

И. А. Загидуллина, А. А. Гузова, А. И. Хасанов

БИОРАЗЛАГАЕМАЯ КОМПОЗИЦИЯ ИЗ ПОЛИЛАКТИДА И КРАХМАЛА ДЛЯ АКТИВНОЙ УПАКОВКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Ключевые слова: биоразлагаемая полимерная композиция, полилактид (ПЛА), крахмал, активная упаковка, короноэлектрет, потенциал поверхности, ИК-спектроскопия.

В данной работе описывается создание композиций на основе полилактида модификации D и кукурузного крахмала, выступающего в роли дисперсного наполнителя, обладающих как способностью к биоразложению, так и электрическим полем (короноэлектреты). Показано, что на ИК-спектре ПЛА обнаруживаются несколько характерных полос, отражающих его химическую структуру и функциональные группы (полосы в области $3200\text{--}3600\text{ см}^{-1}$ соответствуют колебаниям связей О–Н, полосы в области $2950\text{--}2870\text{ см}^{-1}$ соответствуют ассиметричным и симметричным колебаниям связей С–Н, сильные и четкие полосы в области $1750\text{--}1800\text{ см}^{-1}$ соответствуют колебаниям карбонильной группы С=О, полосы в области $1300\text{--}1450\text{ см}^{-1}$ соответствуют колебаниям связей С–О–С и С–С, полосы в области $1000\text{--}1300\text{ см}^{-1}$ указывают на колебания эфирных групп. Практически те же самые полосы фиксируются и на ИК-спектрах крахмала, т.к. его химическая формула содержит аналогичные функциональные группы. Однако крахмал имеет более сильные полосы поглощения в диапазоне длин волн около $3300\text{--}3500\text{ см}^{-1}$ и это отражается на спектрах композиций – чем выше содержания крахмала, тем интенсивность полос в этой области увеличивается. Отмечено, что ИК-спектры композиций полилактида и крахмала также могли измениться в зависимости от их взаимодействия друг с другом. Эксперимент показал, что потенциал поверхности полимерных композиций полилактида с 2-6% крахмала больше, чем у чистого полимера. Улучшение процесса накопления и удержания носителей электрического заряда в полимерах связано, во-первых, с появлением новых ловушек, находящихся как в структуре наполнителя, так и на его поверхности, на границе контакта с полимерной матрицей, во-вторых, с тем, что крахмал обладает высокой поляризуемостью, а это приводит к созданию локальных полевых эффектов, способствующих удержанию заряда в структуре полимера, и, в-третьих, крахмал, как гигроскопичный наполнитель, способен удерживать влагу, что напрямую влияет на электретные характеристики полимера. Отмечено также, что кривая зависимости потенциала поверхности полилактида или его композиций с крахмалом от времени хранения являются стандартными кривыми, наблюдаемыми практически для всех короноэлектретов. Два участка – первоначального резкого спада значений потенциала поверхности и его стабилизации – определяются долей носителей заряда, попавших в мелкие, быстро опустошаемые энергетические ловушки, и в глубокие, определяющие срок эксплуатации электретов. Сделан вывод, что введение 2-6 % крахмала в полилактид способствует повышению его электретных свойств, что позволяет говорить о перспективах использования композитов подобного состава для создания активной упаковки, продлевающей срок хранения пищевых продуктов.

I. A. Zagidullina, A. A. Guzhova, A. I. Khasanov

BIODEGRADABLE COMPOSITION OF POLYLACTIDE AND STARCH FOR ACTIVE FOOD PACKAGING

Keywords: biodegradable polymer composition, polylactide (PLA), starch, active packaging, corona electret, surface potential, IR spectroscopy.

