



Научная статья

4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)

УДК 678.552.011.046:664.8.038

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.014

EDN: TQUDGG

СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПИЩЕВОЙ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ КРАХМАЛА С ДОБАВКОЙ ДИОКСИДА ТИТАНА

Татьяна Владленовна Крюк ¹, Евгений Николаевич Труш ²,
Оксана Сергеевна Попова ³, Сергей Владимирович Пильгук ⁴,
Наталья Александровна Романенко ⁵

^{1, 2, 5} Институт физико-органической химии и углехимии им. Л. М. Литвиненко, Донецк, Россия

³ Донецкий национальный университет экономики и торговли
имени Михаила Туган-Барановского, Донецк, Россия

⁴ Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия

¹ ktvl2010@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8538-5856>

² trush.chem@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-5545-9328>

³ omango@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0008-5406>

⁴ blago2@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-5313-0187>

⁵ nathaly_roman@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0703-0806>

Аннотация. Технология производства полимерных пленок традиционно включает экструзионную обработку. При этом при разработках новых пленочных материалов на основе крахмала, которые находятся на начальной стадии «проверки формулы», используют более простой способ полива раствора. Для того чтобы в дальнейшем лабораторный метод реализовался в крупномасштабное производство, необходимо обеспечить наличие у пленок определенного набора сорбционных, барьерных и механических характеристик. Показано, что наполнение пленкообразующего раствора, содержащего кукурузный крахмал, натрий карбоксиметилцеллюлозу, поливиниловый спирт (соотношение полимеров 70:17:13 мас./мас.), лимонную кислоту и глицерин, смесью пищевой добавки E171 (диоксид титана) с экстрактом эхинацеи пурпурной (*Echinacea purpurea* (L.) Moench) позволяет получить пленочные материалы, обладающие достаточным для упаковки пищевых продуктов уровнем потребительских свойств с использованием технологии полива. Для придания образцам однородности предложено включение в технологию их получения ультразвуковой обработки. Установлено, что использование ультразвуковой обработки пленкообразующей композиции сохраняет стабильность полимерной суспензии в течение всего процесса сушки поливочного раствора. При наполнении композита смесью E171 и экстракта эхинацеи в количестве 1 % и 5 % от массы полимеров соответственно паропроницаемость пленок снижается на 11 %, прочность при растяжении увеличивается на 11 %, значительно повышается антирадикальная активность и способность выдерживать действие УФ-излучения по сравнению с образцами без добавок. Предложена технологическая схема получения пленочных материалов.

Ключевые слова: пищевая упаковка, крахмал, карбоксиметилцеллюлоза, поливиниловый спирт, диоксид титана, экстракт эхинацеи пурпурной, пленочные материалы, ультразвуковая обработка, технология.

Благодарности: авторы выражают признательность с.н.с. ИСПМ РАН Гончарук Г.П. за измерение механических характеристик пленочных материалов, а также лаб.-иссл. ИНФОУ Малык Б.В. за анализ образцов методом сканирующей электронной микроскопии. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания ИНФОУ (FRES-2024-0001).

Для цитирования: Свойства и технология получения пищевой пленки на основе крахмала с добавкой диоксида титана / Т. В. Крюк [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 102–110. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.014. EDN: <https://elibrary.ru/TQUDGG>.

Original article

PROPERTIES AND TECHNOLOGY OF PRODUCING FOOD FILM BASED ON STARCH WITH ADDITIVE OF TITANIUM DIOXIDE

Tatiana V. Kryuk ¹, Eugene N. Trush ², Oksana S. Popova ³,
Sergey V. Pilhuk ⁴, Natalia A. Romanenko ⁵

^{1, 2, 5} L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry, Donetsk, Russia

³ Donetsk National University of Economics and Trade
named after Mikhail Tugan-Baranovsky, Donetsk, Russia

⁴ Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia

¹ ktvl2010@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8538-5856>

© Крюк Т. В., Труш Е. Н., Попова О. С., Пильгук С. В., Романенко Н. А., 2026

СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПИЩЕВОЙ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ КРАХМАЛА С ДОБАВКОЙ ДИОКСИДА ТИТАНА

² trush.chem@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-5545-9328>

³ omango@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0008-5406>

⁴ blago2@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-5313-0187>

⁵ nathaly_roman@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0703-0806>

Abstract. The technology of polymer film production traditionally includes extrusion processing. At the same time, when developing new film materials based on starch, which are at the initial stage of "formula testing", a simpler method of solution casting is used. In order for the laboratory method to be subsequently implemented in large-scale production, it is necessary to ensure that the films have a certain combination of sorption, barrier and mechanical properties. It is shown that loading a film-forming corn starch, sodium carboxymethylcellulose, polyvinyl alcohol (polymer ratio 70:17:13 wt/wt) solution, citric acid and glycerin with a mixture of food additive E171 (titanium dioxide) and an extract of purple coneflower (*Echinacea purpurea* (L.) Moench) makes it possible to obtain film materials with a level of consumer properties sufficient for packaging food products using the casting technology. In order to impart homogeneity to the samples, it is proposed to include ultrasonic treatment in the production technology. It has been established that the use of ultrasonic treatment of the film-forming composition maintains the stability of the polymer suspension during the entire drying process of the casting solution. When loading the composite with a mixture of E171 and echinacea extract in an amount of 1% and 5% of the polymer mass, respectively, the films vapor permeability decreases by 11%, tensile strength increases by 11%, antiradical activity and the ability to withstand UV radiation significantly increase compared to samples without additives. A process flow chart for producing film materials is presented.

Keywords: food packaging, starch, carboxymethyl cellulose, polyvinyl alcohol, titanium dioxide, purple coneflower extract, film materials, ultrasonic treatment, technology.

Acknowledgements: the author expresses gratitude to the s.r. of Enikolopov Institute of Synthetic Polymeric Materials Goncharuk G.P. for measuring the mechanical characteristics of film materials and also to the r.l.a. of L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry Malyk B.V. for the analysis of samples by scanning electron microscopy, the work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state task of the IPOCC (FRES-2024-0001).

For citation: Kryuk, T. V., Trush, E. N., Popova, O. S., Pilhuk, S. V. & Romanenko, N. A. (2026). Properties and technology of producing food film based on starch with the additive of titanium dioxide. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 102-110. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.014. EDN: <https://elibrary.ru/TQUDGG>.

ВВЕДЕНИЕ

Концепция минимизации воздействия человека на окружающую среду и сохранения природных ресурсов для будущих поколений, которая усилилась в последние годы, направляет бизнес к изменениям, которые заключаются, в частности, в производстве нового поколения биоразлагаемых материалов. К ним относятся пищевая упаковка (ПУ) в виде пленок на основе доступного, воспроизводимого и дешевого крахмала (Кр).

