

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-498-505>

Поступила 24.09.2025

Поступила после рецензирования 11.11.2025

Принята в печать 14.11.2025

© Путилов В. Э., Непомнящий А. П., Причепа А. О., Белова Д. Д., Шарова Н. Ю., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

АНТИМИКРОБНЫЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ КАРТОФЕЛЬНОГО КРАХМАЛА С ДОБАВЛЕНИЕМ МОЛОЧНОЙ КИСЛОТЫ

Путилов В. Э.^{1,2*}, Непомнящий А. П.¹, Причепа А. О.¹, Белова Д. Д.¹, Шарова Н. Ю.^{1,2}¹Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок Санкт-Петербург, Россия²Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

биоразлагаемая пленка, картофельный крахмал, молочная кислота, антимикробная активность, кислородный барьер, паропроницаемость

Цель работы — получение и оценка свойств биоразлагаемых антимикробных пленок на основе картофельного крахмала, глицерина и молочной кислоты как функциональных добавок для пищевой упаковки. Пленки получали методом литья из раствора: 2% (масс./об.) дисперсию крахмала желатинизировали ($70 \pm 1^\circ\text{C}$, 30 мин), вводили глицерин (0,4%) и молочную кислоту (1,0%), дегазировали, разливали и сушили (60°C , 24 ч), затем кондиционировали (48 ч, $23 \pm 2^\circ\text{C}$). Измеряли толщину, механические и барьерные свойства, а также антимикробную активность (диск-диффузионный метод на питательной среде LB, тест-культуры *Escherichia coli* и *Bacillus subtilis*; положительный контроль — тетрациклин 30 мкг, отрицательный контроль — стерильный диск фильтровальной бумаги; сравнение со свободной молочной кислотой). Полученные пленки были оптически однородными, без макродефектов, толщиной 0,09–0,11 мм. Пленки продемонстрировали высокую прочность при растяжении $74,8 \pm 7,4$ МПа и относительном удлинении $23,7 \pm 4,6\%$ ($n = 10$). Скорость переноса водяного пара составила $1290,7 \pm 60,8 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}$, коэффициент паропроницаемости — $2,05 \times 10^{-4} \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1} \cdot \text{Па}^{-1}$ (относительная влажность воздуха 90%); при этом в сухих условиях (относительная влажность около 0%) фиксировалась крайне низкая газопроницаемость по O_2/CO_2 (ниже порога расчета стационарной проницаемости). При анализе антимикробной активности диско-диффузионным методом пленки формировали зоны ингибирования роста (*E. coli*: $10,67 \pm 1,53$ мм; *B. subtilis*: $10,67 \pm 0,58$ мм), сопоставимые со свободной молочной кислотой (соответственно $9,67 \pm 0,58$ и $12,00 \pm 1,00$ мм). Совокупность результатов подтверждает, что крахмальные пленки с молочной кислотой обладают высокими барьерными свойствами (в сухой фазе) и антимикробной активностью (при контакте с влажной поверхностью), что делает их перспективными для использования в качестве активной упаковки охлажденных мясных и молочных продуктов и как функциональный слой в многослойных пленках.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование подготовлено в рамках выполнения государственного задания FGUS-2022-0003 ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН.

Received 24.09.2025

Accepted in revised 11.11.2025

Accepted for publication 14.11.2025

© Putilov V. E., Nepomnyashiy A. P., Prichepa A. O., Belova D. D., Sharova N. Yu., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

ANTIMICROBIAL POTATO STARCH — BASED FILMS INCORPORATING LACTIC ACID

Vladislav E. Putilov^{1,2*}, Anatoliy P. Nepomnyashiy¹, Artem O. Prichepa¹, Daria D. Belova¹, Natalya Yu. Sharova^{1,2}¹All-Russian Research Institute of Food Additives, Saint Petersburg, Russia²ITMO University, Saint Petersburg, Russia

KEYWORDS:

biodegradable film, potato starch, lactic acid, antimicrobial activity, oxygen barrier, water vapor transmission rate

ABSTRACT

The aim of the work was to produce and assess properties of biodegradable antimicrobial films based on potato starch, glycerin and lactic acid as functional additives for food packaging. Films were produced by the casting method from the solution: 2% (w/v) starch dispersion was gelatinized ($70 \pm 1^\circ\text{C}$, 30 min), glycerin (0.4%) and lactic acid (1.0%) were added, the mixture was degassed, poured and dried (60°C , 24 h), and then conditioned (48 h, $23 \pm 2^\circ\text{C}$). Thickness, mechanical and barrier properties as well as the antimicrobial activity were measured. The antimicrobial activity was determined by the disc diffusion method on the LB nutrient medium with *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis* as test cultures, 30 μg tetracycline as a positive control and sterile filter paper disc as a negative control (comparison with free lactic acid). The films obtained were optically homogeneous, without macro defects, and had a thickness of 0.09–0.11 mm. Films demonstrated high tensile strength of 74.8 ± 7.4 MPa and elongation of $23.7 \pm 4.6\%$ ($n = 10$). Water vapor transmission rate was $1290.7 \pm 60.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}$, vapor permeability coefficient was $2.05 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ (90% relative humidity of air). With that, in dry conditions (relative humidity of about 0%), quite low gas permeability in terms of O_2/CO_2 was recorded (lower than the threshold of the calculation of the stationary permeability). Analysis of the antimicrobial activity by the disc diffusion method showed that the films formed inhibition zones (*E. coli*: 10.67 ± 1.53 mm; *B. subtilis*: 10.67 ± 0.58 mm) that were comparable with free lactic acid (9.67 ± 0.58 and 12.00 ± 1.00 mm, respectively). The combined results confirm that starch films with lactic acid have high barrier properties (in the dry phase) and antimicrobial activity (upon contact with the moist surface), which make them promising for using as active packaging for chilled meat and dairy products and as a functional layer in multi-layer films.

FUNDING: The article was published as part of the research topic No. FGUS-2022-0003 of the state assignment of the V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Путилов, В. Э., Непомнящий, А. П., Причепа, А. О., Белова, Д. Д., Шарова, Н. Ю. (2025). Антимикробные пленки на основе картофельного крахмала с добавлением молочной кислоты. *Пищевые системы*, 8(4), 498–505. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-498-505>

FOR CITATION: Putilov, V. E., Nepomnyashchii, A. P., Prichepa, A. O., Belova, D. D., Sharova, N. Yu. (2025). Antimicrobial potato starch — based films incorporating lactic acid. *Food Systems*, 8(4), 498–505. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-498-505>

1. Введение

Современное использование синтетических пластиковых материалов порождает серьезные экологические и экономические проблемы. Большинство традиционных пластиковых пленок и упаковок разлагаются очень медленно — на их разложение требуются десятки и сотни лет; загрязнение почв и водных систем, негативное влияние на флору, фауну и на здоровье человека [1–3]. Пластик, особенно одноразовый, часто оказывается в окружающей среде — на свалках, в почве, в водоемах; при этом он практически не разлагается, что ведет к его долговременному накоплению [4,5]. Фрагментация пластиковых материалов приводит к образованию микропластика, который способен сорбировать и переносить гидрофобные органические загрязнители и иные токсианты, а также вовлекаться в пищевые цепи [6,7]. Производство, транспортировка и утилизация (в том числе сжигание) пластика связаны с эмиссией CO₂ и других парниковых газов, а также с использованием невозобновляемых ресурсов; корректно организованная биodeградация и замещение полимеров более экологичными по жизненному циклу альтернативами способны снижать углеродный след [8,9].

Загрязнение окружающей среды пластиком вызывает значительные социально-экономические потери. По расчетам экспертов, загрязнение пластиком приводит к потерям, сопоставимым с 1–5 % от общей ценности морских экосистем, что оценивается в триллионы долларов США ежегодно [10]. Игнорировать ущерб экосистемам, здоровью и утрату рекреационных возможностей дороже, чем инвестировать в устойчивые альтернативы: экономические модели прогнозируют, что при сохранении текущих трендов потребления суммарный ущерб достигнет десятки триллионов долларов в ближайшие десятилетия [11]. На этом фоне отмечается устойчивая траектория роста рынка биоразлагаемых полимеров [12].