This paper describes the creation of compositions based on D-modified polylactide and corn starch, which acts as a dispersed filler, possessing both biodegradability and electric field properties (corona electrets). The IR spectrum of PLA reveals characteristic bands that reflect its chemical structure and functional groups: bands in the $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ range correspond to O–H stretching, those in the $2950\text{--}2870\text{ cm}^{-1}$ range correspond to C–H asymmetric and symmetric stretching, pronounced bands in the $1750\text{--}1800\text{ cm}^{-1}$ range relate to C=O stretching of carbonyl groups, while bands in the $1300\text{--}1450\text{ cm}^{-1}$ range correspond to C–O–C and C–C stretching. Bands indicative of ether group stretching are found in the $1000\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$ range. Similar bands are observed in the IR spectrum of starch, as it contains analogous functional groups. However, starch exhibits stronger absorption bands around $3300\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$, which are mirrored in the spectra of the PLA-starch composites; specifically, higher starch content correlates with increased intensity in this region. Moreover, interactions between PLA and starch alter the IR spectra of their compositions. Experimental data reveal that the surface potential of polymer matrices composed of 2-6% starch exceeds that of pure PLA. This enhancement in the accumulation and retention of electric charge carriers in the polymers is attributed to the formation of new trapping sites within the filler structure and at the polymer matrix interface. Starch's high polarizability contributes to local field effects, further facilitating charge retention, while its hygroscopic nature enables moisture retention, significantly influencing the electret characteristics of the polymer. The patterns observed in the surface potential of PLA and its starch composites over time align with typical behaviors seen in various polymer-based corona electrets. Two distinct phases are identified: an initial sharp decline in surface potential values followed by stabilization. These dynamics are controlled by the trapping of charge carriers in shallow, quickly depleting energy traps versus deeper traps that determine the electret's longevity. The findings conclude that incorporating 2-6% starch into polylactic acid enhances its electret properties, suggesting the potential for developing active packaging solutions that extend the shelf life of food products.

Введение

Биоразлагаемые полимерные материалы занимают важное место в современном обществе из-за их способности разлагаться в естественных условиях под воздействием микроорганизмов, воды и кислорода, что значительно снижает негативное воздействие на окружающую среду [1, 2].

Одной из основных проблем современности является большое количество пластиковых отходов, которые накапливаются на почве (на свалках) и в воде (в морях и океанах). Биоразлагаемые полимеры способны ускорить процесс разложения, снижая количество отходов и их потенциальное загрязнение. Биоразлагаемые материалы, как правило, разлагаются на менее вредные вещества, такие как вода, углекислый газ и биомасса, в отличие от традиционных пластиков, которые могут разлагаться на микропластики. Это способствует сокращению загрязнения почвы, водоемов и экосистем в целом.

В медицине биоразлагаемые полимеры используются для создания имплантатов, лекарственных систем доставки и других медицинских устройств, которые растворяются в организме, устраняя необходимость в последующих хирургических вмешательствах по их удалению [3].

В условиях роста осведомленности о проблемах экологии растет потребность в экологически чистых упаковочных решениях. Биоразлагаемые полимеры, используемые в качестве упаковки, могут стать эффективной альтернативой, которая снижает количество синтетических пластиковых упаковок на рынке [4]. Биоразлагаемые полимеры часто производятся из возобновляемых ресурсов, таких как кукуруза, картофель или другие растительные материалы.

В то же время, все большее применение находит активная упаковка, определяющая новый инновационный подход к упаковыванию продуктов, который не только защищает их от внешних воздействий, но также активно влияет на них, на микроклимат внутри упаковки с целью продления сроков хранения и улучшения качества. Она отличается от традиционной упаковки тем, что включает в себя дополнительные функции, позволяющие взаимодействовать с содержимым, а также с окружающей средой [5].

Существует много разновидностей дополнительных функций активной упаковки: взаимодействие со средой внутри упаковки (выделение или абсорбция веществ, напрямую влияющих на качество и безопасность пищи, контроль содержания кислорода, поглощение влаги и т.п.), сохранение сенсорных свойств (выделение ароматов, веществ, которые могут улучшить вкус или запах пищи), индикация свежести продукта, например, изменение цвета упаковки при изменении состояния продукта, температурный контроль и др.

Известно, что многие пищевые продукты изначально содержат микроорганизмы, способствующие их гниению и порче. Более того, ряд бактерий (например, кисломолочные) необходимы в составе продуктов питания, но до

определенного предела, превышение которого означает «скисание» продукта. Поэтому, одними из самых эффективных являются активные упаковки, которые продлевают срок хранения пищевых продуктов, например, на основе упаковочных материалов с антимикробными добавками для снижения риска бактериального размножения. Такие упаковки помогают бороться с окислением и микробной активностью, тем самым увеличивая срок хранения пищи [5, 6].

В ряде работ показано, что для создания активной упаковки, замедляющей размножение бактерий и плесени, могут быть использованы электреты – это материалы, обладающие постоянным электрическим полем [10].

Целью данной работы было создание материала, обладающего способностью к биоразложению, и электрическим полем.

