более прочных «зеленых» материалов еще одним хорошо исследованным подходом является включение наночастиц в «зеленые» полимеры [2].

Наночастицы металлов и оксидов металлов, такие как наноразмерное серебро, оксид цинка или оксид титана, являются неорганическими примерами таких включений. Органические наночастицы, такие как липосомы, белковые кластеры, мицеллы и дендримеры нетоксичны, но относительно чувствительны к термической или нетермической обработке с высоким усилием сдвига. Наночастицы, наноглины и наноэмульсии обладают лучшей совместимостью, более высокой доступностью и более низкой стоимостью по сравнению с армирующими материалами макромасштаба [3].

Экономически эффективно получать желаемые свойства с использованием меньшего количества материала за счет использования наноразмерных армирующих частиц. Лигноцеллюлозные наноматериалы, такие как нанофибриллированная целлюлоза и нанокристаллическая целлюлоза, экологически безопасны и широко распространены. Нанокристаллическая целлюлоза имеет высокое соотношение сторон (70-100), прочность (предел прочности: 7500 МПа) и жесткость, что позволяет улучшить механические свойства полимерной матрицы при использовании в качестве нанонаполнителя [3]. Кроме того,

использование наночастиц лигноцеллюлозного происхождения из отходов в рецептурах упаковки снижает затраты энергии, а также использование других отходов.

Для интегрированной полимерной матрицы эффективным является сшивание полимерных цепей посредством ковалентных или нековалентных связей. Белки и углеводы особенно подходят для меж- и внутримолекулярного сшивания с использованием таких агентов, как формальдегид, глутаральдегид, полифенолы, бензоат натрия, лимонная кислота, борная кислота, хлорид кальция [4], при этом нужно отметить, что формальдегид не пригоден для применения в контакте с пищевыми продуктами. Сшиватели подбираются в зависимости от типа полимера. Сшивающий агент реагирует с функциональными группами как белков, так и углеводов, что приводит к повышению прочности на разрыв [5]. Однако из-за его цитотоксического потенциала при концентрациях выше 8 % более «зеленые» сшивающие агенты являются предпочтительными [6]. Когда токсичные сшивающие агенты заменяются природными агентами, такими как лимонная кислота или глюкоза, может потребоваться усиление реакции с помощью катализаторов (например, гипофосфита натрия) и/или нагревания [7]. Сшивка считается более безопасной, экономически выгодной и более эффективной, чем другие применения армирования [4]. Обычно по мере увеличения гибкости биоразлагаемого материала прочность на разрыв снижается. Например, процентное удлинение хрупких зеиновых пленок увеличилось с 3,34 % до 142,24 % за счет добавления катехинов (фенольных соединений, встречающихся в природе в чае), тогда как прочность на разрыв снизилась в десять раз [8].

Барьерные свойства упаковочных материалов для пищевых продуктов имеют решающее значение, если необходимы длительные сроки хранения. Требования к барьерности варьируются в зависимости от состава пищевого продукта, биохимических реакций, происходящих внутри пищевого продукта во время хранения, и предполагаемого использования материала в упаковке. Для пищевых продуктов с высоким содержанием липидов для предотвращения окисления липидов необходимы хорошие барьерные свойства для кислорода и ультрафиолетового излучения.

Скорость проникновения кислорода и паров воды являются двумя основными факторами, которые учитываются при разработке упаковки для определенного типа пищевых продуктов. Кроме того, в зависимости от вида пищевого продукта также могут иметь значение проницаемость других газов (углекислого газа или азота), маслостойкость и пропускание ультрафиолетового излучения [9]. Проницаемость кислорода важна для защиты свежих продуктов (фруктов и овощей, свежего мяса) и продуктов, чувствительных к окислению липидов (например, орехов, чипсов). Проницаемость обычно выражается как коэффициент кислородопроницаемости или скорость передачи кислорода. Потеря влаги приводит к ухудшению свойств пищевого продукта, поэтому способность к изоляции паров воды очень важна. Эта способность выражается как коэффициент паропроницаемости. Барьерные свойства изменяются в зависимости от температуры и относительной влажности. По мере повышения температуры проникающий агент приобретает более высокую энергию, и скорость передачи увеличивается. Также на молекулярном уровне структурные изменения полимера, связанные с температурой фазового перехода, влияют на скорость миграции веществ. Барьерные свойства полимера определяются, в том числе, и степенью кристалличности. Исследования показали, что барьерные свойства для кислорода у полисахаридов отлично обеспечиваются их упорядоченной и плотно упакованной структурой, однако они демонстрируют очень плохие барьерные свойства для водяного пара по причине гидрофильности. Материалы на основе крахмала особенно чувствительны к влаге [10].