Биоразлагаемые пленки становятся все более важной альтернативой традиционным полимерным материалам благодаря сочетанию экологических, технологических и потребительских факторов. Биоразлагаемые полимеры включают как природные, так и синтетические классы; их общая черта — способность к разрушению под действием микроорганизмов или иных биотических/абиотических факторов [13]. К природным биополимерам относятся крахмал, целлюлоза, белки, хитин/хитозан и др.; они происходят из возобновляемых ресурсов и технологически доступны [14,15]. В области синтетических биоразлагаемых полимеров (полимолочная кислота, полигидроксикарбоксилаты и др.) активно создаются материалы, сочетающие механическую прочность, термостабильность и способность к биоразложению [16].

Биоразлагаемые пленки на основе крахмала являются перспективными: сырье возобновляемо, стоимость ниже, чем у многих синтетических биополимеров, а рецептура легко модифицируется пластификаторами и функциональными добавками [17]. Природный источник крахмала существенно влияет на морфологию гранул, соотношение амилозы и амилопектина и, как следствие, на свойства пленок [18]. Так, крахмал картофеля характеризуется более крупными гранулами и большей склонностью к поглощению воды, что может повышать гибкость, но усиливает чувствительность к влаге; сравнительный анализ пленок из кукурузного и картофельного крахмала (с оптимизацией глицерина и уксусной кислоты) показал лучшую гибкость, более высокую термостабильность и структурную целостность систем на основе картофельного крахмала [19].

Чтобы пленки на основе природных полимеров были применимы, необходимо минимизировать их естественные ограничения: хрупкость, низкую растяжимость, высокую чувствительность к влаге и ограниченные барьерные свойства. Для этого используют пластификаторы — вещества, вводимые в матрицу для изменения физико-механических и барьерных характеристик [20,21]. Глицерин — наиболее распространенный пластификатор для крахмальных пленок: он снижает хрупкость и увеличивает относительное удлинение при разрыве, но при избытке уменьшает прочность. Например, для крахмала *Maranta arundinacea* увеличение доли глицерина от 15 % до 45 % (от массы крахмала) снижало прочность от 9,34 до 1,95 МПа при росте относительного удлинения при разрыве с 2,41 до 57,33 % [22]; для систем на основе кукурузного крахмала при содержании 15 % крахмала и 30 % глицерина исследователи получали оптимальный баланс прочности и гибкости, тогда как дальнейшая пластификация приводила к снижению прочности [23].

Использование биоразлагаемых материалов в качестве упаковки в пищевой промышленности представляет особый интерес при наличии антимикробной активности, так как на фоне ее отсутствия может ускоряться порча и снижаться качество продуктов [24]. Для решения этой задачи в крахмальные пленки вводят антимикробные

агенты (органические кислоты, эфирные масла, соли металлов, поликатионы и др.) [25]. В обзорной статье по биоразлагаемым пленкам на основе крахмала, хитозана, альгината и их комбинаций показано, что растительные экстракты, пластификаторы, сшивающие агенты и нанонаполнители способны одновременно улучшать механические и гидрофильные характеристики и обеспечивать антимикробный эффект [26].

Эфирные масла широко изучены как антимикробные агенты в биополимерных пленках, но их летучесть, химическая нестабильность и выраженные органолептические эффекты осложняют воспроизводимость активности и промышленную применимость; часто требуется инкапсуляция [27,28]. На этом фоне органические кислоты предпочтительны как более стабильные и совместимые с пищевыми матрицами антимикробные агенты.

Молочная кислота — органическая кислота с доказанной антимикробной активностью, которая также может модифицировать физико-механические свойства крахмальных пленок [29]. В пленках на основе поливинилового спирта включение молочной кислоты обеспечивало подавление роста *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* и *Staphylococcus epidermidis* при сохранении барьерных характеристик [30]. Антимикробное действие молочной кислоты связано преимущественно с проникновением недиссоциированной формы в клетку и с последующим снижением внутриклеточного pH, что энергетически истощает клетку за счет работы протонных насосов [31]. Во многих случаях добавление молочной кислоты повышает гибкость пленок (частичный пластифицирующий эффект) при возможном снижении прочности на разрыв; также описано влияние на паро- и газоперенос и термическую стабильность [29,30].

Практическая значимость биоразлагаемых пленок с антимикробной активностью наиболее очевидна в сфере пищевой упаковки, где требуется не только экологичность, но и защита от микробной порчи. Пленки на основе картофельного крахмала с гвоздичным маслом снижали микробную обсемененность и замедляли окисление жиров при упаковке охлажденной свинины [32]. Картофельные крахмальные пленки с растительными экстрактами обеспечивали микробиологическую стабильность куриного филе в течение более чем недели хранения [33]. Для молочных продуктов съедобные покрытия на основе крахмала и хитозана с антимикробными экстрактами растений замедляли рост плесеней на поверхности сыров и улучшали окислительную стабильность [34].

Современные подходы к активной биоразлагаемой упаковке ориентированы на контролируемое высвобождение активных веществ — прежде всего диффузионно управляемое через матрицу или барьерный слой, причем накопление влаги внутри упаковки служит основным фактором, инициирующим запуск переноса и активации [35,36]. Для многослойных структур показано, что профиль высвобождения задается типом, толщиной и полярностью слоев; размещение активного слоя со стороны продукта позволяет локализовать эффект и продлить время действия при минимальных потерях летучих и низкомолекулярных добавок [35].

Несмотря на значительный прогресс в области съедобных и биоразлагаемых пленочных материалов, остаются нерешенными задачи обеспечения высокого кислородного барьера в сухой фазе, контролируемого переноса влаги и воспроизводимой антимикробной активности без использования летучих, нестабильных добавок [37–39]. Для крахмальных систем, особенно на основе картофельного крахмала с выраженной гидрофильностью, критично, чтобы антимикробное действие реализовывалось преимущественно на границе контакта упаковочного материала и продукта и запускалось контактом с влагой, не разрушая при этом барьер по O₂ [40]. Из этого следует, что молочная кислота — технологически привлекательная функциональная добавка: она совместима с пищевыми матрицами, обладает антимикробной активностью и способна управляемо высвобождаться в увлажненной среде [41].

Целью настоящей работы является получение и исследование свойств биоразлагаемых антимикробных пленок на основе картофельного крахмала с использованием глицерина и молочной кислоты в качестве функциональных добавок. В рамках исследования ставилась задача оценить физико-механические характеристики, барьерные свойства и антимикробную активность полученных материалов.

2. Объекты и методы

Картофельный крахмал (Sigma-Aldrich, США), глицерин (≥ 99,5 %), молочная кислота (водный раствор 80 %, Henan Jindan Lactic Acid Technology, Китай) использовались без дополнительной очистки. Для микробиологических испытаний применяли питательную среду

LB (Lysogeny broth) агаризованную (дрожжевой экстракт 5 г/л, пептон 10 г/л, NaCl 10 г/л, микробиологический агар 15 г/л), стерильный физиологический раствор, стандартные антибиотические диски тетрациклина (30 мкг, «Научно-исследовательский центр фармакотерапии») для положительного контроля антимикробной активности. Тест-штаммы *Escherichia coli* M-17-02 и *Bacillus subtilis* subsp. *subtilis* были получены из «Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов» (регистрационные номера в коллекции — В-8208 и В-9865 соответственно).