Образцы и методика эксперимента

Полилактид модификации D (производства Nature Works 4032, $\rho=1,24$ г/см³, $T_{ст}=60^{\circ}\text{C}$, $T_{пл}=165^{\circ}\text{C}$) и дисперсный наполнитель – крахмал кукурузный ГОСТ 32159-2013 ($\rho=1,5$ г/см³) механически смешивали в смесителе Brabender Mixer W 50 ЕНТ, который позволяет равномерно перемешать полимер и наполнитель, а также тщательно контролировать температуру (180°C) и время смешивания (300 с), скорость вращения валков (150 об/мин), чтобы избежать перегрева материала.

Образцы в виде плёнок толщиной 0,5 мм изготавливались литьем из раствора, для чего полилактид или полученные композиции растворялись в хлороформе в соотношении 5:95 (масс.%) и выдерживались до полного растворения (не менее 24 часов при постоянном перемешивании). Затем растворы наносились на антиадгезионную подложку (пленка полиэтилентерефталата), высушивались в вытяжном шкафу до полного удаления хлороформа (не менее 168 часов). Полученные пленки отделялись от подложки и хранились в бумажных конвертах при комнатных условиях.

Инфракрасные спектры композиционного материала получали на приборе Agilent Technologies Cary 600 series FTIR. ИК спектры снимали на просвет в интервале от 4000 см^{-1} до 400 см^{-1} с частотой 1 см^{-1} при комнатной температуре.

Часть пленок подвергали электретированию в коронном разряде на установке, имеющей электрод в виде 196 заостренных игл, равномерно расположенных на площади 49 см^2 в виде квадрата. Расстояние между образцом и электродом составляло 20 мм, напряжение поляризации – 30 кВ, время поляризации – 30 с, температура и время предварительного прогрева образцов в термощкафу – 90°C в течение 10 мин.

Потенциал поверхности V_s определяли с помощью измерителя параметров электростатического поля ИПЭП-1. Оценка результатов проводилась на основании средних

величин из 5 параллельных опытов. Погрешность измерения электретных характеристик не превышала 3%.

Регистрация кривых термогравиметрического анализа производилась на приборе Thermal Advantage TGA Q50 в температурном интервале 30–400 °С при скорости нагрева 5С/мин в атмосфере азота.

Результаты и их обсуждение

Согласно феноменологической теории заряд электретов определяется разницей между инжектированным зарядом и поляризацией. Макромолекулы полилактида склонны к поляризации благодаря наличию в его составе атома с высокой электроотрицательностью – кислорода (3,44 по шкале Полинга), который вызывает неравномерное распределение электронной плотности в молекуле и, как следствие, возникновение диполей. Более электроотрицательный атом притягивает электронные пары ближе к себе, создавая частичный отрицательный заряд (δ^-) на одном атоме и частичный положительный заряд (δ^+) на другом. В полимерной цепи полилактида, где чередуются полярные и неполярные группы, могут возникнуть и дипольные группировки, и общая полярность цепи. Это касается и молекулы крахмала, в котором также присутствует кислород (рис. 1).

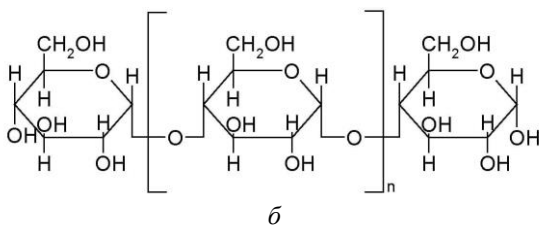
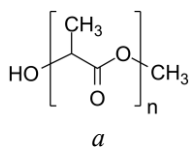


Рис. 1 – Химические формулы полилактида (а) и крахмала (б)

Fig. 1 – Chemical formulas of polylactide (a) and starch (b)

Инфракрасная спектроскопия (ИК-спектроскопия) является мощным инструментом для анализа органических соединений, и полилактид и крахмал не являются исключением [10]. ИК-спектры могут предоставить ценную информацию об их структуре, функциональных группах и взаимодействиях. Рассмотрим основные особенности ИК-спектров полилактида и его композиций с крахмалом (рис. 2).