На сегодняшний день крахмальные пленочные материалы в большинстве случаев получают по двум технологиям, которые условно можно обозначить как «мокрые» (литье или полив) и «сухие» (экструзия) [1, 2].

В методе литья пленкообразующий раствор поливают на пластину (стеклянную, пластиковую или металлическую; толщина пленки контролируется по массе раствора) с последующим испарением растворителя путем выдержки при заданной температуре в течение определенного времени и при контролируемой относительной влажности воздуха. В случае получения крахмальных пленок по данной технологии необходимо включение стадии желатинизации полисахарида, или использование предварительно желатинизированного Кр.

Разновидностью метода является ленточное литье, в котором подложка представляет собой конвейерную ленту, непрерывно движущуюся с заданной скоростью. Одновременно с этим к ней подводится тепло (горячий воздух, УФ- или ИК-излучение). Преимущества процесса в том, что он позволяет контролировать толщину раствора с помощью регулируемого ограничителя и производить многослойные пленки путем полива нового раствора на уже готовую первую пленку [3].

В целом метод полива демонстрирует несомненные достоинства (простота, низкая стоимость, отсутствие остаточных напряжений, высокие оптические характеристики получаемой пленки, др.) и является подходящим для мелкомасштабного и/или непериодического производства материалов.

Процедура экструзии основана на термопластичной природе полимеров, Кр не является истинным термопластом, поэтому его обработка требует создания специальных условий. Главное из них – наличие пластификатора, повышающего подвижность полимерных цепей. Это позволяет крахмальным гранулам при нагревании более 90 °C и сдвиге расширяться с последующим разрушением, в результате Кр плавится и разжижается [4]. Однако высокая температура может ускорить желатинизацию Кр, привести к образованию амилозо-липидных комплексов [5], кристаллов с высокой устойчивостью к нагреванию и разложению [6]. Также негативно влияют повышенные скорость вращения шнека (ускоряется деградация Кр [7]) и влажность полимера (снижается вязкость и сокращается время пребывания Кр в полости экструдера, что уменьшает влияние воздействия сжимающих и сдвиговых нагрузок [8]).

В настоящее время активно проводятся исследования по разработке новых технологий получения пленочных материалов из Кр.

Авторами [9] предлагается использование реактивной экструзии, в ходе которой протекают химические или ферментативные реакции полимера, приводящие к его модификации путем прививки, сшивания, полимеризации или поликонденсации. Таким способом были получены пищевые пленки из смесей Кр с ацетатом целлюлозы [10] и полимолочной кислоты [11]. Однако реактивную экструзию невозможно точно регулировать, к тому же она не применима для медленно (более 15 мин) протекающих реакций [12].

Комбинация полива и экструзии позволила разработать пленки из кукурузного крахмала с высоким содержанием амилозы, характеризующиеся более высокими показателями прочности и эластичности и более низким – влагопоглощения [13].

Хороший эффект достигается при последовательном сочетании экструзии и ультразвуковой обработки (УЗО). При ультразвуковом воздействии на расплав,

образующийся при экструзионной обработке нативных крахмалов, наблюдается одновременное улучшение прочностных и деформационных показателей образцов [14]. Действие только УЗО также позволяет получать крахмальные пленки с повышенным уровнем механических свойств. Имеются данные, что УЗО гранул Кр [15] и пленкообразующего раствора [16] улучшает прочностные характеристики материалов. Авторы объясняют такой результат тем, что УЗО способствует разрыву макромолекул Кр и снижению их молекулярной массы, создавая поливочный раствор с низкой вязкостью, в результате в пленках отсутствуют поры и дефекты.

При действии УФ-облучения на крахмальные пленкообразующие растворы увеличивается удлинение при разрыве (ϵ_p), снижается гидрофильность, чувствительность к влаге, паропроницаемость (ПП) получаемых пленок, однако их УФ-защитные свойства ухудшаются по сравнению с контролем [17].

В целом анализ научной литературы показывает, что разработки в области пленочных материалов на основе Кр находятся на начальной стадии «проверки формулы», которая является основной для обеспечения следующего этапа исследований, направленного на крупномасштабное производство. Для того чтобы такое производство реализовалось, необходимо обеспечить пленкам определенный набор сорбционных, барьерных и механических свойств. Поскольку из нативного Кр невозможно получить материалы с эксплуатационными характеристиками, сравнимыми с пленками, изготовленными из синтетических полимеров, кроме того, свойства крахмальных пленок могут ухудшаться со временем [18], необходимо сосредоточить исследования на поиск добавок, нивелирующих недостатки Кр.

Цель настоящей работы – разработка технологии получения и изучение свойств пленочных материалов на основе кукурузного крахмала, натрий карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) и поливинилового спирта (ПВС), включающих добавки антиоксидантов (экстракт эхинацеи (ЭЭ)) и блокатора УФ-излучения (титана (IV) оксид).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования использовали: кукурузный крахмал, ГОСТ 32159-2013 (ПромАгроПак, Россия); КМЦ, $M_w = 90$ кДа, $DS = 0,7$ (USK Chemical, Турция); ПВС, ГОСТ 10779-78, динамическая вязкость 4 %-ного раствора 10 мПа·с, степень гидролиза 96,0 % (Невинномысский Азот, Россия); лимонную кислоту (ЛК), х.ч. (Цитробел, Россия); глицерин (Гл), ч.д.а. (Компонент-реактив, Россия); экстракт эхинацеи пурпурной *Echinacea purpurea* (L.) Moench (World-Way Biotech Inc., Китай); пищевую добавку Е171 (диоксид титана), средний размер частиц 0,2–0,3 мкм (Зеленые Линии, Россия); 2,2-дифенил-1-пикрилгидразил (ДФПГ), 98 %, (Sigma-Aldrich, США); этанол, 96 % (РФК, Россия). На всех этапах экспериментов использовалась дистиллированная вода.

Технология получения пленок включала желатинизацию Кр в воде (95 °С; 0,5 ч), смешение полученного вязкого однородного раствора с Гл, ЛК, раствором КМЦ, раствором ПВС (50 °С; 0,5 ч), охлаждение до комнатной температуры, введение добавок (при необходимости), УЗО (при необходимости), деаэрацию, полив смеси в полистирольные чашки Петри и высушивание (30 °С; 20 ч) при относительной влажности воздуха 85 %. УЗО поливочного раствора (21 кВт, 600 Вт) проводили в течение 15 мин с помощью ультразвукового генератора ИЛ100-6 (Инлаб, Россия); вибрационную головку ультразвуковой установки

непрерывно охлаждали до температуры 25 °С. В качестве добавок использовали ЭЭ, Е171 и их смесь. Количество добавок составляло в % от массы полимеров: 5 (ЭЭ), 1 (Е171).