Пленки готовили методом литья из раствора [42,43], который является стандартным для крахмальных матриц с пластификаторами: суспензию крахмала в количестве 2 % (масс./об.) в воде нагревали до полной желатинизации при температуре $70 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 30 минут с перемешиванием, после чего вводили глицерин 20 % от массы крахмала и молочную кислоту 50 % от массы крахмала, дегазировали с помощью ультразвуковой ванны Sonorex Digital 10 P (BANDELIN, Германия). После введения молочной кислоты pH раствора измеряли с помощью калиброванного pH-метра HI2030-02 edge (Hanna Instruments, Италия) и фиксировали в пределах pH 3,2–3,8. Поддержание узкого диапазона pH необходимо для воспроизводимости реологии раствора и степени протекания кислот-индуцированных модификаций крахмальной матрицы на стадии желатинизации. Раствор разливали на ровную PTFE-подложку (200×150 мм) из расчета $0,7 \text{ мл/см}^2$ (что соответствует 210 мл на пластину площадью 300 см^2). Такой удельный объем соответствует распространенным режимам литья для крахмальных систем и обеспечивает итоговую толщину пленки порядка 0,10 мм. Пленки высушивали до постоянной массы в термостате IN30 (Memmert, Германия) при температуре $60 \pm 1^\circ\text{C}$ и $50 \pm 5\%$ относительной влажности воздуха в течение 24 часов. В настоящем исследовании было изготовлено 13 пленок S1–S13 одного состава (крахмал — 2 %, глицерин — 0,4 %, молочная кислота — 1 %). Пленки S1–S5 были использованы для определения толщины, пленки S6–S7 — для установления прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве. Образцы S8–S10 применялись для определения барьерных свойств, а пленки S11–S13 были использованы для установления антимикробной активности. Перед испытаниями пленки выдерживали не менее 48 ч при температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$ и $50 \pm 5\%$ относительной влажности воздуха.

Толщину пленок определяли при помощи электронного микрометра 101-01-2-П (Asimeto, Китай). За результат принимали среднеарифметическое значение десяти параллельных измерений.

Прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве пленки измеряли на универсальной испытательной машине МИМ. 1–1 (ООО «ГОСТ», Россия). Для проведения исследований из пленок вырезали образцы прямоугольной формы длиной 150 ± 1 мм и шириной $15,0 \pm 0,1$ мм. Подготовленные образцы закрепляли при помощи нижнего и верхнего зажимов, расстояние между которыми составляло 50 мм, перемещение подвижной траверсы осуществлялось при скорости 200 ± 20 мм/мин. За результат принимали среднее значение десяти параллельных испытаний, вычисленное с точностью до десятичного знака [44].

Газопроницаемость, скорость переноса водяного пара (СПВП, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$) пленки определяли гравиметрическим методом на приборе W3/031 (Labthink, Китай). Исследуемый образец диаметром 74 мм размещали между двумя резиновыми уплотнительными кольцами испытательной чаши, наполненной дистиллированной водой, и помещали в испытательную камеру. Испытания проводили при температуре $38 \pm 1^\circ\text{C}$ и относительной влажности $90 \pm 2\%$. СПВП рассчитывали путем вычисления разницы массы испытательных чаш с течением времени. За результат принимали среднее значение трех параллельных испытаний [45].

Газопроницаемость пленки определяли манометрическим методом на приборе VAC-V1 (Labthink, Китай). Прибор состоит из двух камер — верхней (высокого давления) и нижней (низкого давления), между которыми помещается исследуемый образец. Перед началом испытания давление в нижней камере равно нулю. При испытании в верхней камере путем подачи газа (кислорода, углекислого газа) создается постоянное входное давление. Газ проходит через образец и поступает в нижнюю камеру, заполняя ее. При этом считывается скорость проникновения газа через образец. Исследуемый образец пленки диаметром 97 мм размещали между двумя камерами. Скорость газопроницаемости определяли путем измерения объема газов (кислород, углекислый газ), проходящих через образец пленки в единицу времени при единичной разнице парциальных давлений. Испытания проводились при температуре $23 \pm 1^\circ\text{C}$ [46].

Антимикробные свойства пленок оценивали методом диффузии в агар на питательной среде LB [25,47]. Компоненты LB-среды раство-

ряли при перемешивании, pH доводили до $7,0 \pm 0,2$ (1 M NaOH/HCl), затем стерилизовали автоклавированием на автоклаве SJ-FW (SJ Clave, Южная Корея) при температуре 121°C в течение 15 мин. Питательную среду разливали по 20–25 мл на чашку диаметром 90 мм (толщина слоя около 4 мм). Из пленок вырезали круглые диски диаметром 6 мм и асептически переносили на поверхность питательной среды с тест-организмами в чашках Петри. Бактериальную суспензию готовили в стерильном физиологическом растворе, доводя оптическую плотность при длине волны 600 нм до $0,10 \pm 0,01$. Затем эту бактериальную суспензию переносили на агаризованную питательную среду в объеме 100 мкл и распределяли стерильным шпателем Дригальского. Положительный контроль — стандартный диск тетрациклина (30 мкг); отрицательный контроль — вырезанный из фильтровальной бумаги диск диаметром 6 мм, стерилизованный ультрафиолетом. Дополнительно оценивали диаметр зон ингибирования роста у 10 мкл 10 % молочной кислоты, нанесенных на диск фильтровальной бумаги диаметром 6 мм. Чашки Петри с культурой инкубировали в течение 24 часов в случае *E. coli* при температуре 37°C , а в случае *B. subtilis* — при 28°C . Диаметр зон ингибирования измеряли штангенциркулем марки ШЦ-I-150-0,1 (GRIFF, Россия). Испытание антимикробной активности проводили в трех независимых повторях.

Все микробиологические операции осуществлялись в асептических условиях с использованием ламинарного бокса II класса биологической безопасности типа SC2–6S1 (ESCO Streamline, Сингапур). Работа со штаммами проводилась по правилам 2-го уровня биологической безопасности.

Электронный микрометр 101-01-2-П (Asimeto, Китай) калибровали по мерам 0,100 и 0,500 мм; расширенная неопределенность измерения толщины не превышала $\pm 2\%$. Аналитические весы GR-200 (AND, Япония) (погрешность = 0,1 мг) проверяли по гилям класса F1 перед каждой серией. Для W3/031 проводили контрольную серию на эталонной пленке из полиэтилентерефалата (поставляется производителем прибора W3/031, Labthink) толщиной 50 ± 2 мкм. Паспортное значение СПВП при $38 \pm 1^\circ\text{C}$ и $90 \pm 2\%$ относительной влажности составляет $0,80 \pm 0,05 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. Полученное в работе значение — $0,82 \pm 0,03 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ ($n = 3$); относительное расхождение + 2,5 %, что не превышает допустимого отклонения $\pm 5\%$. Для VAC-V1 выполняли тест герметичности (падение давления < 0,1 кПа/10 мин). Все данные представлены как среднее значение $\pm$ стандартное отклонение. Для сравнения групп использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA), различия считались значимыми при $p < 0,05$.

3. Результаты и обсуждение

Полученные пленки после литья и сушки представляли собой непрерывные покрытия без видимых дефектов (трещин, пузырей, включений), что характерно для крахмальных матриц при полной желатинизации и наличии низкомолекулярного пластификатора. Подобная ровная структура согласуется с данными, полученными для крахмальных пленок, где при использовании глицерина формируются компактные, непористые поверхности, в отличие от непластифицированных образцов, склонных к дефектам [48,49]. Сводные данные по толщине, pH пленочного раствора, физико-механическим (прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве) и барьерным характеристикам (СПВП, газопроницаемость) представлены в Таблице 1.

Толщина пленок определялась в 10 точках на каждом образце; равномерность толщины важна, поскольку она напрямую влияет на интерпретацию механических и барьерных свойств. Для полимерных материалов на основе крахмала это подчеркнуто в литературе: неоднородность толщины значительно влияла бы на характеристики, что помешало бы оценить влияние состава пленки [50]. Толщина пленок образовала две статистические группы: образцы S2, S4 и S5 принадлежат одной статической группе, тогда как S1 и S3 принадлежат другой. При этом абсолютные различия невелики, укладываются в технологически ожидаемый разброс для литья пленок и, по-видимому, связаны с несущественными колебаниями распределения раствора по подложке и локальной кинетики испарения.

Равномерность толщины пленок критична для сопоставления как СПВП, так и предела прочности. При прочих равных СПВП масштабируется обратно пропорционально толщине, тогда как для прочности на разрыв влияние толщины выражается косвенно — через геометрию образца и локальные дефекты.