Полосы в области 3200–3600 cm^{-1} соответствуют колебаниям связей О–Н, которые могут возникать как следствие наличия водорода (например, в группах –ОН). Для полилактида эта область не

сильно выражена, поскольку он не содержит свободных гидроксильных групп в значительных количествах. В инфракрасном спектре кукурузного крахмала имеются два отличительных пика поглощения в области 3200 cm^{-1} и 3400 cm^{-1} , которые соответствуют валентным колебаниям ОН-групп. Мощные и отчетливые пики обусловлены протяженностью гидроксильных групп по всей длине молекулы крахмала (кукурузного). При содержании 2 масс. % в полилактиде интенсивность данных пиков небольшая и при увеличении содержания до 4 масс. % образуется сливание пиков в одну полосу. Однако при его содержании в смеси с полилактидом 6 масс. %, наблюдаются отчетливые пики с характерными значениями длины волны для крахмала 3200 cm^{-1} и 3400 cm^{-1} , что также подтверждается в работах [11] при изучении полимерных композиций с крахмалом. Наблюдаемое увеличение интенсивности пиков связано с образованием новых водородных связей, которые могут выступать в качестве ловушек для зарядов.

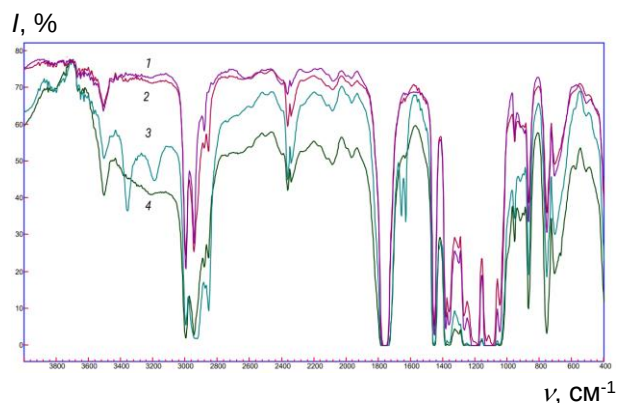


Рис. 2 – ИК-спектр полилактида (кривая 1) и композиций полилактида с 2 (кривая 2), 4 (кривая 3), 6 масс. % (кривая 4) крахмала

Fig. 2 – IR spectrum of polylactide (curve 1) and polylactide compositions with 2 (curve 2), 4 (curve 3), 6 wt.% (curve 4) starch

Содержание гидроксильных групп от влажности воздуха исключили после проведения испытаний на ТГА (рис. 3). По результатам данного анализа видно, что отсутствует потеря массы до 250 °С, это говорит о том, что любая вода отсутствует в образцах на основе полилактида после подготовки их в термошкафу, а ловушками для зарядов выступают именно гидроксильные группы крахмала (табл. 1).

Полосы в области 2950–2870 cm^{-1} соответствуют ассиметрическим и симметрическим колебаниям связей С–Н в метильных группах (–CH₃). Сильные и четкие полосы в области 1750–1800 cm^{-1} соответствует колебаниям карбонильной группы С=О. Полосы в области 1300–1450 cm^{-1} соответствуют колебаниям связей С–О–С и С–С. Полосы в области 1000–1300 cm^{-1} указывают на колебания С–О, связанные с сложноэфирными группами. Полосы ниже 1000 cm^{-1} присутствуют, но обычно их интерпретация более сложна и зависит от условий измерений.

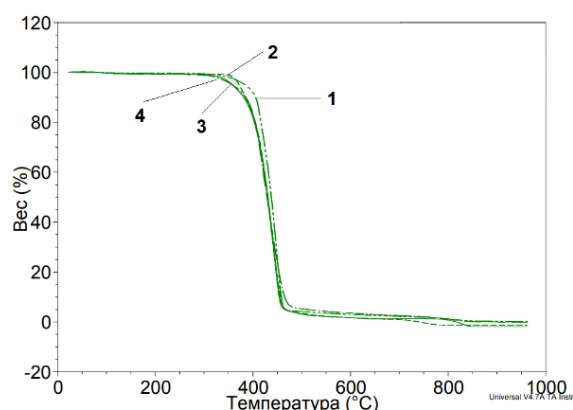


Рис. 3 – Результаты испытаний ТГА композиций полилактида, где: 1 – контрольный образец полилактида; 2 – композиция полилактида с содержанием 2 масс. % крахмала; 3 – композиция полилактида с содержанием 4 масс. % крахмала; 4 – композиция полилактида с содержанием 6 масс. % крахмала

Fig. 3 – TGA test results for poly lactide compositions, where: 1 – control sample of poly lactide; 2 – poly lactide composition containing 2 wt.% starch; 3 – poly lactide composition containing 4 wt.% starch; 4 – poly lactide composition containing 6 wt.% starch

Наличие у композиции с содержанием крахмала 6 масс. % полос поглощения в области 1650 см⁻¹ и 1700 см⁻¹ не имеет важного значения для эксперимента, так как говорит только лишь о количестве крахмала в композиции и происхождении данного крахмала, а именно, данные полосы поглощения соответствуют полосам поглощения амида, так как в крахмале присутствует некоторое количество белка [12].