Одной из стратегий улучшения барьерных свойств является производство многослойных пленок. Двухслойная пленка из изолята соевого белка (SPI) и полилактида (PLA) имеет проницаемость водяного пара в 40 раз ниже, чем одинарная пленка SPI, и в 26

раз меньшую проницаемость для кислорода, чем одинарная пленка PLA [11]. При производстве многослойной пленки PLA-пшеничная клейковина-PLA проницаемость пленки для кислорода и водяного пара была снижена на 2000 % и 20 % соответственно [12]. Как и в случае со способами механического улучшения, барьерные свойства упаковочных материалов также можно регулировать путем усиления наночастицами [13]. Эффективная дисперсия отслоенных нанотромбоцитов является ключевым фактором в обеспечении хорошего барьерного действия. Композитные пленки на основе изолята соевого белка были включены в состав сверхразветвленного полиэстера биологического происхождения и фенольного карданола. Предел прочности, удлинение и барьерные свойства пленок к УФ-излучению значительно возросли за счет увеличения внутренних полостей и сшивки [14].

«Зеленые» упаковочные материалы с активными свойствами могут продлить срок хранения пищевых продуктов, предотвращая микробную и химическую порчу. Таким образом, меньшие потери пищевых продуктов обеспечивают дополнительные экономические и социальные преимущества, вкуче с сокращением количества выбрасываемой упаковки по причине порчи содержимого.

В основном механизмы действия активных упаковочных материалов таковы: 1) высвобождение активных веществ (т.е. противомикробных ферментов, фенольных соединений); 2) удаление нежелательных компонентов (например, кислорода, этилена, влаги); 3) выделение консервирующих веществ (например, диоксида серы, диоксида углерода); 4) нанесение на поверхность пищевых продуктов антимикробного контактного материала (например, хитозана) [15].

Для этих активных решений поглотители и эмиттеры обычно применяются в форме пакетиков, подушечек или этикеток, которые также могут быть выполнены из экологически чистых материалов.

Антимикробная упаковка – это форма активной упаковки, предназначенная для подавления роста микробов на поверхности пищевых продуктов. Антимикробная упаковочная система изготавливается с использованием полимерной матрицы, содержащей противомикробный агент.

Антимикробные соединения могут быть включены в полимерные пленки и покрытия, адсорбированы на поверхности полимерных пленок или иммобилизованы на полимерах с помощью ионных или ковалентных связей [16]. Другой вариант – использование полимерных матриц, изготовленных из антимикробных полимеров (например, хитозана). Антимикробные упаковочные материалы способны сохранять устойчивую активность на поверхности пищевых продуктов за счет постепенного высвобождения или постоянного контакта противомикробных агентов по сравнению с прямым добавлением противомикробных препаратов в рецептуру пищевых продуктов [17]. Этот механизм антимикробных материалов имеет решающее значение, поскольку поверхность пищевых продуктов наиболее подвержена микробной порче.

Антиоксидантные упаковочные материалы предназначены для предотвращения окисления липидов, второй по значимости причины порчи пищевых продуктов после микробной порчи. Высвобождение антиоксидантов в упаковочную среду или удаление факторов окисления липидов (кислорода, активных форм кислорода, ионов металлов) являются двумя основными способами антиоксидантной упаковки [18]. Для пищевых продуктов применяются многочисленные биоразлагаемые активные упаковочные системы. Включение активных агентов в упаковочные материалы на основе экологически чистых полимеров может отрицательно повлиять на их механические и барьерные свойства, в зависимости от пластифицирующего эффекта и совместимости включенных агентов с полимерной матрицей [19].