Значения водорастворимости (ВР), ПП пленок определяли гравиметрическим методом [19, 20]. Толщину образцов (l) измеряли цифровым микрометром Mitutoyo 227-223 с точностью 0,001 мм (Mitutoyo Absolute, Япония); механические характеристики – предел прочности при растяжении (σ_p), разрывное удлинение, модуль Юнга (E_0) – на разрывной машине Autograph AGS-H (Shimadzu, Япония) при скорости растяжения 5 мм/мин, 25 °С (ширина образцов составляла 3 мм, длина рабочей части – 35 мм). Перед испытаниями пленки выдерживали в течение суток в эксикаторе при влажности 80 %. Электронно-микроскопические исследования пленочных материалов размером 1×1 см, покрытых слоем золота толщиной 10 нм, выполняли с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5300LV (Jeol, Япония). Спектры пленок, помещенных в рамки из АВС пластика размером 28×28 мм (внутренний размер кюветного отделения), регистрировали с помощью спектрофотометра Helios Gamma (Thermo Electron Corporation, США) в диапазоне $\lambda = 200$ –600 нм. Светопоглощение растворов измеряли на фотокolorиметре КФК-2МП (Загорский оптико-механический завод, Россия).

Антирадикальную активность (АРА) определяли следующим образом. Предварительно взвешенные образцы пленок массой 0,1 г выдерживали в течение суток в 5 мл 30 % раствора этилового спирта. 1 мл полученного экстракта добавляли в кювету толщиной 10 мм, содержащую 3,5 мл раствора ДФПГ* концентрацией $6 \cdot 10^{-5}$ моль/лв 96 %-ном этаноле. В течение 30 мин записывали изменение оптической плотности раствора ($\lambda = 540$ нм, раствор сравнения – 96 % этиловый спирт). АРА (в %) рассчитывали по формуле:

$$АРА = 1 - \frac{D}{D_0} \times 100,$$

где D и D_0 – оптическая плотность раствора ДФПГ* и исследуемого раствора через 30 мин реакции соответственно.

УФ-деградацию пленок проводили непрерывно в течение 14 суток в герметичной камере, оборудованной УФ лампой Vontech (Медхайтек, Россия). Характеристики УФ-излучения: мощность 21,3 Вт, световой поток 700 лм, освещенность 350 клк, $\lambda = 253,7$ нм.

Статистическую обработку всех полученных результатов осуществляли с помощью пакета программ Origin (версия Origin 2019b). Число экспериментов для статистической обработки составляло 3–5. Результаты представлены как «среднее значение $\pm$ стандартное отклонение», заданный уровень значимости – 95 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее нами было показано [21], что на основе смеси Кр/КМЦ/ПВС (массовое соотношение компонентов 70:17:13) с использованием технологии полива возможно получение пленочных материалов, обладающих приемлемым для ПУ уровнем потребительских свойств, в случае включения в композицию добавок ЛК (сшивающий агент) и ГЛ (пластификатор) в количестве 7 и 37,5 % от массы полимеров соответственно. Несмотря на низкую паропроницаемость и хорошие прочностные характеристики получаемых пленок (табл. 1), степень их гидрофильности достаточно высокая: при контакте с водой уже через непродолжительное время (0,5–1 ч) наблюдается потеря целостности образцов.

СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПИЩЕВОЙ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ КРАХМАЛА С ДОБАВКОЙ ДИОКСИДА ТИТАНА

Таблица 1 – Свойства пленочных материалов на основе Кр/КМЦ/ПВС

Table 1 – Properties of film materials based on S/CMC/PVA

Добавки в составе пленок	$\pm 0,01$, мм	ВР, %	ПП, г/(м ² ·сут)	σ_p , МПа	ε_p , %	E_0 , МПа	АРА, %
Без добавок	0,11	32 ± 2	49 ± 2	30 ± 3	5,9 ± 0,1	1765 ± 35	17,1 ± 0,7
ЭЭ	0,10	36 ± 2	68 ± 3	19 ± 2	27,1 ± 0,2	745 ± 15	69,0 ± 1,0
E171	0,09	24 ± 1	37 ± 2	20 ± 2	5,2 ± 0,1	1000 ± 20	2,4 ± 0,1
ЭЭ + E171	0,09	32 ± 2	43 ± 2	34 ± 3	4,7 ± 0,1	1430 ± 30	52,1 ± 1,0

Примечание

Образцы, содержащие E171, получены с применением УЗО

Для улучшения потребительских свойств пленочных материалов, а также для придания им дополнительных свойств в состав пленкообразующего раствора вводили растительный экстракт, богатый полифенолами (экстракт эхинацеи пурпурной) [22], и TiO₂, обладающий армирующим действием [23] и способный эффективно поглощать УФ-излучение [24], которое инициирует фотодеградацию белков и окисление жиров в пищевых продуктах.

Добавки вводили в полимерную композицию как индивидуально, так и в виде смеси. ЭЭ загружали в полностью сформированный охлажденный до ком-

натной температуры пленкообразующий раствор, перемешивали смесь еще 3 мин, после чего проводили деаэрацию, полив и сушку. Полученные пленки имели ровную матовую поверхность и практически не отличались от образцов, не содержащих ЭЭ (рис. 1, А, Б). При включении в полимерную композицию E171 (как индивидуально, так и в виде смеси с ЭЭ) поливочный раствор представлял собой нестабилизированную суспензию, в результате чего в сформированных пленках наблюдались агрегаты, сконцентрированные в основном в центральной части образца (рис. 1, В, Г).

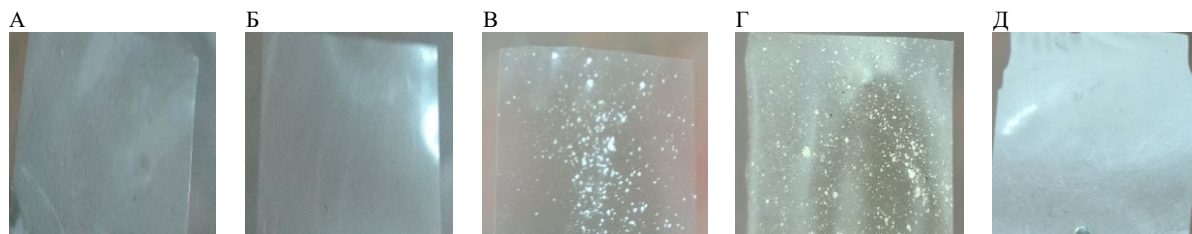


Рисунок 1 – Фотографии пленок на основе Кр/КМЦ/ПВС (А), наполненных ЭЭ (Б), E171 (В), смесью ЭЭ и E171 (Г, Д). Д – Образец состава Г, полученный с применением УЗО

Figure 1 – Photos of S/CMC/PVA films (A) loaded with EE (B), E171 (C), EE and E171 mixture (D, E).