Нетрудно заметить, что в составе полилактида и крахмала присутствуют следующие полярные группы: гидроксильные (–OH), эфирные (–O–) и карбонильные (C=O). Если обратить внимание на их структурные особенности и способность к образованию водородных связей, то можно сказать следующее.

Гидроксильные группы обладают умеренной полярностью. Благодаря присутствию кислорода с высокой электроотрицательностью, в соединении возникают частичные заряды, что позволяет им образовывать водородные связи. Гидроксильные группы довольно полярны, но их полярность ограничена одним атомом кислорода. Карбонильные группы являются полярными из-за наличия двойной связи между углеродом и кислородом. Эфирные группы имеют меньшую полярность по сравнению с гидроксильными и карбонильными группами. Хотя кислород в эфире также является электроотрицательным, он сбалансированно окружен двумя атомами углерода, что снижает общий полярный момент группы. Эфиры не образуют водородные связи так же активно, как гидроксильные группы.

В порядке убывания полярности можно расставить группы следующим образом:

1. Гидроксильные группы (–OH)
2. Карбонильные группы (C=O)

3. Эфирные группы (–O–)

Дипольный момент (характеризуют распределение заряда внутри молекул, что связано с наличием полярных связей) гидроксильной группы составляет около 1,5 Дебая (D), карбонильной группы приблизительно равен 2,4 D, а эфирной группы – менее 1 D или близок к нулю.

Значит, введение крахмала, у которого содержание гидроксильных (и это видно также из ИК-спектров композиций ПЛА с крахмалом) и карбонильных групп больше, должно негативно сказываться на общей электретируемости исследуемых композиций. И чем больше доля крахмала в композициях, тем должны быть ниже значений их электретных характеристик.

Однако эксперимент показал, что потенциал поверхности полимерных композиций полилактида с 2-6% крахмала больше, чем у чистого полимера (табл. 1, рис. 4).

Таблица 1 - Потенциал поверхности полилактида и композиции полилактида с крахмалом на 20-е сутки хранения коронозлектрета

Table 1 - Surface potential of poly lactide and poly lactide-starch composites after 20 days of storage of corona electret

Композиция	V _{з20} , кВ
ПЛА	0,14
ПЛА + 2 мас.% крахмала	0,26
ПЛА + 4 мас.% крахмала	0,28
ПЛА + 6 мас.% крахмала	0,30

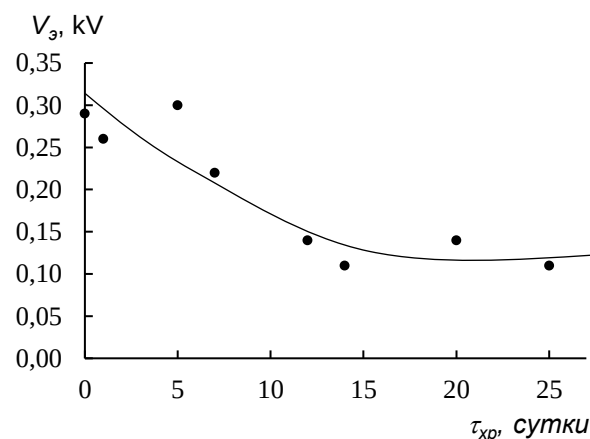


Рис. 4 – Зависимость потенциала поверхности полилактида от времени хранения коронозлектрета

Fig. 4 – Dependence of the surface potential of poly lactide on the storage time of the corona electret

Отметим, что кривая зависимости потенциала поверхности полилактида от времени хранения является стандартной кривой, наблюдаемой практически для всех коронозлектретов. Два участка – первоначального резкого спада значений V_з и его стабилизации – определяются долей носителей заряда, попавших в мелкие, быстро опустошаемые

энергетические ловушки, и в глубокие, определяющие срок эксплуатации электретов. Как правило, свойства различных материалов сравнивают в период стабилизации значений их электретных свойств. В нашем случае это 20-е сутки хранения короноэлектретов.

