



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 678.01.53

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.032

EDN: EHVFW

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА

Марина Ивановна Губанова ¹, Никита Сергеевич Баженов ²,
Ирина Анатольевна Кирш ³, Ольга Анатольевна Банникова ⁴,
Наталья Сергеевна Шмакова ⁵, Злата Владимировна Широхова ⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} ФГБОУ ВО «Российский Биотехнологический Университет (РОСБИОТЕХ)», Москва, Россия

¹ gubanovami@mgupp.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3547-716X>

² bazhenovns@mgupp.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5193-524X>

³ irina-kirsh@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3370-4226>

⁴ BannikovaOA@mgupp.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0633-0003>

⁵ shmakovans@mgupp.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6758-7502>

⁶ zshirokhova@list.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0259-7056>

Аннотация. Анализ научной литературы позволил выявить данные о проведении научных исследований материалов на основе поливинилового спирта (ПВС), модифицированных с использованием ультразвука. Однако информация о влиянии ультразвукового воздействия на изменение свойств растворов и пленок на основе ПВС ограничена. Целью работы было изучение влияния ультразвуковой обработки на свойства материалов на основе ПВС. Были решены следующие задачи: ультразвуковая обработка растворов ПВС, сравнительная характеристика вязкости модифицированных растворов ПВС, оптимизация температурно-временных режимов формирования пленок на основе ПВС, исследование свойств растворов ПВС различной концентрации и пленок на их основе до и после ультразвуковой обработки. Растворы ПВС с различной концентрацией обрабатывались с использованием ультразвукового зонда. После проведения ультразвуковой модификации растворов ПВС не было выявлено значимых изменений вязкости. Установлено влияние ультразвуковой обработки на физико-механические свойства образцов пленок, полученных на основе растворов ПВС с концентрацией 7,5 и 10 %, – наблюдалось уменьшение относительного удлинения, у образца на основе раствора ПВС с концентрацией 5% удлинение изменялось линейно, в зависимости от продолжительности обработки. Данные показатели свидетельствуют об однородности растворов с меньшей концентрацией и с более упорядоченной структурой полимеризации. Таким образом, обработка ПВС ультразвуком является перспективным методом модификации растворов полимеров для придания пленке на основе ПВС более однородных структур, в том числе при введении в композицию модифицирующих компонентов, используемых в упаковке для пролонгации срока хранения пищевых продуктов.

Ключевые слова: поливиниловый спирт, модификация, ультразвук, зависимость вязкости.

Для цитирования: Влияние воздействия ультразвука на свойства покрытий из поливинилового спирта / М. И. Губанова [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 227–234. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.032. EDN: <https://elibrary.ru/EHVFW>.

Original article

EFFECT OF ULTRASOUND ON PROPERTIES OF POLYVINYL ALCOHOL COATINGS

Marina I. Gubanov ¹, Nikita S. Bazhenov ², Irina A. Kirsh ³, Olga A. Bannikova ⁴,
Natalia S. Shmakova ⁵, Zlata V. Shirokhova ⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Russian Biotechnological University (ROSBIO), Moscow, Russia

¹ gubanovami@mgupp.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3547-716X>

² bazhenovns@mgupp.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5193-524X>

³ irina-kirsh@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3370-4226>

⁴ BannikovaOA@mgupp.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0633-0003>

⁵ shmakovans@mgupp.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6758-7502>

⁶ zshirokhova@list.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0259-7056>

Abstract. The analysis of scientific literature revealed data on the research of materials based on polyvinyl alcohol (PVA) modified using ultrasound. However, information on the effect of ultrasonic exposure on the change in the proper-

© Губанова М. И., Баженов Н. С., Кирш И. А., Банникова О. А., Шмакова Н. С., Широхова З. В., 2026

ties of solutions and films based on PVA is limited. The aim of the work was to study the effect of ultrasonic processing on the properties of materials based on PVA. The following tasks were solved: ultrasonic treatment of PVA solutions, comparative analysis of the viscosity of modified PVA solutions, optimization of the temperature and time conditions for the formation of PVA-based films, and study of the properties of PVA solutions of different concentrations and the films based on them before and after ultrasonic treatment. PVA solutions with different concentrations were also treated using an ultrasonic probe. After the ultrasonic modification of PVA solutions, no significant changes in viscosity were observed. The effect of ultrasonic processing on the physical and mechanical properties of film samples based on PVA solutions with a concentration of 7.5 and 10 % was established.

A decrease in the relative elongation was observed, while the elongation of the sample based on a PVA solution with a concentration of 5 % changed linearly, depending on the duration of the processing. These indicators indicate the homogeneity of solutions with lower concentrations and a more correct polymerization structure. Thus, ultrasound treatment of PVA is a promising method for modifying polymer solutions to give PVA-based films more uniform structures, including when modifying components are added to the composition for prolonging the shelf life of food products.