E – Sample of composition D was obtained using ultrasonic treatment

Чтобы достичь равномерного распределения или избежать образования агрегатов E171, пленкообразующую композицию после смешения всех ее компонентов подвергли УЗО. Оптимальное время ультразвукового воздействия составило 15 мин: при данной длительности обработки и параметрах работы установки (21 кГц, 600 Вт) достигается образование устойчивой мелкодисперсной суспензии. Полученные по такой технологии пленки имели светло-желтое окраску, равномерную глянцевую поверхность без

агломератов в виде частиц неорганической добавки, разрывов и повреждений (рис. 1, Д), что свидетельствует о достижении хорошей гомогенизации композиции и сохранении ее стабильности в течение всего периода сушки.

Микроскопические исследования (СЭМ) показали, что при введении смеси E171 и ЭЭ морфология поверхности образца и базовой пленки подобны, при этом структура наполненного композита более мелкозерниста (рис. 2).

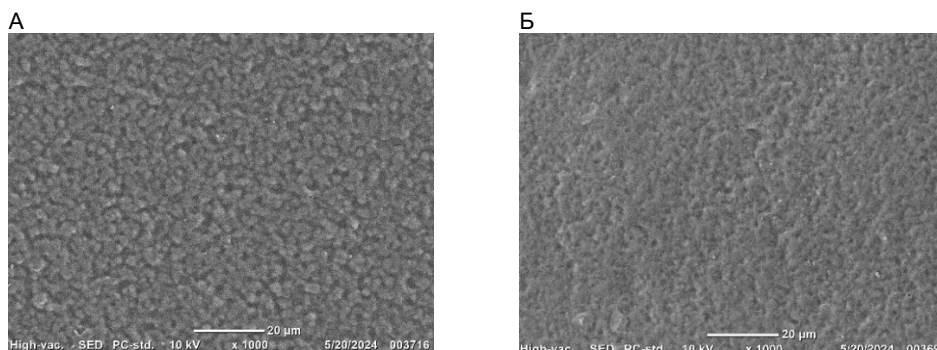


Рисунок 2 – Микрофотографии (СЭМ) пленок на основе Кр/КМЦ/ПВС (А), наполненных смесью ЭЭ и E171(Б)

Figure 2 – Micrographs (SEM) S/CMC/PVA films (A) loaded with EE and E171 mixture (B)

Далее изучали свойства пленочных материалов, содержащих ЭЭ, E171 и их смесь (образцы с

пищевой добавкой были получены с применением УЗО). Установлено, что введение наполнителей во

всех случаях приводит к некоторому уменьшению толщины пленок. Водорастворимость образцов при добавлении ЭЭ повышается, Е171 – снижается (табл. 1). Данные результаты хорошо согласуются с теоретическими представлениями о том, что ВР пленок на основе биополимеров обычно увеличивается после введения в них экстрактов, богатых высокогидрофильными полифенолами, которые могут легко взаимодействовать с молекулами воды, уменьшать взаимодействие полимерных цепей и вызывать растворение матрицы пленки в воде [25]. TiO_2 , напротив, снижает доступность гидроксильных групп Кр, взаимодействующих с водой, за счет образования большого количества водородных связей между полисахаридом и оксидом [26]. Можно предположить, что такой же характер взаимодействия реализуется между TiO_2 и ОН группами производного целлюлозы и ПВС. В присутствии смеси добавок ВР имеет одинаковый с базовой пленкой уровень значений (табл. 1).

Паропроницаемость образцов, содержащих ЭЭ, на 40 % превышает значение данного показателя для пленочных материалов, в состав которых входят только полимеры. Учитывая наличие во вводимой добавке полифенолов, полагаем, что эффект снижения барьерных свойств композитной пленки по отношению к водяному пару может быть обусловлен двумя причинами: увеличением количества свободных ОН групп в составе композиции и ослаблением межмолекулярного взаимодействия между полимерными цепями за счет внедрения между ними фенольных соединений экстракта.

Неорганический компонент, напротив, снижает паропроницаемость в 1,3 раза (табл. 1), что также соответствует имеющимся в литературе данным о влиянии нерастворимого в воде диоксида титана на структуру и свойства полисахаридной матрицы, а именно, блокирование доступных групп ОН крахмала и КМЦ за счет Н-связывания. В результате создается препятствие для диффузии молекул водяного пара, мигрирующих через пленку, что способствует уменьшению ПП [23].

ЭЭ оказывает пластифицирующий эффект, что проявляется в значительном увеличении ϵ_r (рис. 3). Наполнение полимерной смеси Е171 придает образцам жесткость, а сочетание фитоэкстракта и пищевой добавки позволяет получить достаточно прочные пленки (табл. 1).

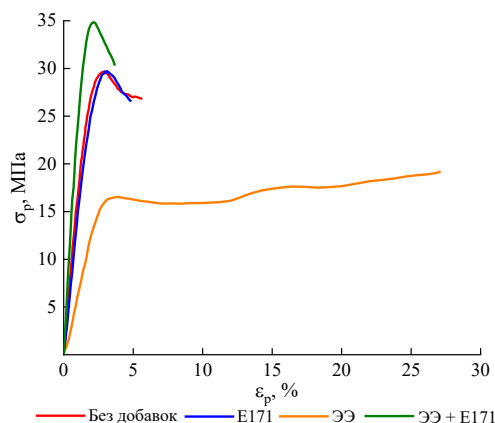


Рисунок 3 – Деформационные кривые растяжения пленочных материалов

Figure 3 – Stress-strain curves of film materials

Антиоксидантные свойства ПУ – важное ее достоинство, поскольку свободные радикалы оказывают

неблагоприятное воздействие на пищевые продукты. В случае упаковки их в антиоксидантно активную пленку ингибиторы окисления выделяются во внутреннюю часть упаковки, и это способствует как продлению срока хранения, так и сохранению качества продуктов [27].

Пленочные материалы, полученные из крахмала и поливинилового спирта, не обладают АРА [28], однако известно о слабых антирадикальных свойствах ЛК [29], TiO_2 [30] и сильных – ЭЭ [31]. Оценку АРА пленок проводили путем изучения реакции экстрагированных из них веществ со стабильным свободным радикалом ДФПГ[•].

Как видно из полученных кинетических кривых (рис. 4), базовая пленка, в которой присутствует остаточное количество несвязанной ЛК, обладает слабой АРА. Максимальный эффект инактивации ДФПГ[•], как и следовало ожидать, проявляется при его реакции с антиоксидантами, входящими в состав ЭЭ. У TiO_2 не выявлена способность поглощать ДФПГ[•], более того, его наличие в составе композита подавляет антиоксидантные свойства ЛК и ЭЭ (табл. 1).