С точки зрения строения матрицы ожидаемым является воздействие глицерина как пластификатора: он конкурирует за водородные связи с гидроксильными группами крахмала, снижает плотность межмолекулярных контактов и температуру стеклования, увеличивая подвижность сегментов макромолекул. На уровне морфологии

Таблица 1. Толщина, pH раствора, физико-механические и барьерные свойства образцов S1-S10
Table 1. Thickness, pH of the solution, physico-mechanical and barrier properties of the samples S1-S10

Номер образца	Толщина, мм	pH	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	СПВП, г/м ² ·сут	Газопроницаемость пленки, см ³ /м ² ·сут·бар
S1	0,098±0,008 ^b	3,48±0,07 ^c	—	—	—	—
S2	0,114±0,017 ^a	3,50±0,08 ^c	—	—	—	—
S3	0,094±0,011 ^b	3,49±0,08 ^c	—	—	—	—
S4	0,107±0,012 ^a	3,52±0,09 ^c	—	—	—	—
S5	0,112±0,011 ^a	3,51±0,07 ^c	—	—	—	—
S6	—	3,47±0,08 ^c	74,8±7,4 ^d	23,7±4,6 ^e	—	—
S7	—	3,53±0,08 ^c	69,6±6,6 ^d	26,3±4,8 ^e	—	—
S8	—	3,50±0,09 ^c	—	—	1290,7±60,8 ^f	н/о
S9	—	3,52±0,09 ^c	—	—	1440,0±40,8 ^f	н/о
S10	—	3,49±0,08 ^c	—	—	1440,4±80,2 ^f	н/о

Примечание: данные приведены как среднее значение ± стандартное отклонение. Для толщины использовано $n = 10$ повторов; для pH — $n = 3$; для прочности при растяжении, относительного удлинения, СПВП и газопроницаемости — $n = 3$. В пределах каждого столбца разные надстрочные латинские буквы обозначают статистически значимые различия между средними.

это выражается в более однородной структуре без микротрещин и разрывов фаз, что неоднократно фиксировалось для различных источников крахмала [48,51].

Включение молочной кислоты также способно модифицировать структуру крахмальной матрицы на стадии желатинизации и последующего формирования пленки. Показано, что органические кислоты снижают температуру и эн탈пию желатинизации, уменьшают внутреннюю вязкость и жесткость гелей, а на уровне частиц могут вызывать дефекты гранул и частичную деструкцию в аморфных областях; при этом влияние молочной кислоты выражено сильнее, чем уксусной [52].

Совокупность морфологических признаков наших образцов — непрерывность, отсутствие макродефектов и однородность толщины — соответствует типичным свойствам пленок, приготовленных из картофельного крахмала, глицерина и молочной кислоты [29,48,50].

Физико-механические показатели пленок (прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве (Таблица 1)) находились на уровне, характерном для крахмальных композиций с глицерином. Между исследованными образцами S6 и S7 не выявлено статистически значимых различий по прочности и удлинению. Сочетание высокой прочности при умеренной пластичности указывает на плотную полимерную матрицу и в то же время на успешную пластификацию, позволяющую избежать хрупкого разрушения. В данном составе пленок массовое соотношение глицерина к крахмалу составляет около 20 %, а молочной кислоты к крахмалу — около 50 %; оба компонента способны конкурировать за водородные связи с гидроксильными группами крахмала, снижая плотность взаимодействий между цепями полимера и температуру стеклования, что повышает подвижность пленки и относительное удлинение при разрыве [29,48,49]. При этом полученная прочность остается высокой — вероятно, за счет плотной упаковки крахмальной матрицы при используемых режимах желатинизации и сушки, а также более упорядоченной структуры после формирования пленки. Это согласуется с наблюдаемой морфологией и литературными данными о влиянии условий литья и кондиционирования на механические показатели крахмальных пленок [42,43].

В других матрицах на основе крахмала физико-механические параметры соизмеримы. Так, например, в [22] исследователи достигли прочности 9,3 МПа и относительного удлинения при разрыве 57 % при использовании различных соотношений крахмала и глицерина. В случае кукурузного крахмала исследователи получали пленки с прочностью при растяжении 1,28, 0,86 и 0,54 МПа при относительном удлинении при разрыве от 12 % до 17 % [23]. Физико-механические параметры пленок в настоящем исследовании отличаются большей прочностью в сравнении с исследованиями [22,23]. Это указывает на более плотную сеть полимерных цепей при умеренной доле глицерина и одновременном присутствии молочной кислоты. Последняя может проявлять частичный пластифицирующий эффект [52], чем объясняется относительно высокое значение удлинения при разрыве. Важно подчеркнуть, что сопоставление абсолютных значений физико-механических параметров между исследованиями ограничено различиями в источнике крахмала (соотношение амилозы/амилопектина), во влажности образцов, в толщине и режимах кондиционирования, а также в параметрах испытаний (скорость растяжения, база захватов) [42–44]. Поддержание pH 3,4–3,6 после ввода молочной кислоты обеспечивало воспроизводи-

мую реологию и формирование однородной матрицы без макродефектов. Это проявлялось в стабильных значениях предела прочности и относительного удлинения при разрыве между партиями. Для антимикробных тестов узкий диапазон pH важен также потому, что он задает начальную активность недиссоциированной формы кислоты и, следовательно, раннюю кинетику формирования ингибирующей микросреды при контакте с влагой.

Полученные в результате гравиметрических испытаний показатели СПВП, представленные в Таблице 1, не имеют статистически значимых различий между образцами S8–S10, что говорит о сопоставимости и достоверности результатов. Для гидрофильных крахмальных пленок такие значения типичны: высокая сорбция влаги и пластизирующее действие воды в сочетании с полиолами увеличивают подвижность сегментов полимерных цепей, что приводит к росту паропроницаемости по мере увеличения влажности и доли пластификатора. Этот тренд широко описан в литературе для крахмальных систем: проницаемость по водяному пару возрастает с температурой, влажностью и содержанием пластификатора (глицерина), а также зависит от толщины и микроструктуры пленки [51,53]. Поэтому сравнение абсолютных величин возможно лишь при учете условий теста.

Испытания газопроницаемости по кислороду и диоксиду углерода, выполненные манометрическим методом на VAC–V1, показали крайне низкие скорости переноса: давление в нижней камере в течение длительного времени не достигало порогового уровня, необходимого для расчета стационарной проницаемости. Такой исход согласуется с тем, что при низкой влажности крахмальные пленки обычно обладают очень хорошим кислородным барьером благодаря плотной водородно-связанной сети и сравнительно высокому уровню упорядоченности, тогда как водяной пар проходит значительно легче из-за гидрофильности матрицы [46,51,54,55].

Полученный профиль барьерных свойств объясняется тем, что гидрофильная полисахаридная матрица и полиольная пластификация увеличивают паропроницаемость, особенно при высокой относительной влажности, но при этом обеспечивают низкую проницаемость для неполярных газов в сухих условиях [56,57]. Практически показатели барьерных свойств полученных пленок указывают на то, что рассматриваемые пленки целесообразно использовать там, где критична кислородная защита (мясные и молочные продукты, склонные к окислительной порче) при контролируемой влажности или в составе многослойных решений (например, с гидрофобным наружным слоем). Поскольку в увлажненной среде полиольная пластификация ускоряет диффузию низкомолекулярных компонентов [51,57], можно ожидать более интенсивное высвобождение молочной кислоты и рост зон ингибирования, что подтверждается ниже количественными данными.

На фотографиях чашек Петри (Рисунок 1) представлены зоны ингибирования роста *E. coli* и *B. subtilis* при диск-диффузионном методе на LB-агаре. Для обоих микроорганизмов вокруг тетрациклина наблюдаются отчетливые зоны задержки роста; диск, вырезанный из полученной пленки (образцов S11–S13), и свободная молочная кислота на фильтровальной бумаге также формируют подавляющие ореолы, тогда как отрицательный контроль зон ингибирования не дает.

Количественные результаты (Таблица 2) демонстрируют сопоставимые уровни антимикробной активности пленки и свободной молочной кислоты при ожидаемо большей зоне у тетрациклина.