Keywords: polyvinyl alcohol, modification, ultrasound, viscosity dependence.

For citation: Gubanov, M. I., Bazhenov, N. S., Kirsh, I. A., Bannikova, O. A., Shmakova, N. S. & Shirokhova, Z. V. (2026). Effect of ultrasound on properties of polyvinyl alcohol coatings. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 227-234. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.032. EDN: <https://elibrary.ru/EHVFWE>.

Введение

Материалы для упаковки пищевых продуктов, распространенные в настоящее время на рынке, представляют собой небiodegradable пластики на основе нефти [1]. В связи с тем, что данный вид материалов имеет длительный срок разложения, что вызывает ухудшение экологической обстановки, наиболее актуально использование полимеров с короткими сроками биодеградации. Одним из таких полимеров является поливиниловый спирт (ПВС). ПВС – биodegradable полимер, имеет превосходные характеристиками биодеградации [2], а также высокую стойкость к маслам и химикатам, стабилен практически во всех органических растворителях и является перспективным полимером для создания биodegradable материалов благодаря своей водорастворимости и биodegradability [3]. Применение ПВС возможно вместе с бумажной продукцией, из-за наличия в структуре гидроксильных групп он имеет свойство высокого влагопоглощения, что положительно влияет на смешивание [4]. Проведены исследования, которые показали, что композит на основе ПВС демонстрирует пониженное влагопоглощение после добавления волокна из ананаса и нановолокна бактериальной целлюлозы к чистому ПВС [5]. Модификация ПВС возможна не только путем добавления других составляющих, а также воздействием волнами различной частоты. Этот вид модификации можно осуществить с помощью метода ультразвуковой обработки. В ультразвуковом оборудовании используется энергия колебаний, которая улучшает однородность в матрице ПВС и приводит к увеличению влагостойкости композитов. Многие исследователи использовали ультразвуковую обработку для повышения дисперсности модификаторов при введении в пленку на основе ПВС, однако в ходе исследования не рассматривались механические и физические характеристики чистой пленки ПВС [5–7].

По литературным данным, ультразвуковая обработка приводила к изменению структуры растворов ПВС, после структуризации изменялась прочность пленок на их основе, термические, барьерные и оптические свойства [8–10]. Некоторые исследования посвящены изучению воздействия ультразвука на композиционные материалы на основе ПВС, но информации по влиянию ультразвукового воздействия на растворы ПВС недостаточно для составления общих закономерностей по данному вопросу [11].

Цель данного исследования: изучение влияния ультразвукового воздействия на свойства растворов ПВС и пленок на их основе.

В рамках поставленной цели решались следующие задачи: ультразвуковая обработка растворов ПВС, сравнительная характеристика вязкости модифицированных растворов ПВС, оптимизация температурно-временных режимов формирования пленок на основе ПВС, исследование свойств растворов ПВС различной концентрации и пленок на их основе до и после ультразвуковой обработки.

Основные свойства покрытий из поливинилового спирта

ПВС применяется в отраслях промышленности, известны различные способы его использования [12]. Производится ПВС в двух формах: полностью гидролизованной и частично гидролизованной, причем последняя обычно используется в технологии упаковки пищевых продуктов. За счет способности к водорастворимости поливиниловый спирт обладает высокой биodegradability и биосовместимостью, что делает его востребованным для производства пленок для упаковки пищевых продуктов. Благодаря своей гидрофильной природе ПВС можно легко смешивать с натуральными полимерами посредством межмолекулярных / внутримолекулярных водородных связей. Свойства этих смесей зависят от природы компонентов в составе композитной системы. Пленки для упаковки пищевых продуктов на основе ПВС обладают низкой газопроницаемостью. Таким образом, целесообразно использование ПВС для разработки пленочной упаковки на основе биокомпозита с высокими водо- и газобарьерными свойствами, что значительно продлевает срок годности пищевых продуктов [13].

Свойства композиций с ПВС описаны в ряде опубликованных научных работ. Например, проведены исследования композиций поливинилового спирта с крахмалом в разных соотношениях (от 0 до 60 %) в контексте их воздействия на адсорбцию воды, паропроницаемость, механические свойства (процент удлинения при разрыве и прочность на разрыв) и термические характеристики. Во всех рецептурах оба полимера показали хорошую совместимость во время обработки и в полученном материале [14].