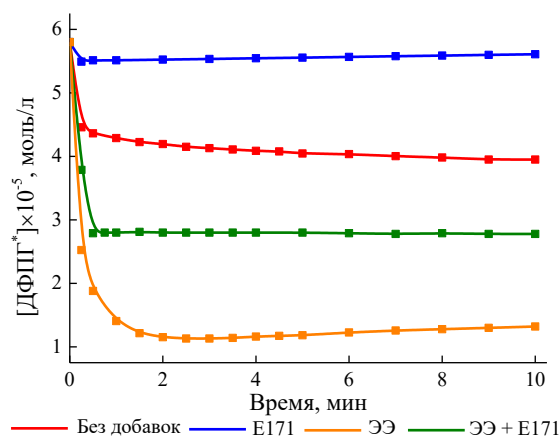


Рисунок 4 – Влияние добавок в составе пленок на кинетику реакции с ДФПГ[•]

Figure 4 – The influence of fillers in the films on the kinetics of the reaction with DPPH[•]

Под действием УФ-излучения пленочные материалы подвергаются деструкции, что проявляется в изменении их цвета (бесцветные образцы приобретают коричнево-желтую окраску) и характера поглощения в области 200–400 нм. Спектры образцов всех изучаемых составов до и после 14 суток непрерывного облучения представлены на рисунке 5. Как видно, на спектрах пленок без добавок появляется широкая полоса поглощения в области 250–390 нм. У образцов, содержащих ЭЭ, виден характерный пик полифенолов фитоэкстракта в диапазоне 255–300 нм, интенсивность которого заметно уменьшается в результате фотодегградации. TiO_2 , как и ожидалось, эффективно предотвращает фотостарение, и эта способность сохраняется также при включении его в композит в составе смеси с ЭЭ. Так, для пленок, наполненных только неорганическим наполнителем, в области 250–390 нм отмечается очень слабый максимум поглощения. В случае наличия в полимерной матрице смеси ЭЭ и Е171 после облучения на спектре сохраняется максимум, характерный для экстракта (250–300 нм), и отсутствует пик поглощения с максимумом при 300 нм, который отвечает дегградации композита Кр/КМЦ/ПВС.

Таким образом, диоксид титана выступает как

СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПИЩЕВОЙ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ КРАХМАЛА С ДОБАВКОЙ ДИОКСИДА ТИТАНА

фотостабилизирующий агент для растительного компонента. Результаты, полученные при изучении АРА и УФ-деградации пленок, наполненных смесью ЭЭ и E171, могут быть следствием сильного комплексообразования фенольных кислот фитоекстракта (хлорогеновой, кафтаровой, кофейной) с ионом Ti^{4+} [32].

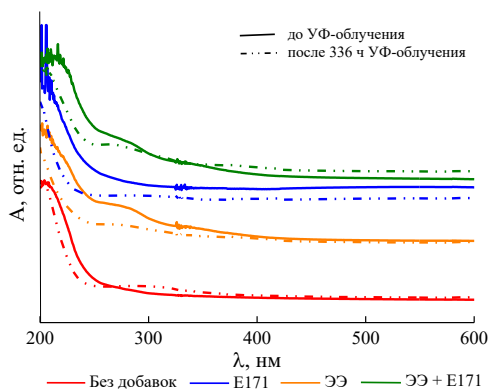


Рисунок 5 – Спектры поглощения пленок до и после УФ-облучения

Figure 5 – Absorption spectra of films before and after UV irradiation

Согласно ГОСТ Р 57432-2017 «Упаковка. Пленки из биоразлагаемого материала», базовый состав наших пленок позволяет отнести их по способу производства к типу 5 (получаемые в результате смешения биоразлагаемых полимерных материалов). Сопоставление свойств материалов требованиям, которые предъявляет к ним нормативный документ по показателям толщина (не более 0,5 мм), разрывная прочность (не менее 14 МПа), разрывное удлинение (не менее 5 %), паропроницаемость (не более 300 г/(м²·сут), восприимчивость к воде (умеренная). Сравнение перечисленных требований с данными, представленными в таблице 1, показывает, что только по показателю относительное удлинение при разрыве экспериментальные образцы не соответствуют требованиям ГОСТ. При этом отклонение величины ϵ_r от нормативного значения не велико и составляет всего 6 %.

Таким образом, в целом наши результаты позволяют говорить, что пленки на основе трехкомпонентной полимерной системы Кр/КМЦ/ПВС, содержащие дополнительно смесь ЭЭ и E171, технология получения которых включает стадию УЗО пленкообразующей композиции, могут представлять собой потенциальный биоразлагаемый упаковочный материал для пищевых продуктов. Установлено, что при депонировании пленок в грунт видимое начало разложения наблюдается уже через месяц экспозиции, за три месяца площадь образцов уменьшается на ~50 %.

Технологическая схема получения материала представлена на рисунке 6.

Из загрузочных емкостей с автоматическими весовыми дозаторами заданные количества ПВС, КМЦ, Кр поступают соответственно в смесители (1, 2, 3) с мешалкой и подогревом, туда же подает необходимое количество дистиллированной воды; нагрев и перемешивание включаются одновременно. Температура для Кр 85 °С, для КМЦ, ПВС – 70 °С; продолжительность перемешивания и частота вращения мешалки устанавливаются в зависимости от количества реагентов. В начале процесса перемешивания/нагрева в смеситель (2) дополнительно поступает ЛК, в смеситель (3) – Гл.