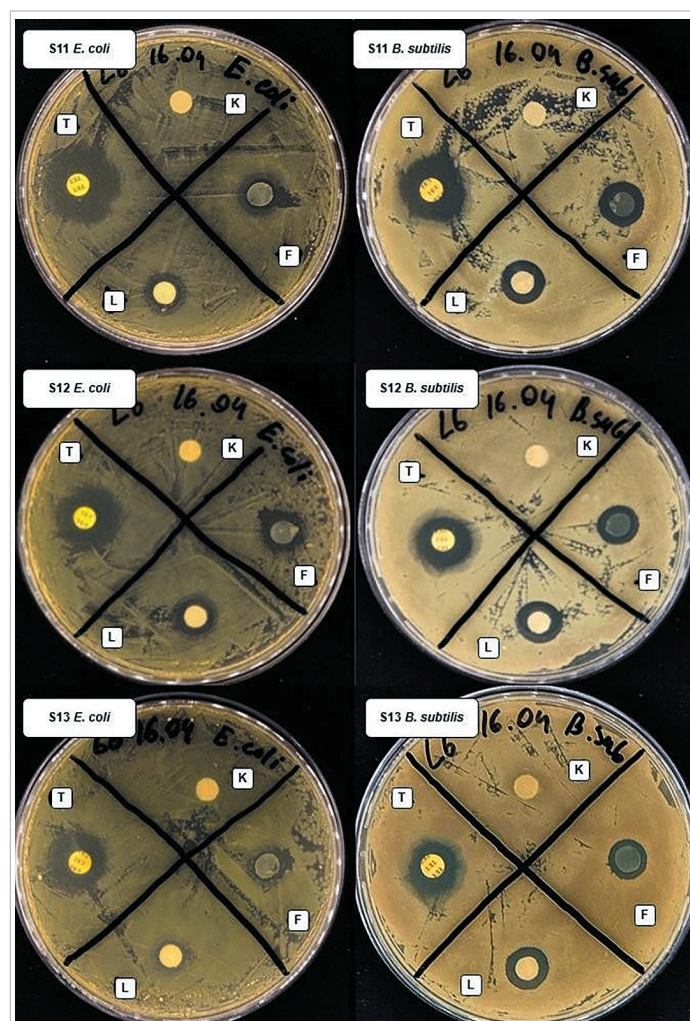


Рисунок 1. Зоны ингибирования роста *E. coli* и *B. subtilis* при диск-диффузионном методе определения антимикробной активности образцов пленок S11–S13.

T — тетрациклин (30 мкг); L — молочная кислота (10%, 10 мкл) на диске фильтровальной бумаги; K — контроль (диск фильтровальной бумаги); F — полученная пленка. Период инкубации 24 часа

Figure 1. Inhibition zones of the *E. coli* and *B. subtilis* growth determined by the disc diffusion method for assessing the antimicrobial activity of the film samples S11–S13. T — tetracycline (30 µg); L — lactic acid (10%, 10 µl) on the filter paper disc; K — control (filter paper disc); F — produced film. Incubation period — 24 hours

Отрицательный контроль зон ингибирования не образовывал. Согласно ANOVA, для *E. coli* и *B. subtilis* различия антимикробной активности полученной пленки и свободной молочной кислоты статистически не значимы, тогда как тетрациклин формировал достоверно большие зоны. Вероятно, механизм ингибирования молочной кислотой связан с природой слабых органических кислот: недиссоциированная форма проходит через мембрану, снижает внутриклеточный pH и нарушает метаболизм; при этом для грамотрицательных наблюдается дополнительный эффект пермеабилзации внешней мембраны, а у грамположительных — прямая кислотная стресс-реакция, что в совокупности приводит к подавлению роста обеих групп микроорганизмов [31].

То, что пленка демонстрирует зоны, сопоставимые со свободной молочной кислотой, указывает на эффективное высвобождение кислоты из матрицы и на поддержание локально кислой микросреды на границе пленки и агаризованной питательной среды. Аналогичные результаты отмечались и для других полимерных систем с молочной кислотой. Включение молочной кислоты в матрицу приводило к отчетливым зонам подавления *E. coli* и *Staphylococcus aureus*, что подтверждает сохранение активности молочной кислоты в составе пленки [30]. С практической точки зрения, это означает, что при поверхностной контаминации, характерной для охлажденных мяса, птицы или сыров, пленка способна обеспечить быстрый старт подавления микрофлоры без применения внешних консервантов [30,34].

Таблица 2. Диаметры зон ингибирования роста *E. coli* и *B. subtilis* на чашках при диск-диффузионном методе определения антимикробной активности образцов пленок S11–S13

Table 2. Diameters of the inhibition zones of the *E. coli* and *B. subtilis* growth on Petri dishes determined by the disc diffusion method for assessing the antimicrobial activity of the film samples S11–S13

Номер образца	Диаметр зоны ингибирования, мм		
	Молочная кислота	Полученная пленка	Тетрациклин
<i>Escherichia coli</i>			
S11	9,6±0,6 ^a	9,9±0,7 ^a	16,7±1,2 ^b
S12	9,8±0,7 ^a	10,4±0,8 ^a	16,2±1,0 ^b
S13	9,5±0,8 ^a	10,7±0,9 ^a	17,1±1,3 ^b
<i>Bacillus Subtilis</i>			
S11	12,1±0,8 ^a	11,4±0,7 ^a	15,6±0,9 ^b
S12	11,8±0,9 ^a	11,0±0,6 ^a	15,2±1,1 ^b
S13	12,3±0,7 ^a	10,9±0,8 ^a	15,1±1,0 ^b

Примечание: данные представлены как среднее значение±стандартное отклонение (n = 3). В пределах каждого блока (для каждой бактерии) одинаковые надстрочные буквы обозначают отсутствие статистически значимых различий (ANOVA; α = 0,05), разные — различия значимы.

В контексте физико-механических и барьерных свойств пленки наблюдаемая антимикробная активность согласуется с ее барьерно-диффузионным профилем: гидрофильная крахмальная матрица с полиольной пластификацией облегчает перенос влаги и низкомолекулярных соединений, что способствует высвобождению молочной кислоты и формированию зон ингибирования. Вместе с тем чрезмерная пластификация (за счет добавления большего количества молочной кислоты) потенциально снизила бы прочность пленки [56,57]. В целом, данные визуальны и количественно подтверждают, что введение молочной кислоты обеспечивает воспроизводимый антимикробный эффект в отношении как грамотрицательных, так и грамположительных тест-штаммов, а пленочная форма позволяет реализовать это действие без потери функциональности материала как упаковочного.

Пленки с расчетной толщиной 0,1 мм и прочностью 75 МПа совместимы с распространенными операциями: резкой, термосваркой с буферным слоем, ламинацией. В многослойных конструкциях разработанный слой целесообразно располагать со стороны продукта; наружный гидрофобный слой (полиолеиновая кислота или воск) выполняет влагобарьерную функцию и повышает механическую защиту.

Отдельно стоит отметить соответствие наблюдаемого профиля свойств предполагаемым областям применения. Зафиксированная в сухих условиях (относительная влажность воздуха примерно 0%) крайне низкая газопроницаемость по O₂/CO₂ при одновременной высокой СПВП при температуре 38 °C и 90% относительной влажности воздуха указывает, что полученные пленки могут быть наиболее эффективны в контролируемо-влажных упаковочных средах: при хранении охлажденных мясных и молочных продуктов в газовой фазе с пониженной влажностью или при использовании влагопитающих вкладышей сохранится кислородный барьер, тогда как при непосредственном контакте с увлажненной поверхностью запускается высвобождение молочной кислоты и реализуется антимикробный механизм.

Для мясного сырья, чувствительного к окислительной порче, сочетание кислородного барьера в газовой фазе и локально кислой микросреды на поверхности продукта потенциально устраняет две главные причины потери качества: окисление липидов и рост психротрофной микрофлоры. С учетом полученной прочности (75 МПа) и умеренной пластичности (относительное удлинение при разрыве 24%) пленки технологически пригодны для термических и механических операций при использовании в качестве упаковочного материала без риска разрушения. Их гидрофильная матрица в присутствии влаги ускоряет высвобождение кислоты, что согласуется с отмеченным в литературе ростом зон ингибирования при повышенной влажности полисахаридных пленок [51,57]. В испытаниях аналогичных активных биополимеров в условиях хранения при низких температурах (4 °C) сообщалось о снижении общей обсемененности и о замедлении окисления жиров у мясных систем. Полученные в настоящем исследовании результаты по диск-диффузионному тесту и барьерные характеристики указывают на функционально схожий механизм действия в реальных условиях хранения [58].