Видно (табл. 1), что электретные свойства полимерных композиций лучше, чем у чистых полимеров. Это наблюдалось и ранее для полимерных композитов различного состава [13-18]. Улучшение процесса накопления и удержания носителей электрического заряда в полимерах связывают с появлением новых ловушек, находящихся как в структуре наполнителя, так и на его поверхности, на границе контакта с полимерной матрицей. Как уже было сказано выше, крахмал обладает высокой поляризуемостью, что может вести к созданию локальных полевых эффектов, способствующих удержанию заряда в структуре полимера. Кроме того, крахмал, как гигроскопичный наполнитель, способен удерживать влагу, что напрямую влияет на электретные характеристики полимера.

Выводы

Таким образом, введение 2-6 % крахмала в полилактид способствует повышению его электретных свойств, что позволяет говорить о перспективах использования композитов подобного состава для создания активной упаковки, продлевающей срок хранения пищевых продуктов.

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан» (Соглашение №114/2024-ПД).

Литература

1. Ф.Ш. Вильданов, Ф.Н. Латыпова, П.А. Красуцкий, Р.Р. Чанышев, *Башкирский химический журнал*, **19**, 1, 135-139 (2012).
2. Р.А. Безязыкая, А.В. Кипря, Е.Л. Сокурено, *Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования*, **1**, 8, 41-42 (2021).
3. И.Б. Аббасов, *Ремедиум*, **27**, 1, 17-25 (2023).
4. Д.М. Мьяленко, *Пищевые системы*, **6**, 1, 11-21 (2023).
5. Н.М. Ревуцкая, В.В. Насонова, И.А. Козырев, *Все о мясе*, **3**, 26-31 (2021).
6. Н.Н. Шуклина, Л.В. Кабанова, *Пищевые системы*, **4**, 3S, 309-314 (2021).
7. М.Ф. Галиханов, А.Н. Борисова, Р.Я. Дебердеев, *Вестник Казанского технологического университета*, **2**, 163-167 (2004).
8. М.Ф. Галиханов, А.Н. Борисова, А.Ю. Крыницкая, Р.Я. Дебердеев, *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, **2-3**, 71-73 (2005).

9. М.Ф. Галиханов, А.Н. Борисова, Р.Я. Дебердеев, *Пищевая промышленность*, **12**, 42-44 (2006).
10. Г. Сесслер *Электреты*, Мир, Москва, 1983. 487 с.
11. P. Singh, G. Kaur, A. Singh, T. Sharma, B.N. Dar, *Materials Chemistry and Physics*, **308**, 128267 (2023).
12. Valenzuela-Lagarda J.L., Pacheco-Aguilar R., Gutiérrez-Dorado R., Mendoza J.L., López-Valenzuela J.Á., Mazorra-Manzano M.Á., Muy-Rangel M.D., *Molecules*, **26**(7), 2103 (2021).
13. T.A. Swetha, A. Bora, K. Mohanrasu, P. Balaji, Raja R., K. Ponnuchamy, G. Muthusamy, A. Arun, *International Journal of Biological Macromolecules*, **123715**, 234 (2023).
14. Ю.А. Гороховатский, М.Ф. Галиханов, Д.А. Игнатиева, Е.А. Карулина, Ю.И. Сотова, Д.Э. Темнов, А.А. Гужова, *Вестник Технологического университета*, **20**, 4, 27-30 (2017).
15. I.A. Zagidullina, M.F. Galikhanov, R.I. Kamalova, G.F. Sharipova, R.Z. Khairullin, *AIP Conference Series*, **2313**, 1, 050048 (2020).
16. J. Zhang, G. Chen, G.S. Bhat, H. Azari, H. Pen, *J. Appl. Polym. Sci.*, **137**, 4, 48309 (2020).
17. M. Galikhanov, I. Zagidullina, A. Guzhova, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **29**, 3, 784-787 (2022).
18. A.A. Gulyakova, Y.A. Gorokhovatsky, P. Frübing, R. Gerhard, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **24**, 4, 2541-2548 (2017).
19. R.S. Ismayilova, M.M. Kuliev, *Surf. Eng. and Appl. Electrochem.*, **56**, 3, 267-271 (2020).
20. A. Guzhova, M. Galikhanov, *Bulgarian Chemical Communications*, **47**, 103-108 (2015).