В соответствии с принципом «зеленой упаковки» в экологически чистых активных упаковочных материалах используются нетоксичные и натуральные активные вещества.

Органические кислоты, бактериоцины, противомикробные ферменты, эфирные масла, природные фенольные соединения, антимикробные пептиды и специи являются примерами активных веществ со статусом GRAS (общепризнанно безопасно).

В заключение нужно сказать, что внедрение экологически чистых упаковочных технологий является не только желательным, но и фактически безальтернативным в современном мире. Экологически чистые упаковочные технологии основаны на использовании возобновляемых и биоразлагаемых материалов, что способствует сохранению природных ресурсов и снижению зависимости от нефтепродуктов и других ограниченных ресурсов. Экологически чистая упаковка способствует уменьшению загрязнения окружающей среды и сокращению объема отходов, стимулирует развитие инноваций и технологического прогресса в отрасли упаковки. Таким образом, развитие экологически чистых упаковочных технологий является необходимым шагом для сохранения окружающей среды, здоровья человека и ресурсов нашей планеты. Отсутствие альтернативы в этом вопросе свидетельствует о важности и необходимости продолжения исследований в этом направлении.

### Список литературы:

1. Nurul Fazita M. R., Jayaraman K., Bhattacharyya D., Mohamad Haafiz M. K., Saurabh C. K., Hazwan Hussin M., Abdul Khalil H. P. S. Green composites made of bamboo fabric and poly (lactic) acid for packaging applications-a review // *Materials*. 2016. Vol. 9. P. 435. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28773558/> (дата обращения: 19.05.2024).
2. Oymaci P., Altinkaya S. A. Improvement of barrier and mechanical properties of whey protein isolate based food packaging films by incorporation of zein nanoparticles as a novel bionanocomposite // *Food Hydrocolloids*. 2016. Vol. 54. P. 1-9. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.08.030> (дата обращения: 19.05.2024).
3. Moustafa H., Youssef A. M., Darwish N. A., Abou-Kandil A. I. Eco-friendly polymer composites for green packaging: Future vision and challenges // *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 172. P. 16-25. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.048> (дата обращения: 19.05.2024).
4. Garavand F., Rouhi M., Razavi S. H., Cacciotti I., Mohammadi R. Improving the integrity of natural biopolymer films used in food packaging by crosslinking approach: A review // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2017. Vol. 104. P. 687-707. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28652152/> (дата обращения: 19.05.2024).
5. Çay A., Miraftab M., Kumbasar E. P. A. Characterization and swelling performance of physically stabilized electrospun poly(vinyl alcohol)/chitosan nanofibres // *European Polymer Journal*. 2014. Vol. 61. P. 253-262. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.10.017> (дата обращения: 19.05.2024).
6. Reddy N., Reddy R., Jiang Q. Crosslinking biopolymers for biomedical applications // *Trends in Biotechnology*. 2015. Vol. 33. P. 362-369. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25887334/> (дата обращения: 19.05.2024).
7. Azeredo H. M. C., Waldron K. W. Crosslinking in polysaccharide and protein films and coatings for food contact-A review // *Trends in Food Science and Technology*. 2016. Vol. 52. P. 109-122. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2016.04.008> (дата обращения: 19.05.2024).