Для сыров и кисломолочных продуктов, где критична поверхностная контаминация плесенью и дрожжами, показанный кислотно-индуцированный антимикробный эффект, вероятно, усилится благодаря близкому к нейтральному pH субстрата и наличию свободной влаги на корке или срезе продукта. В этом случае барьерные свойства пленки на основе крахмала с низкой кислородной проницаемостью в сухой фазе и повышенной паропроницаемостью при высокой относительной влажности могут быть преимуществом благодаря сдерживанию окислительных процессов при одновременном подавлении поверхностной микрофлоры [34].

Ограничением для использования монослойной гидрофильной пленки остается влагобарьер при высокой влажности воздуха; на это прямо указывает измеренная СПВП. Для продуктов с требованием к стабильному уровню влаги (высокая активность воды и/или длительная логистика) целесообразен переход к многослойным пленкам, где разработанный активный слой выступает внутренним функциональным модулем, а внешний гидрофобный слой (например, полимолочная кислота) снижает влагоперенос. Такой подход позволит сохранить высокий кислородный барьер и антимикробную активность при минимизации сорбции воды; технологическая реализуемость и эффективность подобных материалов на основе крахмала и полимолочной кислоты многократно показана [56]. В случае полученных пленок механическая прочность базового слоя упрощает процесс упаковки без потери целостности, а гидрофильность внутреннего слоя обеспечивает доступность молочной кислоты при контакте с влажной поверхностью продукта.

Таким образом, сопоставление полученных количественных показателей с опубликованными примерами упаковок с антимикробной активностью демонстрирует сопоставимые результаты. Полученные зоны подавления роста *E. coli* и *B. subtilis*, а также низкая проницаемость для кислорода при относительной влажности воздуха около 0% соответствуют условиям, при которых для мясных и молочных продуктов отмечалось увеличение сроков хранения в холодильных условиях. Эти условия также приводили к снижению микробной обсемененности при контролируемой влажности и ограниченном доступе кислорода [30,58]. В совокупности результаты подтверждают практическую применимость разработанной системы: регулируемая влагой диффузия молочной кислоты и высокий кислородный барьер минимизируют основные риски порчи продуктов. Такая система может быть использована как однослойная пленка для продуктов с контролируемой влажностью или как часть многослойных влагозащитных пленок для упаковки других типов продуктов.

4. Выводы

В работе получены биоразлагаемые пленки на основе картофельного крахмала с добавлением глицерина и молочной кислоты методом литья из раствора. Сформированные покрытия были оптически однородными, без макродефектов. Толщина образцов распределилась на две статистические группы (S2/S4/S5 и S1/S3), при этом абсолютные различия незначительны и технологически ожидаемы для литья.

Пленки продемонстрировали сочетание высокой прочности и умеренной пластичности; для образцов S6–S7 ($74,8 \pm 7,4$ и $69,6 \pm 6,6$ МПа; $23,7 \pm 4,6$ и $26,3 \pm 4,8$ % соответственно) статистически значимых различий в прочности при растяжении и относительном удлинении не выявлено. В сравнении с известными для крахмальных систем свойствами такие значения указывают на плотную полимерную матрицу

при эффективной полиольной пластификации. Учитывая массовые соотношения компонентов (глицерин 20% от массы крахмала; молочная кислота 50% от массы крахмала), можно заключить, что пластифицирующее действие реализовано без критического снижения прочности, что согласуется с наблюдаемой морфологией и режимами желатинизации и сушки.

Барьерные испытания выявили характерный для гидрофильных полисахаридных пленок профиль: высокая скорость переноса водяного пара при температуре 38 °C и 90% относительной влажности ($1290,7\text{--}1440,4 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$) при одновременной крайне низкой проницаемости по O_2 и CO_2 в сухих условиях (манометрический метод не достиг порога для расчета стационарной проницаемости). Это подтверждает, что полученные материалы обладают сильным кислородным барьером при низкой влажности и ограниченной влагозащитой при повышенной влажности.

Антимикробные испытания продемонстрировали статистически сопоставимые зоны ингибирования для дисков из полученной пленки и для 10% молочной кислоты, тогда как тетрациклин формировал достоверно большие зоны ингибирования; отрицательный контроль зон ингибирования не давал. Различия между пленкой и свободной молочной кислотой статистически незначимы, что указывает на эффективное высвобождение кислоты из матрицы и сохранение ее активности в составе пленки.

Дополнительно отметим практическую применимость. Низкая проницаемость по O_2 в сухой фазе (относительная влажность 0%) при повышенной СПВП во влажной среде (относительная влажность 90%) делает пленки релевантными для полусухих или контролируемо-влажных условий хранения, а также в качестве внутреннего активного слоя в многослойных конструкциях с гидрофобным наружным слоем.

Ограничения исследования определяют направления последующих экспериментов: отсутствует карта газо-/влагопереноса при переменной влажности — ее получение позволит точно определить категории продуктов для упаковки полученными пленками; не изучена кинетика высвобождения и переноса молочной кислоты и ее остаточные уровни в пищевой матрице — необходимы испытания по миграции и сенсорике для целевых продуктов; антимикробная активность оценена на *E. coli* и *B. subtilis* в модельных условиях — для внедрения целесообразно расширить перечень (в т. ч. психротрофы, дрожжи/плесени) и провести исследования при низких температурах хранения (4 °C) *in situ*.

В прикладном плане наиболее перспективными являются следующие направления работы: многослойная валидация (дополнительный слой из полимолочной кислоты или воска) с размещением активного слоя к продукту; оптимизация состава (поверхностный отклик по соотношению глицерина к молочной кислоте и к массовой доле сухих веществ) под требуемый баланс прочности, эластичности, барьерных свойств и антимикробной активности; долговременная стабильность пленок (старение при 4 °C и 23 °C, циклы влажности) и масштабирование разлива (контроль pH/вязкости и равномерности толщины). При позитивных результатах необходимо оценить соответствие компостируемости.

Полученные данные подтверждают, что исследованные пленки могут служить микробиологически активным слоем для упаковки кислород-чувствительных продуктов при контролируемой влажности. Дальнейшая адаптация упаковочного материала на основе этих пленок к конкретным категориям (мясо/птица, сыры, свежие плоды) определяется уже не принципиальными ограничениями материала, а выбором архитектуры упаковки и режимов эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Santos, R. G., Machovsky-Capuska, G. E., Andrade, R. (2021). Plastic ingestion as an evolutionary trap: Toward a holistic understanding. *Science*, 373(6550), 56–60. <https://doi.org/10.1126/science.abh0945>
- van Grinsven, S., Schubert, C. (2023). Soil-biodegradable plastic films do not decompose in a lake sediment over 9 months of incubation. *Biogeosciences*, 20(19), 4213–4220. <https://doi.org/10.5194/bg-20-4213-2023>
- Campanale, C., Galafassi, S., Di Pippo, F., Pojar, I., Massarelli, C., Uricchio, V. F. (2024). A critical review of biodegradable plastic mulch films in agriculture: Definitions, scientific background and potential impacts. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 170, Article 117391. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117391>
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A. et al. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768–771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J. H. et al. (2020). Degradation rates of plastics in the environment. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(9), 3494–3511. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>
- Koelmans, A. A., Bakir, A., Burton, G. A., Janssen, C. R. (2016). Microplastic as a vector for chemicals in the aquatic environment: Critical review and model-supported reinterpretation of empirical studies. *Environmental Science and Technology*, 50(7), 3315–3326. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b06069>
- Bjedov, D., Velki, M., Toth, L., Marijić, V. F., Mikuška, T., Jurinović, L. et al. (2023). Heavy metal (loid) effect on multi-biomarker responses in apex predator: Novel assays in the monitoring of white stork nestlings. *Environmental Pollution*, 324, Article 121398. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121398>
- Xiong, L., Li, Z., Shah, F., Wang, P., Yuan, Q., Wu, W. (2024). Biodegradable mulch film enhances the environmental sustainability compared with traditional polyethylene film from multidimensional perspectives. *Chemical Engineering Journal*, 492, Article 152219. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152219>
- de Sadeleer, I., Woodhouse, A. (2024). Environmental impact of biodegradable and non-biodegradable agricultural mulch film: A case study for Nordic conditions. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 29(2), 275–290. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02253-y>