References

1. F.Sh. Vildanov, F.N. Latypova, P.A. Krasutsky, R.R. Chanyshev, *Bashkir Chemical Journal*, **19**, 1, 135-139 (2012).
2. R.A. Bezyazykaya, A.V. Kipra, E.L. Sokurenko, *Fire and technosphere safety: problems and ways of improvement*, **1**, 8, 41-42 (2021).
3. I.B. Abbasov, *Remedium*, **27**, 1, 17-25 (2023).
4. D.M. Myalenko, *Food Systems*, **6**, 1, 11-21 (2023).
5. N.M. Revutskaya, V.V. Nasonova, I.A. Kozыrev, *All about meat*, **3**, 26-31 (2021).
6. N.N. Shuklina, L.V. Kabanova, *Food Systems*, **4**, 3S, 309-314 (2021).
7. M.F. Galikhanov, A.N. Borisova, R.Ya. Deberdeev, *Herald of Kazan Technological University*, **2**, 163-167 (2004).
8. M.F. Galikhanov, A.N. Borisova, A.Yu. Krynitckaya, R.Ya. Deberdeev, *News of higher educational institutions. Food Technology*, **2-3**, 71-73 (2005).
9. M.F. Galikhanov, A.N. Borisova, R.Ya. Deberdeev, *Food Industry*, **12**, 42-44 (2006).
10. G. Sessler *Electrets*, Mir, Moscow, 1983. 487 p.
11. P. Singh, G. Kaur, A. Singh, T. Sharma, B.N. Dar, *Materials Chemistry and Physics*, **308**, 128267 (2023).
12. Valenzuela-Lagarda J.L., Pacheco-Aguilar R., Gutiérrez-Dorado R., Mendoza J.L., López-Valenzuela J.Á., Mazorra-Manzano M.Á., Muy-Rangel M.D., *Molecules*, **26**(7), 2103 (2021).
13. T.A. Swetha, A. Bora, K. Mohanrasu, P. Balaji, Raja R., K. Ponnuchamy, G. Muthusamy, A. Arun, *International Journal of Biological Macromolecules*, **123715**, 234 (2023).
14. Yu.A. Gorokhovatsky, M.F. Galikhanov, D.A. Ignatieva, E.A. Karulina, Yu.I. Sotova, D.E. Temnov, A.A. Guzhova, *Herald of Technological University*, **20**, 4, 27-30 (2017).
15. I.A. Zagidullina, M.F. Galikhanov, R.I. Kamalova, G.F. Sharipova, R.Z. Khairullin, *AIP Conference Series*, **2313**, 1, 050048 (2020).
16. J. Zhang, G. Chen, G.S. Bhat, H. Azari, H. Pen, *J. Appl. Polym. Sci.*, **137**, 4, 48309 (2020).

17. M. Galikhanov, I. Zagidullina, A. Guzhova, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **29**, 3, 784-787 (2022).
18. A.A. Gulyakova, Y.A. Gorokhovatsky, P. Frübing, R. Gerhard, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **24**, 4, 2541–2548 (2017).
19. R.S. Ismayilova, M.M. Kuliev, *Surf. Eng. and Appl. Electrochem.*, **56**, 3, 267-271 (2020).
20. A. Guzhova, M. Galikhanov, *Bulgarian Chemical Communications*, **47**, 103-108 (2015).

© **И. А. Загидуллина** – канд. техн. наук, доцент кафедры Технологии переработки полимеров и композиционных материалов, Казанский национальный исследовательский технологический университет (КГНИТУ), Казань, Россия, zagidullina_inna@mail.ru; **А. А. Гужова** – канд. техн. наук, доцент кафедры Иностранных языков в профессиональной коммуникации, КНИТУ, alina_guzhova@mail.ru; **А. И. Хасанов** – канд. техн. наук, доцент кафедры Технологии пластических масс, КНИТУ, b-100lab@mail.ru.

© **I. A. Zagidullina** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the Department of Polymer and Composite Materials Processing Technology, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, zagidullina_inna@mail.ru; **A. A. Guzhova** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the Department of Foreign Languages in Professional Communication, KNRTU, alina_guzhova@mail.ru; **A. I. Khasanov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the Department of Plastics Technology, KNRTU, b-100lab@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 27.03.25.

Дата принятия рукописи в печать – 11.07.25.