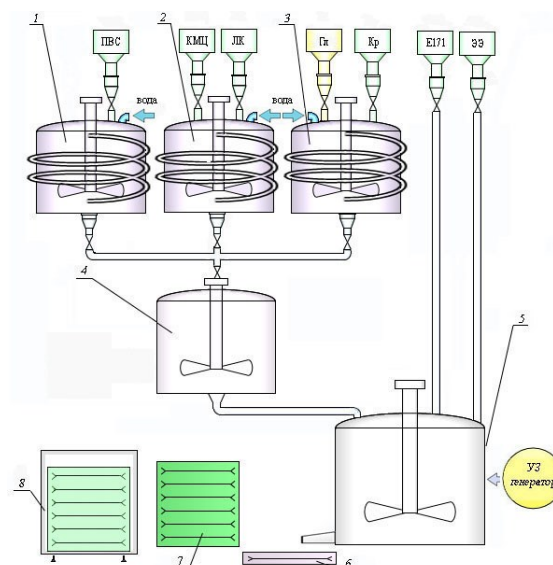


Рисунок 6 – Технологическая схема получения пленочных материалов

Figure 6 – Technological scheme of film materials production

После окончания процесса перемешивания/нагрева полученные растворы из смесителей (1–3) поступают в смеситель (4), где они перемешиваются в течение заданных времени и скорости при температуре 85 °С для получения поливочного раствора. В смесителе (5) раствор, полученный в смесителе (4), смешивается с ЭЭ и E171 с обработкой ультразвуком для получения однородной смеси. Рабочие параметры УЗО (частота, мощность, продолжительность) зависят от массы пленкообразующего раствора. Далее этот раствор с помощью дозатора наливается на полистирольную подложку (6), которая загружается на стеллаж (7). Такая схема налива пленкообразующего раствора реализуется последовательно для большого количества поддонов. Стеллаж с поддонами поступает в сушилку с конвекцией (8), где пленки формируются в течение 20–24 ч при температуре 30 °С и относительной влажности воздуха 85 %. Снятие полученных пленок с поддона обеспечивается путем их складирования в стопки и далее – обертки в один слой из полипропиленовой пленки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наполнение композита на основе кукурузного крахмала, КМЦ и ПВС смесью пищевой добавки E171 и экстракта эхинацеи пурпурной позволяет уменьшить его гидрофильность, улучшить механические свойства, придать антиоксидантную активность и УФ-барьерные свойства. Это позволяет рассматривать такие пленки, как перспективный упаковочный материал для пищевых продуктов. Равномерное распределение неорганического компонента в пленкообразующей композиции достигается в случае ее обработки ультразвуком. Представлена технологическая схема производства упаковочной пленки методом литья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Starch-based biodegradable plastics: methods of production, challenges and future perspective / L.V. Siqueira [et al.] // Current Opinion in Food Science. 2021. Vol. 38. P. 122–130. DOI: 10.1016/j.cofs.2020.10.020.

2. Impact of metal and metal oxide nanoparticles on functional and antimicrobial activity of starch nanocomposite film: A review / M. Navaf [et al.] // *Measurement: Food*. 2023. Vol. 11. 100099. DOI: 10.1016/j.meaf.2023.100099.
3. Conductive drying of starch-fiber films prepared by tape casting: Drying rates and film properties / J.O. de Moraes [et al.] // *LWT*. 2015. Vol. 64. P. 356–366. DOI: 10.1016/j.lwt.2015.05.038.
4. Influence of extrusion process conditions on starch film morphology / P. González-Seligrá [et al.] // *LWT*. 2017. Vol. 84. P. 520–528. DOI: 10.1016/j.lwt.2017.06.027.
5. Effects of extrusion on starch molecular degradation, order–disorder structural transition and digestibility – A review / X. Huang [et al.] // *Foods*. 2022. Vol. 11. № 16. 2538. DOI: 10.3390/foods11162538.
6. Enhancement of resistant starch content in modified rice flour using extrusion technology / B. Gulzar [et al.] // *Cereal Chemistry*. 2021. Vol. 98. № 3. P. 634–641. DOI: 10.1002/cche.10407.
7. Waramboi J.G., Gidley M.J., Sopade P.A. Influence of extrusion on expansion, functional and digestibility properties of whole sweetpotato flour // *LWT*. 2014. Vol. 59. № 2. P. 1136–1145. DOI: 10.1016/j.lwt.2014.06.016.
8. Jafari M., Koocheki A., Milani E. Effect of extrusion cooking on chemical structure, morphology, crystallinity and thermal properties of sorghum flour extrudates // *Journal of Cereal Science*. 2017. Vol. 75. P. 324–331. DOI: 10.1016/j.jcs.2017.05.005.
9. Advances in conversion of natural biopolymers: A reactive extrusion (REX)–enzyme-combined strategy for starch/protein-based food processing / E. Xu [et al.] // *Trends in Food Science and Technology*. 2020. Vol. 99. P. 167–180. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.02.018.
10. Herniou-Julien C., Mendieta J.R., Gutiérrez T.J. Characterization of biodegradable/non-compostable films made from cellulose acetate/corn starch blends processed under reactive extrusion conditions // *Food Hydrocolloids*. 2019. Vol. 89. P. 67–79. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2018.10.024.
11. In situ reactive compatibilization of polylactic acid (PLA) and thermoplastic starch (TPS) blends; synthesis and evaluation of extrusion blown films thereof / B. Palai [et al.] // *Industrial Crops and Products*. 2019. Vol. 141. № 11. 111748. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111748.
12. Starch-based biodegradable packaging materials: A review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry / H. Cheng [et al.] // *Trends in Food Science and Technology*. 2021. Vol. 114. P. 70–82. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.05.017.
13. Effect of extrusion process on the functional properties of high amylose corn starch edible films and its application in mango (*Mangifera indica* L.) cv. Tommy Atkins / T.A.A. Calderón-Castro [et al.] // *Journal of Food Science and Technology*. 2018. Vol. 55. № 3. P. 905–914. DOI: 10.1007/s13197-017-2997-6.
14. Разработка технологии получения биоразлагаемых композиций на основе полиэтилена, крахмала и моноглицеридов / И.Ю. Васильев [и др.] // *Тонкие химические технологии*. 2020. Т. 15. № 6. С. 44–55. DOI: 10.32362/2410-6593-2020-15-6-44-55.
15. Comparative study of the physical and tensile properties of jicama (*Pachyrhizus erosus*) starch film prepared using three different methods / H. Abrial [et al.] // *Starch–Starke*. 2019. Vol. 71. № 5–6. 1800224.
16. Способ получения биоразлагаемого композиционного материала на основе растительных биополимеров (варианты): пат. 2731695 Рос. Федерация № 2019139536; заявл. 03.12.2019; опубл. 08.09.2020, Бюл. № 25. 13 с.
17. Shahabi-Ghahfarrokhi I., Goudarzi V., Babaei-Ghazvini A. Production of starch based biopolymer by green photochemical reaction at different UV region as a food packaging material: Physicochemical characterization // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2018. Vol. 122. P. 201–209. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.10.15.
18. Starch-based films: Major factors affecting their properties / R. Thakur [et al.] // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019. Vol. 132. P. 79–89. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.03.190.
19. Light processable starch hydrogels / C. Noè [et al.] // *Polymers*. 2020. Vol. 12. № 6. P. 1359–1372. DOI: 10.3390/polym12061359.
20. ASTM E96/E96M–24a. Test methods for gravimetric determination of water vapor transmission rate of materials. West Conshohocken :ASTM, 2024. 6 p.
21. Разработка состава пленочных материалов на основе полисахаридов для пищевой упаковки / Т.В. Крюк [и др.] // *Пищевая промышленность: наука и технологии*. 2024. Т. 17. № 4. С. 67–75.
22. Antioxidant, antidiabetic, and antihypertensive properties of *Echinacea purpurea* flower extract and caffeic acid derivatives using in vitro models / C. Shioh-Ying [et al.] // *Journal of Medicinal Food*. 2017. Vol. 20. № 2. P. 171–179. DOI: 10.1089/jmf.2016.3790.
23. Modification of physicochemical and thermal properties of starch films by incorporation of TiO₂ nanoparticles / S.A. Oleyaei [et al.] // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2016. Vol. 89. P. 256–264. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2016.04.078.
24. Recent progress on titanium dioxide nanomaterials for photocatalytic applications / M. Nasr [et al.] // *Chem Sus Chem*. 2018. Vol. 11. № 18. P. 3023–3047. DOI: 10.1002/cssc.201800874.
25. Датчики цвета в «интеллектуальной упаковке» пищевых продуктов / Р.В. Крюк [и др.] // *Техника и технология пищевых производств*. 2022. Т. 52. № 2. С. 321–333. DOI: 10.21603/2074-9414-2022-2-2366.
26. Toughened and water-resistant starch/TiO₂ nanocomposites as an environment-friendly food packaging material / J. Xiong [et al.] // *Materials Research Express*. 2019. Vol. 6. № 5. 055045. DOI: 10.1088/2053-1591/ab058b.
27. Recent advances and applications in starch for intelligent active food packaging: a review / D. Liu [et al.] // *Foods*. 2022. Vol. 11. № 18. 2879. DOI: 10.3390/foods11182879.
28. Pineapple peel extract incorporated poly(vinyl alcohol)–corn starch film for active food packaging: preparation, characterization and antioxidant activity / P. Kumar [et al.] // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021. Vol. 187. P. 223–231. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2021.07.136.
29. Gromovaya V.F., Shapoval G.S., Mironyuk I.E. Antiradical and antioxidant activity of biologically active carboxylic acids // *Russian Journal of General Chemistry*. 2002. Vol. 72. № 5. P. 774–777. DOI: 10.1023/A:1019520621409.
30. Evaluation of the specific migration according to EU standards of titanium from chitosan/metal complexes films containing TiO₂ particles into different food simulants. A comparative study of the nano-sized vs micro-sized particles / D. Enescu [et al.] // *Food Packaging and*

СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПИЩЕВОЙ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ КРАХМАЛА С ДОБАВКОЙ ДИОКСИДА ТИТАНА

Shelf Life. 2020. Vol. 26. 100579. DOI: 10.1016/j.fpsl.2020.100579.

31. Evaluating the antioxidant activity of ethanol extract from *Echinacea purpurea* (L.) Moench / A.P. Firzani [et al.] // Indonesian Journal of Biotechnology and Biodiversity. 2022. Vol. 6. № 2. P. 39–44. DOI: 10.47007/ijobb.v6i2.132.

32. Photochemically inert broad-spectrum sunscreen by metal-phenolic network coatings of titanium oxide nanoparticles / S. Choi [et al.] // ACS Applied Materials & Interfaces. 2024. Vol. 16. № 13. P. 16767–16777. DOI: 10.1021/acsami.4c00174.

Информация об авторах

Т. В. Крюк – кандидат химических наук, заместитель директора по научной работе Института физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко.

Е. Н. Труш – младший научный сотрудник молодежной лаборатории «Функциональные материалы на основе полисахаридов» Института физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко.

О. С. Попова – старший преподаватель кафедры «Таможенное дело и экспертиза товаров» Донецкого национального университета экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского.

С. В. Пильгук – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химическая технология топлива» Донецкого национального технического университета.

Н. А. Романенко – младший научный сотрудник молодежной лаборатории «Функциональные материалы на основе полисахаридов» Института физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко.

REFERENCES

1. Siqueira, L.V., Arias, C.I.L.F., Maniglia, B.C. & Tadini, C.C. (2021). Starch-based biodegradable plastics: methods of production, challenges and future perspective. *Current Opinion in Food Science*, 38, 122-130. doi: 10.1016/j.cofs.2020.10.020.

2. Navaf, M., Sunooj, K., Aaliya, B., Akhila, P.P., Sudheesh, C., Mir, S. & George, J. (2023). Impact of metal and metal oxide nanoparticles on functional and antimicrobial activity of starch nanocomposite film: A review. *Measurement: Food*, 11, 100099. doi: 10.1016/j.meafoo.2023.100099.

3. de Moraes, J.O., Scheibe, A.S., Augusto, B., Carciofi, M. & Laurindo, J.B. (2015). Conductive drying of starch-fiber films prepared by tape casting: Drying rates and film properties. *LWT*, 64, 356-366. doi: 10.1016/J.LWT.2015.05.038.

4. González-Selgra, P., Guz, L., Ochoa-Yepes, O., Goyanes, S. & Famá, L. (2017). Influence of extrusion process conditions on starch film morphology, *LWT*, 84, 520-528. doi: 10.1016/j.lwt.2017.06.027.

5. Huang, X., Liu, H., Ma, Y., Mai, S. & Li, C. (2022). Effects of extrusion on starch molecular degradation, order-disorder structural transition and digestibility - A review. *Foods*, vol. 11(16), 2538. doi: 10.3390/foods11162538.

6. Gulzar, B., Hussain, S.Z., Naseer, B. & Naik, H.R. (2021). Enhancement of resistant starch content in modified rice flour using extrusion technology. *Cereal Chemistry*, 98(3), 634-641. doi: 10.1002/cche.10407.

7. Waramboi, J.G., Gidley, M.J. & Sopade, P.A.

(2014). Influence of extrusion on expansion, functional and digestibility properties of whole sweet potato flour. *LWT*, 59(2), 1136-1145. doi: 10.1016/j.lwt.2014.06.016.

8. Jafari, M., Koocheki, A. & Milani, E. (2017). Effect of extrusion cooking on chemical structure, morphology, crystallinity and thermal properties of sorghum flour extrudates. *Journal of Cereal Science*, 75, 324-331. doi: 10.1016/j.jcs.2017.05.005.

9. Xu, E., Campanella, O.H., Ye, X., Jin, Z., Liu, D. & BeMiller, J.N. (2020). Advances in conversion of natural biopolymers: A reactive extrusion (REX)-enzyme-combined strategy for starch/protein-based food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 167-180. doi: 10.1016/j.tifs.2020.02.018.

10. Herniou-Julien, C., Mendieta, J.R. & Gutiérrez, T.J. (2019). Characterization of biodegradable/non-compostable films made from cellulose acetate/corn starch blends processed under reactive extrusion conditions. *Food Hydrocolloids*, 89, 67-79. doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.10.024.

11. Palai, B., Biswal, M., Mohanty, S. & Nayak, S.K. (2019). In situ reactive compatibilization of polylactic acid (PLA) and thermoplastic starch (TPS) blends; synthesis and evaluation of extrusion blown films thereof. *Industrial Crops and Products*, 141(11), 111748. doi: 10.1016/j.indcrop.2019.111748.

12. Cheng, H., Chen, L., McClements, D.J., Yang, T., Zhang, Z., Ren, F., Miao, M., Tian, Y. & Jin, Z. (2021). Starch-based biodegradable packaging materials: A review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 70-82. doi: 10.1016/j.tifs.2021.05.017.