Введение ПВС в композицию положительно повлияло на ее функциональные свойства, улучшило газопроницаемость и механические свойства пленок из картофельного крахмала. Рецептура, содержащая 60%

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2026

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА

ПВС, показала лучший барьер для водяного пара, более низкую плотность и растворимость, а также лучшие механические характеристики. Пленки на основе ПВС и картофельного крахмала могут быть использованы в качестве биоразлагаемой упаковки как альтернатива синтетическим упаковочным материалам [15].

Проведены исследования композиционных материалов на основе смеси хитозана и поливинилового спирта. Межмолекулярное взаимодействие хитозан–ПВС исследовали с помощью FTIR. Влагосорбционные характеристики смеси хитозан–ПВС при 25 °C были изучены для определения активности воды в диапазоне от 0,11 до 0,92. Установлено, что содержание влаги повышается с увеличением концентрации ПВС [16].

В исследованиях Агравалла и других в ПВС добавляли модифицированные частицы графита. Это привело к увеличению прочности по сравнению с чистым ПВС. Кроме того, полученные композиты являются более термостойкими по сравнению с ПВС [17].

Композиты на основе ПВС широко используются из-за их уникальных механических и химических свойств в таких областях, как фармацевтика (системы доставки лекарств), тканевая инженерия, биоразлагаемая упаковка и строительные материалы, также свойства данных композитов позволяют рекомендовать их для использования в 3D-печати [17].

Поливиниловый спирт вызывает значительный исследовательский интерес. Это связано с его исключительными свойствами, которые обусловили его широкое применение в самых разных областях, особенно в медицине и фармацевтике. Однако исследования показали, что биоматериалы на основе ПВС имеют некоторые ограничения, которые могут препятствовать их использованию или снижать их эффективность [18].

К ограничениям ПВС мы можем отнести его водорастворимость и низкую термоустойчивость. Но главными его положительными чертами являются его показатели барьерных свойств. Исходя из этого основной задачей использования ПВС как биоразлагаемого полимера – это модификация его для придания низкой растворимости.

Методы модификации свойств покрытий

Различные нетепловые методы, например, ультразвуковая обработка, обработка ионизирующим, гамма-излучениями и ультрафиолетом, могут эффективно изменять функциональные свойства пленок. Эти методы могут улучшать свойства пленок за счет уменьшения размера частиц, усиления межмолекулярного электростатического отталкивания и увеличения степени сшивки биополимеров. Обогащение наноматериалов в биополимерной матрице может повышать структурные и механические свойства пленок за счет образования новых водородных связей между наноматериалами и полимерами. Таким образом, использование нетепловых методов могут быть полезны для улучшения свойств пленок [19].

Использование технологий нетепловой обработки расширяется из-за постоянно растущего спроса на высококачественные и удобные в употреблении продукты с натуральным вкусом и ароматом, без химических добавок и консервантов, а также качественную упаковку с повышенными характеристиками прочности, относительного удлинения и барьерных свойств [20].

Ультразвуковое воздействие – это метод, который можно использовать как самостоятельно, так и в сочетании с другими стандартными методами для получения новых биомедицинских и экологических инженерных материалов. Ультразвуковая модификация

обладает рядом преимуществ, в том числе высокой эффективностью, чистотой и воспроизводимостью. По сравнению с традиционными физическими и химическими методами получения материалов ультразвук не вызывает химического загрязнения, что делает этот метод чрезвычайно ценным в области новых материалов, особенно для модификации полимеров природного происхождения. Исследования показали, что ультразвук совместим с существующими методами подготовки материалов, поскольку он играет важную роль в агломерации, морфологии, кристалличности, деградации и механических свойствах материалов [21].

Ультразвуковые методы обработки применяются во многих гомогенных и гетерогенных реакциях для перемешивания или гомогенизации растворов. Ультразвук может вызывать сильные термические, механические и суперсмешивающие эффекты, а также явление кавитации. Кавитация – это образование, рост и схлопывание пузырьков в жидкости, которые могут дополнительно гомогенизировать частицы в микроскопическом масштабе. Было подтверждено, что ультразвук может влиять на физико-химические свойства полимеров и повышать растворимость материала, что приводит к образованию компактных сетчатых структур внутри пленок.

Кроме того, ультразвук может вызывать химические изменения, которые используются во многих областях химического синтеза. Исследователи использовали ультразвуковое облучение для получения сочетания оксида графена, фосфоновой и фосфиновой кислот с ПВС с шестичленными лактоновыми кольцами и продемонстрировали, что межфазное взаимодействие между компонентами значительно улучшилось [22].