10. Nikiema, J., Asiedu, Z. (2022). A review of the cost and effectiveness of solutions to address plastic pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(17), 24547–24573. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18038-5>
11. Cordier, M., Uehara, T., Jorgensen, B., Baztan, J. (2024). Reducing plastic production: Economic loss or environmental gain? *Cambridge Prisms: Plastics*, 2, Article e2. <https://doi.org/10.1017/plc.2024.3>
12. Döhler, N., Wellenreuther, C., Wolf, A. (2022). Market dynamics of biodegradable bio-based plastics: Projections and linkages to European policies. *EFB Bioeconomy Journal*, 2, Article 100028. <https://doi.org/10.1016/j.bioeco.2022.100028>
13. Vroman, I., Tighzert, L. (2009). Biodegradable polymers. *Materials*, 2(2), 307–344. <https://doi.org/10.3390/ma2020307>
14. Onyeaka, H., Obileke, K., Makaka, G., Nwoko, N. (2022). Current research and applications of starch-based biodegradable films for food packaging. *Polymers*, 14(6), Article 1126. <https://doi.org/10.3390/polym14061126>
15. Henning, F. G., Ito, V. C., Demiate, I. M., Lacerda, L. G. (2022). Non-conventional starches for biodegradable films: A review focussing on characterisation and recent applications in food packaging. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 4, Article 100157. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100157>
16. Mukherjee, C., Varghese, D., Krishna, J. S., Boominathan, T., Rakeshkumar, R., Dineshkumar, S. et al. (2023). Recent advances in biodegradable polymers—properties, applications and future prospects. *European Polymer Journal*, 192, Article 112068. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112068>
17. Thakur, R., Pristijono, P., Scarlett, C. J., Bowyer, M., Singh, S. P., Vuong, Q. V. (2019). Starch-based films: Major factors affecting their properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 132, 1079–1089. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.190>
18. Ramírez-Hernández, A., Aparicio-Saguilán, A., Reynoso-Meza, G., Carrillo-Ahumada, J. (2017). Multi-objective optimization of process conditions in the manufacturing of banana (*Musa paradisiaca* L.) starch/natural rubber films. *Carbohydrate Polymers*, 157, 1125–1133. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.10.083>
19. Pooja, N., Banik, S., Chakraborty, I., Sudeeksha, H. C., Mal, S. S., Srisungsitthisunti, P. et al. (2024). Comparative analysis of biopolymer films derived from corn and potato starch with insights into morphological, structural and thermal properties. *Discover Sustainability*, 5(1), Article 467. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00626-3>
20. Sirbu, E. E., Dinita, A., Tănase, M., Portoacă, A.-I., Bondarev, A., Enascuta, C.-E. et al. (2024). Influence of plasticizers concentration on thermal, mechanical, and physicochemical properties on starch films. *Processes*, 12(9), Article 2021. <https://doi.org/10.3390/pr12092021>
21. Wang, B., Yu, B., Yuan, C., Guo, L., Liu, P., Gao, W. et al. (2022). An overview on plasticized biodegradable corn starch-based films: The physicochemical properties and gelatinization process. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(10), 2569–2579. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1868971>
22. Tarique, J. S. M. S., Sapuan, S. M., Khalina, A. (2021). Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers. *Scientific Reports*, 11(1), Article 13900. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93094-y>
23. Nasir, N. N., Othman, S. A. (2021). The physical and mechanical properties of corn-based bioplastic films with different starch and glycerol content. *Journal of Physical Science*, 32(3), 89–100. <https://doi.org/10.21315/jps2021.32.3.7>
24. Ortega, F., Giannuzzi, L., Arce, V. B., García, M. A. (2017). Active composite starch films containing green synthesized silver nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 70, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.03.036>
25. Romainor, A. N., Chin, S. F., Lihan, S. (2022). Antimicrobial starch-based film for food packaging application. *Starch*, 74(3–4), Article 2100207. <https://doi.org/10.1002/star.202100207>
26. Wardein, S., Wacławek, S., Dudek, G. (2024). Improving antimicrobial properties of biopolymer-based films in food packaging: Key factors and their impact. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(23), Article 12580. <https://doi.org/10.3390/ijms252312580>
27. Pandey, V. K., Islam, R. U., Shams, R., Dar, A. H. (2022). A comprehensive review on the application of essential oils as bioactive compounds in Nano-emulsion based edible coatings of fruits and vegetables. *Applied Food Research*, 2(1), Article 100042. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100042>
28. Jackson-Davis, A., White, S., Kassama, L. S., Coleman, S., Shaw, A., Mendonca, A. et al. (2023). A review of regulatory standards and advances in essential oils as antimicrobials in foods. *Journal of Food Protection*, 86(2), Article 100025. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2022.100025>
29. Kaur, P., Alam, T., Singh, H., Jain, J., Singh, G., Broadway, A. A. (2023). Organic acids modified starch — CMC based biodegradable film: Antibacterial activity, morphological, structural, thermal, and crystalline properties. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 17(1), 241–257. <https://doi.org/10.22207/JPAM.17.1.14>
30. Madivoli, E. S., Kisato, J., Gichuki, J., Wangui, C. M., Kimani, P. K., Kareru, P. G. (2024). Antimicrobial and food barrier properties of polyvinyl alcohol–lactic acid food packaging films. *Food Science and Nutrition*, 12(9), 6563–6577. <https://doi.org/10.1002/fsn5.4291>
31. Wanda, S., Paulsen, P., Budai, M., Vali, S., Smulders, F. J. (2013). Incorporation of lactic acid as an antimicrobial agent in polyamide food-packaging films. *Archiv Für Lebensmittelhygiene*, 64(1), 8–14. <https://doi.org/10.2376/0003-925X-64-8>
32. Zhao, Z., Liu, H., Tang, J., He, B., Yu, H., Xu, X. et al. (2023). Pork preservation by antimicrobial films based on potato starch (PS) and polyvinyl alcohol (PVA) and incorporated with clove essential oil (CLO) Pickering emulsion. *Food Control*, 154, Article 109988. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109988>
33. Nikmanesh, A., Baghaei, H., Nafchi, A. M. (2023). Development and characterization of antioxidant and antibacterial films based on potato starch incorporating *Viola odorata* extract to improve the oxidative and microbiological quality of chicken fillets during refrigerated storage. *Foods*, 12(15), Article 2955. <https://doi.org/10.3390/foods12152955>
34. Mei, J., Guo, Q., Wu, Y., Li, Y. (2015). Evaluation of chitosan–starch–based edible coating to improve the shelf life of bod Ljong cheese. *Journal of Food Protection*, 78(7), 1327–1334. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-14-402>
35. Wang, Q., Chen, W., Zhu, W., McClements, D. J., Liu, X., Liu, F. (2022). A review of multilayer and composite films and coatings for active biodegradable packaging. *npj Science of Food*, 6(1), Article 18. <https://doi.org/10.1038/s41538-022-00132-8>
36. Carpena, M., Nuñez-Estevéz, B., Soria-López, A., García-Oliveira, P., Prieto, M. A. (2021). Essential oils and their application on active packaging systems: A review. *Resources*, 10(1), Article 7. <https://doi.org/10.3390/resources10010007>
37. Sharma, S., Barkauskaite, S., Jaiswal, A. K., Jaiswal, S. (2021). Essential oils as additives in active food packaging. *Food Chemistry*, 343, Article 128403. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128403>
38. Othman, S. H., Wane, B. M., Nordin, N., Noor Hasnan, N. Z., A. Talib, R., Karyadi, J. N. W. (2021). Physical, mechanical, and water vapor barrier properties of starch/cellulose nanofiber/thymol bionanocomposite films. *Polymers*, 13(23), Article 4060. <https://doi.org/10.3390/polym13234060>
39. Schmidt, V. C. R., Porto, L. M., Laurindo, J. B., Menegalli, F. C. (2013). Water vapor barrier and mechanical properties of starch films containing stearic acid. *Industrial Crops and Products*, 41, 227–234. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.04.038>
40. Petronilho, S., Oliveira, A., Domingues, M. R., Nunes, F. M., Coimbra, M. A., Gonçalves, I. (2021). Hydrophobic starch-based films using potato washing slurries and spent frying oil. *Foods*, 10(12), Article 2897. <https://doi.org/10.3390/foods10122897>
41. Hou, T., Ma, S., Wang, F., Wang, L. (2023). A comprehensive review of intelligent controlled release antimicrobial packaging in food preservation. *Food Science and Biotechnology*, 32(11), 1459–1478. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01344-8>