8. Arcan I., Yemenicioğlu A. Incorporating phenolic compounds opens a new perspective to use zein films as flexible bioactive packaging materials // *Food Research International*. 2011. Vol. 44. P. 550-556. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2010.11.034> (дата обращения: 19.05.2024).
9. Han J. H. A review of food packaging technologies and innovations // *Innovations in food packaging (Second Edition)*. 2014. P. 3-12. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-394601-0.00001-1> (дата обращения: 19.05.2024).
10. Han J. H., Seo G. H., Park I. M., Kim G. N., Lee D. S. Physical and mechanical properties of pea starch edible films containing beeswax emulsions // *Journal of Food Science*. 2006. Vol. 71. P. 290-296. URL: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6203918> (дата обращения: 19.05.2024).
11. Rhim J. W., Mohanty K. A., Singh S. P., Ng P. K. W. Preparation and properties of biodegradable multilayer films based on soy protein isolate and poly(lactide) // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2006. Vol. 45. P. 3059-3066. URL: <https://khu.elsevierpure.com/en/publications/preparation-and-properties-of-biodegradable-multilayer-films-base> (дата обращения: 19.05.2024).
12. Rocca-Smith J. R., Pasquarelli R., Lagorce-Tachon A., Rousseau J., Fontaine S., Aguié-Béghin V., Debeaufort F., Karbowiak T. Toward Sustainable PLA-Based Multilayer Complexes with Improved Barrier Properties // *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2019. Vol. 7. P. 3759-3771. URL: <https://hal.science/hal-02154605> (дата обращения: 19.05.2024).
13. Duncan T. V. Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: Barrier materials, antimicrobials and sensors // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2011. Vol. 363. Issue 1. P. 1-24. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21824625/> (дата обращения: 19.05.2024).
14. Gu W., Liu X., Li F., Shi S. Q., Xia C., Zhou W., Zhang D., Gong S., Li J. Tough, strong, and biodegradable composite film with excellent UV barrier performance comprising soy protein isolate, hyperbranched polyester, and cardanol derivative // *Green Chemistry*. 2019. Vol. 21. P. 3651-3665. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/gc/c9gc01081e> (дата обращения: 19.05.2024).
15. Yildirim S., Röcker B., Pettersen M. K., Nilsen-Nygaard J., Ayhan Z., Rutkaite R., Radusin T., Suminska P., Marcos B., Coma V. Active Packaging Applications for Food // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2018. Vol. 17. P. 165-199. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33350066/> (дата обращения: 19.05.2024).
16. Appendini P., Hotchkiss J. H. Review of antimicrobial food packaging // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2002. Vol. 3. Issue 2. P. 113-126. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S1466-8564\(02\)00012-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1466-8564(02)00012-7) (дата обращения: 19.05.2024).
17. Quintavalla S., Vicini L. Antimicrobial food packaging in meat industry // *Meat Science*. 2002. Vol. 62. P. 373-380. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22061613/> (дата обращения: 19.05.2024).
18. Gómez-Estaca J., Gavara R., Hernández-Muñoz P. Encapsulation of curcumin in electrosprayed gelatin microspheres enhances its bioaccessibility and widens its uses in

food applications // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2015. Vol. 29. P. 302-307. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2015.03.004> (дата обращения: 19.05.2024).

19. Carissimi M., Flôres S. H., Rech R. Effect of microalgae addition on active biodegradable starch film // *Algal Research*. 2018. Vol. 32. P. 201-209. URL: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.04.001> URL: (дата обращения: 19.05.2024).