Во многих работах сообщалось о пленке на основе ПВС, полученной с использованием ультразвука, однако информация о влиянии этой обработки на изменение свойств ПВС ограничена. Например, в работе Абрала гель ПВС обрабатывали ультразвуком с использованием ультразвукового зонда мощностью 360 Вт в течение 2,5, 5, 7,5 и 10 мин. Длительность ультразвуковой обработки в течение 7,5 мин приводит к значительному эффекту ($p \leq 0,05$) на увеличение прочности на разрыв, но не на модуль упругости при растяжении и деформацию при разрыве пленки. После этой продолжительности вибрации прочность на разрыв увеличилась почти на 29 %, деформация при разрыве уменьшилась на 30 %, непрозрачность уменьшилась на 22 %, а проницаемость для водяного пара уменьшилась на 11 %. С другой стороны, влагостойкость значительно снизилась (почти на 12 %). Обработанная ультразвуком пленка претерпела большую деформацию решетки и имела более высокую кристаллическую структуру по сравнению с необработанной ультразвуком пленкой. Обработка геля ПВС ультразвуком является потенциальным методом для придания пленке ПВС некоторых свойств, необходимых для упаковки пищевых продуктов [23].

Полимерные покрытия на продуктах питания признаны альтернативным решением для сохранения качества и увеличения срока хранения. Пленки производятся из природных полимеров, таких как углеводы, белки, липиды и их комбинации, а также из синтетических, таких как ПВС, оксипропилцеллюлоза (ОГПМЦ), карбоксиметил-целлюлоза (КМЦ). Применение пленок на основе биополимеров расширяется благодаря использованию передовых технологий для улучшения их структурных, физических, механических и барьерных свойств [19].

Анализ работ показал, что для модификации

наиболее часто используется ультразвуковая обработка полимеров. Также результаты, полученные в различных работах, показывают, что данная модификация положительно влияет на улучшение отдельных свойств полимеров.

Влияние ультразвуковой обработки на свойства полимеров

Ультразвук во многих случаях широко использовался с целью гомогенизации различных систем и является весьма выгодным методом деполимеризации макромолекул, поскольку снижает их молекулярную массу путем расщепления наиболее восприимчивой химической связи, не вызывая никаких изменений в химической природе полимера. Большинство эффектов, связанных с контролем молекулярной массы, можно отнести к большим градиентам сдвига и ударным волнам, генерируемым вокруг схлопывающихся кавитационных пузырьков. В целом для того, чтобы любой процесс деградации полимера стал приемлемым для производства, необходимо иметь возможность указать условия обработки ультразвуком, которые приводят к определенному относительному распределению молярной массы. Это требует определения соответствующей мощности обработки, температуры, концентрации и времени обработки [24].

В исследовании Лиу и других рассматривалось влияние ультразвуковой обработки на свойства пленок на основе крахмала батата. Ультразвук с низкой мощностью в 20 кГц использовали для обработки композиции. На термограммах энтальпии желатинизации крахмалов, обработанных ультразвуком, были ниже, чем у необработанного образца. При увеличении амплитуды ультразвука с 40 % до 70 % энтальпия плавления композиции постепенно уменьшалась [25].

Методом электронной микроскопии показано, что после обработки ультразвуком поверхность композитных пленок стала более гладкой. При проведении исследований с помощью атомно-силовой микроскопии установлено, что ультразвуковая обработка привела к снижению шероховатости поверхности пленки. Пленки с ультразвуковой обработкой показали более высокую светопропускаемость, меньшее удлинение при разрыве, более высокую прочность на разрыв и лучшие барьерные свойства для влаги, чем пленки без ультразвуковой обработки [25].

В другом исследовании Абрала и соавторов пленки на основе крахмала саго подвергались обработке ультразвуком во время желатинизации в течение 2,5, 5 и 10 минут. После обработки уменьшалась вязкость раствора, что приводило к получению более тонкой пленки с более низкой проницаемостью для паров влаги по сравнению с необработанной. Было доказано, что ультразвуковая обработка увеличила относительное удлинение пленки на 227 %, ее влагопоглощение снизилось на 29,83 %, а температуру плавления – на 7 % [26].

Также воздействию ультразвука был подвергнут раствор из крахмала восковидной кукурузы в исследованиях Янга совместно с другими учеными. Они выявили, что поверхность гранул обработанного ультразвуком восковидного кукурузного крахмала стала более гладкой и наблюдался более низкий диаметр частиц. Было доказано, что ультразвуковое облучение повлияло на распределение длины цепи, двойные спирали, одинарные спирали и аморфное состояние восковидного кукурузного крахмала [27].