13. Calderón-Castro, T.A.A., Vega-García, M.O., Zazueta-Morales, J.J., Fitch-Vargas, P.R., Carrillo-López, A., Gutiérrez-Dorado, R., Limón-Valenzuela, V. & Aguilar-Palazuelos, E. (2018). Effect of extrusion process on the functional properties of high amylose corn starch edible films and its application in mango (*Mangifera indica* L.) cv Tommy Atkins. *Journal of Food Science and Technology*, 55(3), 905-914. doi: 10.1007/s13197-017-2997-6.

14. Vasiliev, I.Yu., Ananiev, V.V., Kolpakova, V.V. & Sarjeladze, A.S. (2020). Development of technology for obtaining biodegradable compositions based on polyethylene, starch and monoglycerides. *Fine chemical technologies*, 15(6), 44-55. doi: 10.32362/2410-6593-2020-15-6-44-55. (In Russ.).

15. Abrial, H., Soni Satria, R., Mahardika, M., Hafizulhaq, F., Affi, J., Asrofi, M., Handayani, D., Sapuan, S.M., Stephane, I., Sugiarti, E. & Muslimin, A.N. (2019). Comparative study of the physical and tensile properties of jicama (*Pachyrhizus erosus*) starch film prepared using three different methods. *Starch-Stärke*, 71(5-6), 1800224. doi: 10.1002/star.201800224.

16. Potoroko, I.Yu., Malinin, A.V., Tsaturov, A.V., Naumenko, N.V. & Kalinina, I.V. (2020). Method for obtaining biodegradable composite material based on plant biopolymers (variants). *Pat. 2731695. Russian Federation, published on 08.09.2020*. Bull. No. 25. (In Russ.).

17. Shahabi-Ghahfarrokhi, I., Goudarzi, V. & Babaei-Ghazvini, A. (2018). Production of starch based biopolymer by green photochemical reaction at different UV region as a food packaging material: Physicochemical characterization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 122, 201-209. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.10.15.

18. 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, 79-89. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.03.190.

19.Noè, C., Tonda-Turo, C., Chiappone, A., Sangermano, M. & Hakkarainen, M. (2020). Light processable starch hydrogels. *Polymers*, 2(6), 1359-1372. doi: 10.3390/polym12061359.

20.Test methods for gravimetric determination of water vapor transmission rate of materials. (2023). ASTM E96/E96M-23. West Conshohocken: ASTM.

21.Kryuk, T.V., Popova, O.S., Tyurina, T.G., Siversky, A.V. & Romanenko, N.A. (2024). Development of film materials composition based on polysaccharides for food packaging. *Food Industry: Science and Technologies*, 17(4), 67-75. (In Russ.).

22.Chiou, S.Y., Sung, J.M., Huang, P.W. & Lin, S.D. (2017). Antioxidant, antidiabetic, and antihypertensive properties of *Echinacea purpurea* flower extract and caffeic acid derivatives using in vitro models. *Journal of Medicinal Food*, 20(2), 171-179. doi: 10.1089/jmf.2016.3790.

23.Oleyaei, S.A., Zahedi, Y., Ghanbarzadeh, B. & Moayedi, A.A. (2016). Modification of physicochemical and thermal properties of starch films by incorporation of TiO₂ nanoparticles. *International journal of biological macromolecules*, 89, 256-264. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2016.04.078.

24.Nasr, M., Eid, C., Habchi, R., Miele, P. & Bechelany, M. (2018). Recent progress on titanium dioxide nanomaterials for photocatalytic applications. *Chem Sus Chem*, 11(18), 3023-3047. doi: 10.1002/cssc.201800874.

25.Kryuk, R.V., Kurbanova, M.G., Kolbina, A.Yu., Plotnikov, K.B., Plotnikov, I.B., Petrov, A.N. & Khelef, E.A.M. (2022). Color sensors in smart food packaging. *Food Processing: Techniques and Technology*, 52(2), 321-333. doi: 10.21603/2074-9414-2022-2-2366. (In Russ.).

26.Xiong, J., Sheng, C., Wang, Q. & Guo, W. (2019). Toughened and water-resistant starch/TiO₂ bionanocomposites as an environment-friendly food packaging material. *Materials Research Express*, 6(5), 055045. doi: 10.1088/2053-1591/ab058b.

27.Liu, D., Zhao, P., Chen, J., Yan, Y. & Wu, Z. (2022). Recent advances and applications in starch for intelligent active food packaging: A review. *Foods*, 11(18), 2879. doi: 10.3390/foods11182879.

28.Kumar, P., Tanwar, R., Gupta, V., Upadhyay, A., Kumar, A. & Gaikwad, K.K. (2021). Pineapple peel extract incorporated poly (vinyl alcohol)-corn starch film for active

food packaging: Preparation, characterization and antioxidant activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 187, 223-231. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.07.136.

29.Gromovaya, V.F. Shapoval, G.S. & Mironyuk, I.E. (2002). Antiradical and antioxidant activity of biologically active carboxylic acids. *Russian Journal of General Chemistry*, 72(5), 774-777. doi: 10.1023/A:1019520621409.

30.Enescu, D., Dehelean, A., Gonçalves, C., Cerqueira, M.A., Magdas, D.A., Fucinos, P. & Pastrana, L.M. (2020). Evaluation of the specific migration according to EU standards of titanium from chitosan/metal complexes films containing TiO₂ particles into different food simulants. A comparative study of the nano-sized vs micro-sized particles. *Food Packaging and Shelf Life*, 26, 100579. doi: 10.1016/j.fpsl.2020.100579.

31.Arifin, P.F., Assa, T.I., Nora, A. & Wisastra, R. (2022). Evaluating the antioxidant activity of ethanol extract from *Echinacea purpurea* (L.) Moench. *Indonesian Journal of Biotechnology and Biodiversity*, 6(2), 39-44. doi: 10.47007/ijobb.v6i2.132.

32.Choi, S., Rahman, R.T., Kim, B.M., Kang, J., Kim, J., Shim, J. & Nam, Y.S. (2024). Photochemically inert broad-spectrum sunscreen by metal-phenolic network coatings of titanium oxide nanoparticles. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(13), 16767-16777. doi: 10.1021/acsami.4c00174.

Information about the authors

T.V. Kryuk - Candidate of Chemical Sciences, Deputy Director for Scientific Work of the L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry.

E.N. Trush - Junior research fellow of the youth laboratory "Functional materials based on polysaccharides" of the L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry.

O.S. Popova - Senior Lecturer of the Department "Customs Affairs and Goods Expertise" of the Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky.

S.V. Pilhuk - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Chemical Fuel Technology" of the Donetsk National Technical University.

N.A. Romanenko - Junior research fellow of the youth laboratory "Functional materials based on polysaccharides" of the L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.