### References:

1. Nurul Fazita M. R., Jayaraman K., Bhattacharyya D., Mohamad Haafiz M. K., Saurabh C. K., Hazwan Hussin M., Abdul Khalil H. P. S. Green composites made of bamboo fabric and poly (lactic) acid for packaging applications-a review // *Materials*. 2016. Vol. 9. P. 435. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28773558/> (access date: 05/19/2024).
2. Oymaci P., Altinkaya S. A. Improvement of barrier and mechanical properties of whey protein isolate based food packaging films by incorporation of zein nanoparticles as a novel bionanocomposite // *Food Hydrocolloids*. 2016. Vol. 54. P. 1-9. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.08.030> (access date: 05/19/2024).
3. Moustafa H., Youssef A. M., Darwish N. A., Abou-Kandil A. I. Eco-friendly polymer composites for green packaging: Future vision and challenges // *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 172. P. 16-25. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.048> (access date: 05/19/2024).
4. Garavand F., Rouhi M., Razavi S. H., Cacciotti I., Mohammadi R. Improving the integrity of natural biopolymer films used in food packaging by crosslinking approach: A review // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2017. Vol. 104. P. 687-707. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28652152/> (access date: 05/19/2024).
5. Çay A., Miraftab M., Kumbasar E. P. A. Characterization and swelling performance of physically stabilized electrospun poly(vinyl alcohol)/chitosan nanofibres // *European Polymer Journal*. 2014. Vol. 61. P. 253-262. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.10.017> (access date: 05/19/2024).
6. Reddy N., Reddy R., Jiang Q. Crosslinking biopolymers for biomedical applications // *Trends in Biotechnology*. 2015. Vol. 33. P. 362-369. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25887334/> (access date: 05/19/2024).
7. Azeredo H. M. C., Waldron K. W. Crosslinking in polysaccharide and protein films and coatings for food contact-A review // *Trends in Food Science and Technology*. 2016. Vol. 52. P. 109-122. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2016.04.008> (access date: 05/19/2024).
8. Arcan I., Yemencioğlu A. Incorporating phenolic compounds opens a new perspective to use zein films as flexible bioactive packaging materials // *Food Research International*. 2011. Vol. 44. P. 550-556. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2010.11.034> (access date: 05/19/2024).
9. Han J. H. A review of food packaging technologies and innovations // *Innovations in food packaging (Second Edition)*. 2014. P. 3-12. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-394601-0.00001-1> (access date: 05/19/2024).
10. Han J. H., Seo G. H., Park I. M., Kim G. N., Lee D. S. Physical and mechanical properties of pea starch edible films containing beeswax emulsions // *Journal of Food Science*. 2006. Vol.

71. P. 290-296. URL: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6203918> (access date: 05/19/2024).
11. Rhim J. W., Mohanty K. A., Singh S. P., Ng P. K. W. Preparation and properties of biodegradable multilayer films based on soy protein isolate and poly(lactide) // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2006. Vol. 45. P. 3059-3066. URL: <https://khu.elsevierpure.com/en/publications/preparation-and-properties-of-biodegradable-multilayer-films-base> (access date: 05/19/2024).
12. Rocca-Smith J. R., Pasquarelli R., Lagorce-Tachon A., Rousseau J., Fontaine S., Aguié-Béghin V., Debeaufort F., Karbowski T. Toward Sustainable PLA-Based Multilayer Complexes with Improved Barrier Properties // *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2019. Vol. 7. P. 3759-3771. URL: <https://hal.science/hal-02154605> (access date: 05/19/2024).
13. Duncan T. V. Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: Barrier materials, antimicrobials and sensors // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2011. Vol. 363. Issue 1. P. 1-24. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21824625/> (access date: 05/19/2024).
14. Gu W., Liu X., Li F., Shi S. Q., Xia C., Zhou W., Zhang D., Gong S., Li J. Tough, strong, and biodegradable composite film with excellent UV barrier performance comprising soy protein isolate, hyperbranched polyester, and cardanol derivative // *Green Chemistry*. 2019. Vol. 21. P. 3651-3665. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/gc/c9gc01081e> (access date: 05/19/2024).
15. Yildirim S., Röcker B., Pettersen M. K., Nilsen-Nygaard J., Ayhan Z., Rutkaite R., Radusin T., Suminska P., Marcos B., Coma V. Active Packaging Applications for Food // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2018. Vol. 17. P. 165-199. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33350066/> (access date: 05/19/2024).
16. Appendini P., Hotchkiss J. H. Review of antimicrobial food packaging // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2002. Vol. 3. Issue 2. P. 113-126. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S1466-8564\(02\)00012-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1466-8564(02)00012-7) (access date: 05/19/2024).
17. Quintavalla S., Vicini L. Antimicrobial food packaging in meat industry // *Meat Science*. 2002. Vol. 62. P. 373-380. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22061613/> (access date: 05/19/2024).
18. Gómez-Estaca J., Gavara R., Hernández-Muñoz P. Encapsulation of curcumin in electrosprayed gelatin microspheres enhances its bioaccessibility and widens its uses in food applications // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2015. Vol. 29. P. 302-307. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2015.03.004> (access date: 05/19/2024).
19. Carissimi M., Flôres S. H., Rech R. Effect of microalgae addition on active biodegradable starch film // *Algal Research*. 2018. Vol. 32. P. 201-209. URL: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.04.001> URL: (access date: 05/19/2024).