В работе Фалсафи с соавторами овсяный крахмал был подвергнут обработке ультразвуком 20 кГц в

течение 10 и 20 мин. Проведенные исследования показали наличие трещин и пор на поверхности обработанных гранул крахмала. Очевидное уменьшение гранул крахмала наблюдалось при самой высокой интенсивности обработки ультразвуком. Ультразвуковая обработка также увеличивала содержание амилозы, набухаемость, растворимость, водо- и липидоудерживающую способность; в то время как твердость геля уменьшалась после обработки ультразвуком [28].

Применение ультразвуковой обработки также осуществлялось на пленках на основе белка. В работе Гуля исследовано покрытие на основе муки из лесного ореха с эфирным маслом гвоздики, обработанной в течение 2, 4 и 6 минут ультразвуком. Воздействие проводилось для гомогенизации и получения наноэмульсионных пленок. Доказано, что толщина и водорастворимость пленок значительно уменьшались с увеличением обработки ультразвуком. Также пленки становились более прозрачными при повышении времени обработки. Физико-механические свойства улучшались, а микроструктура пленок становилась более однородной, что приводило к снижению проницаемости водяного пара [29].

Анализ работ по изучению воздействия ультразвука на различные растворы полимеров и покрытий на их основе показал, что ультразвуковая обработка является относительно недорогим и экологически чистым процессом модификации, эффективен для модификации растворов биополимеров и покрытий на их основе. Модифицированные данным способом растворы полимеров и покрытия на их основе обладают лучшей влагостойкостью, большей гибкостью и прочностью. Поэтому приготовление растворов с использованием ультразвука в качестве предварительной обработки является улучшенной и удобной процедурой для улучшения многих свойств покрытий.

Материалы и методы

В качестве исходного материала использовали ПВС марки 098-10, производство Китай, регистрационный номер CAS: 9002-89-5, свойства представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства исходного ПВС

Table 1 – Properties of the initial PVS

Плотность	1,19–1,31 г/см ³
t плавления	220–230 °C
pH (4 % in water) :	5–7
Основное вещество	95,3 %
Гидролизное число	98,6 %
Температура разложения	160–200 °C

Таблица 2 – Технические характеристики Волна УЗТА-0.2/22-ОМ

Table 2 – Technical characteristics of the UZTA wave-0.2/22- OM

Мощность, ВА	не более 60
Частота ультразвуковых колебаний, кГц	24±2,4
Питание от сети переменного тока напряжением, В	220±22
Интенсивность ультразвукового воздействия, Вт/см ²	до 150
Время непрерывной работы, мин	60
Длина рабочего инструмента, мм	45
Диаметр цилиндрической части, мм	1,5

Объектами исследования являлись растворы ПВС с различной концентрацией в дистиллированной воде и пленки на их основе.

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА

Растворение ПВС в дистиллированной воде проводили на водяной бане при 90 °С в течение 60 минут. Полученные растворы подвергали обработке УЗ аппаратом «Волна УЗТА-0.2/22-ОМ», технические характеристики которого представлены в таблице 2.

Определение динамической вязкости растворов η проводили по формуле 1 Пуазейля. Для определения использовался прибор ВЗ-246, ГОСТ 33-2016 «Межгосударственный стандарт нефть и нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической и динамической вязкости».

$$\eta = \frac{\pi p r^4}{8 L V t}, \quad (1)$$

где p – давление, при котором происходит истечение жидкости из капилляра;

r – радиус капилляра;

L – длина капилляра;

V – объем жидкости, протекающей через капилляр;

t – время истечения жидкости в постоянном объеме.

Пленки из растворов ПВС получали методом полива, отверждение пленок проводили при комнатных условиях в течение 24 часов, толщина пленок составляла 2,5–3 мм.

Для определения толщины применяли толщинуметр С640 (фирма Labthink).

Определение физико-механических свойств пленок проводилось в соответствии с ГОСТ 14236-81 «Пластмассы. Метод испытания полимерных пленок на растяжение». Прибор – разрывная машина РМ-50 при скорости растяжения 100 мм/мин.

Результаты и обсуждение

На первом этапе исследовали динамическую вязкость растворов ПВС с концентраций 5, 7,5 и 10 % при различном времени ультразвуковой обработки, результаты представлены на рисунке 1. Как видно на рисунке, значения вязкости растворов одной концентрации изменяются незначительно, что можно отнести к погрешности подсчетов в связи с методом измерения. Также можно заметить, что вязкость раствора при увеличении концентрации на 2,5 процента увеличивается в 3 раза, тем самым показывая непропорциональность роста вязкости в зависимости от концентрации.