42. Bangar, S. P., Purewal, S. S., Trif, M., Maqsood, S., Kumar, M., Manjunatha, V. et al. (2021). Functionality and applicability of starch-based films: An eco-friendly approach. *Foods*, 10(9), Article 2181. <https://doi.org/10.3390/foods10092181>
43. Domene-López, D., García-Quesada, J. C., Martín-Gullón, I., Montalbán, M. G. (2019). Influence of starch composition and molecular weight on physicochemical properties of biodegradable films. *Polymers*, 11(7), Article 1084. <https://doi.org/10.3390/polym11071084>
44. ASTM D882–18 Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting. American Society for Testing and Material, 1995. <https://doi.org/10.1520/D0882-18>
45. ASTM E96/E96M-22a Standard test methods for gravimetric determination of water vapor transmission rate of materials. American Society for Testing and Materials, 2022. https://doi.org/10.1520/E0096_E0096M-22A
46. ASTM D1434–82(2015) e1 Standard test method for determining gas permeability characteristics of plastic film and sheeting. American Society for Testing and Materials, 2023. <https://doi.org/10.1520/D1434-82R15E01>
47. Balouiri, M., Sadiki, M., Ibensouda, S. K. (2016). Methods for *in vitro* evaluating antimicrobial activity: A review. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 6(2), 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2015.11.005>
48. Mali, S., Grossmann, M. V. E., García, M. A., Martino, M. N., Zaritzky, N. E. (2002). Microstructural characterization of yam starch films. *Carbohydrate Polymers*, 50(4), 379–386. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(02\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(02)00058-9)
49. Romero-Bastida, C. A., Bello-Pérez, L. A., García, M. A., Martino, M. N., Solorza-Feria, J., Zaritzky, N. E. (2005). Physicochemical and microstructural characterization of films prepared by thermal and cold gelatinization from non-conventional sources of starches. *Carbohydrate Polymers*, 60(2), 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.01.004>
50. Singh, G. P., Bangar, S. P., Yang, T., Trif, M., Kumar, V., Kumar, D. (2022). Effect on the properties of edible starch-based films by the incorporation of additives: A review. *Polymers*, 14(10), Article 1987. <https://doi.org/10.3390/polym14101987>
51. Basiak, E., Lenart, A., Debeaufort, F. (2018). How glycerol and water contents affect the structural and functional properties of starch-based edible films. *Polymers*, 10(4), Article 412. <https://doi.org/10.3390/polym10040412>
52. Majzoobi, M., Beparva, P. (2014). Effects of acetic acid and lactic acid on physicochemical characteristics of native and cross-linked wheat starches. *Food Chemistry*, 147, 312–317. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.148>
53. Bertuzzi, M. A., Vidaurre, E. F. C., Armada, M., Gottifredi, J. C. (2007). Water vapor permeability of edible starch based films. *Journal of Food Engineering*, 80(3), 972–978. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.07.016>
54. Santhosh, R., Ahmed, J., Thakur, R., Sarkar, P. (2024). Starch-based edible packaging: Rheological, thermal, mechanical, microstructural, and barrier properties — A Review. *Sustainable Food Technology*, 2(2), 307–330. <https://doi.org/10.1039/D3FB00211J>
55. ASTM D3985–17 Standard test method for oxygen gas transmission rate through plastic film and sheeting using a coulometric sensor. American Society for Testing and Materials, 2024. <https://doi.org/10.1520/D3985-17>
56. Muller, J., González-Martínez, C., Chiralt, A. (2017). Combination of poly (lactic) acid and starch for biodegradable food packaging. *Materials*, 10(8), Article 952. <https://doi.org/10.3390/ma10080952>
57. Sanyang, M. L., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Ishak, M. R., Sahari, J. (2016). Development and characterization of sugar palm starch and poly (lactic acid) bi-layer films. *Carbohydrate Polymers*, 146, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.03.051>
58. Hernández-Nolasco, Z., Ríos-Corripio, M. A., Hidalgo-Contreras, J. V., Castellano, P. H., Rubio-Rosas, E., Hernández-Cázares, A. S. (2024). Optimization of sodium alginate, taro starch and lactic acid based biodegradable films: Antimicrobial effect on a meat product. *LWT*, 192, Article 115718. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115718>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Путилов Владислав Эдуардович — лаборант-исследователь, Лаборатория биотехнологии и биоинженерии, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 191014, Россия, г. Санкт-Петербург, Литейный пр., 55. Магистр, факультет биотехнологии, Национальный исследовательский университет ИТМО 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9 E-mail: vladislav.e.putilov@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8138-4727 * автор для контактов	Vladislav E. Putilov, Research Assistant, Laboratory of Biotechnology and Bioengineering, All-Russian Research Institute of Food Additives 55, Liteiny pr., 191014, St. Petersburg, Russia Master's Student, Faculty of Biotechnology, ITMO University 9, Lomonosova Str., 191002, St. Petersburg, Russia E-mail: vladislav.e.putilov@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8138-4727 * corresponding author
Непомнящий Анатолий Павлович — научный сотрудник, Лаборатория биотехнологии и биоинженерии, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 191014, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: nepomnyashiy.95@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0088-2704	Anatoliy P. Nepomnyashchiy, Research Scientist, Laboratory of Biotechnology and Bioengineering, All-Russian Research Institute of Food Additives 55, Liteiny pr., 191014, St. Petersburg, Russia E-mail: nepomnyashiy.95@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0088-2704
Причепе Артем Олегович — младший научный сотрудник, Лаборатория биотехнологии и биоинженерии, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 191014, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: prichepa.a@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1037-5629	Artem O. Prichepa, Junior Research Scientist, Laboratory of Biotechnology and Bioengineering, All-Russian Research Institute of Food Additives 55, Liteiny pr., 191014, St. Petersburg, Russia E-mail: prichepa.a@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1037-5629
Белова Дарья Дмитриевна — старший научный сотрудник, Лаборатория биотехнологии и биоинженерии, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 191014, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 E-mail: antonina-daria@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0630-7658	Daria D. Belova, Senior Research Scientist, Laboratory of Biotechnology and Bioengineering, All-Russian Research Institute of Food Additives 55, Liteiny pr., 191014, St. Petersburg, Russia E-mail: antonina-daria@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0630-7658
Шарова Наталья Юрьевна — доктор технических наук, профессор РАН, заместитель директора по научной работе, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 190000, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 доцент практики, факультет биотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9 E-mail: natalya_sharova1@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4208-9299	Natalya Yu. Sharova, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Research, All-Russia Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia Docent of the Practice, Faculty of Biotechnology, ITMO University 9, Lomonosova Str., 191002, St. Petersburg, Russia E-mail: natalya_sharova1@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4208-9299
Критерии авторства	Contribution
Путилов В. Э. — проведение исследований, создание рисунков и таблиц, систематизация данных Непомнящий А. П. — проведение исследований, систематизация результатов Причепе А. О. — проведение информационных исследований Белова Д. Д. — систематизация результатов информационных данных, редактирование статьи Шарова Н. Ю. — систематизация результатов информационных данных, редактирование статьи	Putilov V. E. — conducting research, preparation of figures and tables, systematization of data Nepomnyashchiy A. P. — conducting research, systematization of results Prichepa A. O. — conducting information research Belova D. D. — systematization of informational data, editing of the manuscript Sharova N. Y. — systematization of informational data, editing of the manuscript
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.