Рисунок 1 – Зависимость динамической вязкости Растворов ПВС с концентрацией 5 %, 7,5 % и 10 % от времени обработки ультразвуком

Figure 1 – Dependence of the dynamic viscosity of PVA solutions with concentrations of 5%, 7.5% and 10% on the time of ultrasound treatment

Ультразвуковая обработка способствовала кавитации раствора, но не изменяла значительно его вязкости. Вследствие этого можно предположить, что происходит частичная деструкция полимера в растворе, заключающаяся в дроблении полимерных цепей, то есть происходит снижение молекулярной массы макромолекул. Вероятно, это связано с тем, что обработка происходит в течение коротких промежутков времени и ультразвуковая обработка повлияла на разрыв водородных связей, тем самым высвободив межмолекулярные гидроксильные группы, активизировав образование новых связей.

На следующем этапе проводили исследования физико-механических характеристик пленок на основе растворов ПВС, обработанных УЗ. Результаты представлены на рисунках 2 и 3.



Рисунок 2 – Зависимость максимальной прочности на растяжении пленок на основе растворов ПВС от времени обработки УЗ

Figure 2 – Dependence of the maximum tensile strength of films based on PVA solutions on the time of ultrasonic treatment

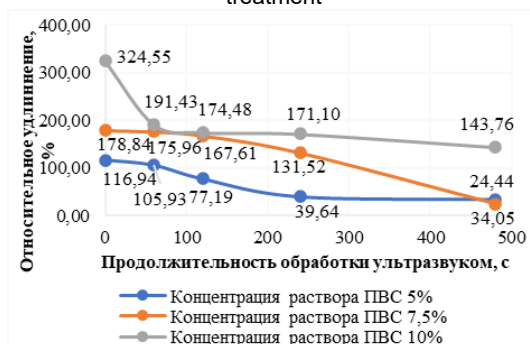


Рисунок 3 – Зависимость относительного удлинения пленок на основе растворов ПВС от времени обработки УЗ

Figure 3 – Dependence of the relative elongation of films based on PVA solutions on the time of ultrasonic treatment

Из представленных на графиках результатов видно, что при увеличении времени обработки УЗ максимальная прочность на разрыв и относительное удлинение уменьшаются. Можно предположить, что воздействие УЗ на растворы ПВС изменяет механизм его полимеризации, которая происходит с нарушением структуры кристаллической решётки, образуя множественные неструктурные соединения, без формирования единой цепочки. При дополнительном рассмотрении влияния обработки ультразвуком также установлена корреляция в сторону уменьшения как прочности, так и растяжения, что свидетельствует о разрушительном влиянии ультразвука на ПВС, связанной с разрушением цепочек на более короткие.

У образцов пленок, полученных из растворов с концентрацией ПВС 7,5 и 10 % при повышении времени обработки ультразвуком, удлинение уменьшается в несколько раз. У образца на основе раствора ПВС с концентрацией 5 % удлинение изменяется линейно. Это свидетельствует об однородности растворов с меньшей концентрацией и с более упорядоченной структурой полимеризации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При изучении влияния ультразвукового воздействия на свойства растворов ПВС и пленок на их основе было установлено: динамическая вязкость неполимеризованного раствора практически не изменяется при увеличении продолжительности обработки УЗ до 480 с; УЗ воздействие влияет на физико-механические свойства пленок. При увеличении вдвое продолжительности УЗ обработки на графиках видно линейное уменьшение прочностных свойств материала.

Предположительно, воздействие ультразвуком повлияло на водородные связи, образованные между молекулами ПВС, что и привело к уменьшению прочностных свойств; при разрыве водородных связей были высвобождены межмолекулярные гидроксильные группы, что предоставляет возможность для создания других связей. Однако для подтверждения данного предположения и для более детального анализа процессов, происходящих при воздействии ультразвука на растворы ПВС и покрытий на их основе, необходимо провести их структурный анализ, например с использованием метода инфракрасной спектроскопии. Таким образом, обработка растворов ПВС ультразвуком является одним из возможных методов модификации для формирования более однородных структур полимерных покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang, R., Wang, Y., Ma, D., Ahmed, S., Qin, W. & Liu, Y. (2019). Effects of ultrasonication duration and graphene oxide and nano-zinc oxide contents on the properties of polyvinyl alcohol nanocomposites. *Ultrasonics Sonochemistry*, 59, 104731. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104731>.
2. Kaur, K., Jindal, R., Maiti, M. & Mahajan, S. (2019). Studies on the properties and biodegradability of PVA/Trapa natans starch (N-st) composite films and PVA/N-st-g-poly (EMA) composite films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 123, 826–836. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.134>.
3. Premkumar, P.S. (2019). Preparation and electrical studies on pure and oxygen plasma treated polyvinyl alcohol films. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 2232–2237. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.12.023>.
4. Abdullah, Z.W., Dong, Y., Davies, I.J. & Barbhuiya, S. (2017). PVA, PVA Blends, and Their Nanocomposites for Biodegradable Packaging Application. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 56(12), 1307–1344. <https://doi.org/10.1080/03602559.2016.1275684>.
5. Abrol, H., Basri, A., Muhammad, F., Fernando, Y., Hafizulhaq, F., Mahardika, M., Sugianti, E., Sapuan, S.M., Ilyas, R.A. & Stephane, I. (2019). A simple method for improving the properties of the sago starch films prepared by using ultrasonication treatment. *Food Hydrocolloids*, 93, 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.02.012>.
6. Dong, Z., Dong, F., Dai, X., Mao, L. & Bai, Z. (2024). Development of polyvinyl alcohol based active inner coating reinforced with chlorogenic acid and functionalized layered clay for food packaging. *Progress in Organic Coatings*, 196, 108740. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108740>.
7. Jamali, A.R., Shaikh, A.A. & Chandio, A.D. (2024). Influence of Ultrasonication Treatment on Mechanical, Opti-

cal, and Physicochemical Properties of Polyvinyl-alcohol/cornstarch Biocomposite Thin Films. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 13(5), 053009. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/ad458e>.

8. Abrol, H., Anugrah, A.S., Hafizulhaq, F., Handayani, D., Sugianti, E. & Muslimin, A.N. (2018). Effect of nanofibers fraction on properties of the starch based biocomposite prepared in various ultrasonic powers. *International Journal of Biological Macromolecules*, 116, 1214–1221. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.05.067>.
9. Bagal, M.V., Saini, R.R., Shaikh, A.R.I., Patil, S., Mohod, A.V. & Pinjari, D.V. (2022). Effect of additives on degradation of poly vinyl alcohol (PVA) using ultrasound and microwave irradiation. *International Polymer Processing*, 38(1), 30–41. <https://doi.org/10.1515/ipp-2022-4232>.
10. Singha, P., Rani, R. & Badwaik, L.S. (2022). Sweet lime peel, polyvinyl alcohol- and starch-based biodegradable film: preparation and characterization. *Polymer Bulletin*, 80(1), 589–605. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-04040-x>.
11. Abrol, H., Atmajaya, A., Mahardika, M., Hafizulhaq, F., Kadriadi, Handayani, D., Sapuan, S.M. & Ilyas, R.A. (2020). Effect of ultrasonication duration of polyvinyl alcohol (PVA) gel on characterizations of PVA film. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 2477–2486. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.078>.
12. Majeed, Z., Mubashir, M., Show, P.L. & Manzoor, E. (2023). Biodegradation Study of Polyvinyl Alcohol-Based Biocomposites and Bionanocomposites. *Polyvinyl Alcohol-Based Biocomposites and Bionanocomposites*, 31–58. Portico. <https://doi.org/10.1002/9781119593218.ch2>.
13. Panda, P.K., Sadeghi, K. & Seo, J. (2022). Recent advances in poly (vinyl alcohol)/natural polymer based films for food packaging applications: A review. *Food Packaging and Shelf Life*, 33, 100904. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100904>.
14. Gómez-Aldapa, C.A., Velazquez, G., Gutierrez, M.C., Rangel-Vargas, E., Castro-Rosas, J. & Aguirre-Loredo, R.Y. (2020). Effect of polyvinyl alcohol on the physicochemical properties of biodegradable starch films. *Materials Chemistry and Physics*, 239, 122027. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122027>.
15. Gómez-Aldapa, C.A., Velazquez, G., Gutierrez, M.C., Rangel-Vargas, E., Castro-Rosas, J. & Aguirre-Loredo, R.Y. (2020). Effect of polyvinyl alcohol on the physicochemical properties of biodegradable starch films. *Materials Chemistry and Physics*, 239, 122027. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122027>.
16. Srinivasa, P.C., Ramesh, M.N., Kumar, K.R. & Tharanathan, R.N. (2003). Properties and sorption studies of chitosan–polyvinyl alcohol blend films. *Carbohydrate Polymers*, 53(4), 431–438. [https://doi.org/10.1016/s0144-8617\(03\)00105-x](https://doi.org/10.1016/s0144-8617(03)00105-x).
17. Pawan Kumar Agrawal, Pragya Sharma, V.K. Singh, Sakshi Chauhan. (2023). A Comprehensive Review on the Engineering of Biocompatible Polyvinyl Alcohol Composites with Enhanced Properties Using Carbonaceous Fillers. *J. Mater. Environ. Sci.*, 14(5), 560–581.
18. Teodorescu, M., Bercea, M. & Morariu, S. (2019). Biomaterials of PVA and PVP in medical and pharmaceutical applications: Perspectives and challenges. *Biotechnology Advances*, 37(1), 109–131. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.11.008>.
19. Das, D., Panesar, P.S., Saini, C.S. & Kennedy, J.F. (2022). Improvement in properties of edible film through non-thermal treatments and nanocomposite materials: A review. *Food Packaging and Shelf Life*, 32, 100843. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100843>.
20. Singla, M. & Sit, N. (2021). Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105506. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105506>.
21. Cai, B., Mazahreh, J., Ma, Q., Wang, F. & Hu, X.

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА

(2022). Ultrasound-assisted fabrication of biopolymer materials: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 209, 1613–1628. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.055>.

22. Lan, W., Liang, X., Lan, W., Ahmed, S., Liu, Y. & Qin, W. (2019). Electrospun Polyvinyl Alcohol/d-Limonene Fibers Prepared by Ultrasonic Processing for Antibacterial Active Packaging Material. *Molecules*, 24(4), 767. <https://doi.org/10.3390/molecules24040767>.

23. Abrial, H., Atmajaya, A., Mahardika, M., Hafizulhaq, F., Kadriadi, Handayani, D., Sapuan, S.M. & Ilyas, R.A. (2020). Effect of ultrasonication duration of polyvinyl alcohol (PVA) gel on characterizations of PVA film. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 2477–2486. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.078>.

24. Gogate, P.R. & Prajapat, A.L. (2015). Depolymerization using sonochemical reactors: A critical review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 27, 480–494. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.06.019>.

25. Liu, P., Wang, R., Kang, X., Cui, B. & Yu, B. (2018). Effects of ultrasonic treatment on amylose-lipid complex formation and properties of sweet potato starch-based films. *Ultrasonics Sonochemistry*, 44, 215–222. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.029>.

26. Abrial, H., Hartono, A., Hafizulhaq, F., Handayani, D., Sugiarti, E. & Pradipta, O. (2019). Characterization of PVA/cassava starch biocomposites fabricated with and without sonication using bacterial cellulose fiber loadings. *Carbohydrate Polymers*, 206, 593–601. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.054>.

27. Yang, Q.-Y., Lu, X.-X., Chen, Y.-Z., Luo, Z.-G. & Xiao, Z.-G. (2019). Fine structure, crystalline and physicochemical properties of waxy corn starch treated by ultrasound irradiation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 51, 350–358. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.09.001>.

28. Falsafi, S.R., Maghsoudlou, Y., Rostamabadi, H., Rostamabadi, M.M., Hamed, H. & Hosseini, S.M.H. (2019). Preparation of physically modified oat starch with different sonication treatments. *Food Hydrocolloids*, 89, 311–320. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.10.046>.

29. Gul, O., Saricaoglu, F.T., Besir, A., Atalar, I. & Yazici, F. (2018). Effect of ultrasound treatment on the properties of nano-emulsion films obtained from hazelnut meal protein and clove essential oil. *Ultrasonics Sonochemistry*, 41, 466–474. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.10.011>.

Информация об авторах

М. И. Губанова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Химия, технология полимеров и упаковочных решений» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Российский Биотехнологический Университет (РОСБИОТЕХ)».

Н. С. Баженов — ассистент кафедры «Химия, технология полимеров и упаковочных решений» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Российский Биотехнологический Университет (РОСБИОТЕХ)».

И. А. Кириш — доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия, технология полимеров и упаковочных решений» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Российский Биотехнологический Университет (РОСБИОТЕХ)».

О. А. Банникова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Химия, технология полимеров и упаковочных решений» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Российский Биотехнологический Университет (РОСБИОТЕХ)».

Н. С. Шмакова — кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия, технология полимеров и упаковочных решений» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Российский Биотехнологический Университет (РОСБИОТЕХ)».

вочных решений» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Российский Биотехнологический Университет (РОСБИОТЕХ)».

3. В. Широкова — студент кафедры «Химия, технология полимеров и упаковочных решений» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Российский Биотехнологический Университет (РОСБИОТЕХ)».

REFERENCES

1. Zhang, R., Wang, Y., Ma, D., Ahmed, S., Qin, W. & Liu, Y. (2019). Effects of ultrasonication duration and graphene oxide and nano-zinc oxide contents on the properties of polyvinyl alcohol nanocomposites. *Ultrasonics Sonochemistry*, 59, 104731. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104731>.

2. Kaur, K., Jindal, R., Maiti, M. & Mahajan, S. (2019). Studies on the properties and biodegradability of PVA/Trapa natans starch (N-st) composite films and PVA/N-st-g-poly (EMA) composite films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 123, 826–836. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.134>.

3. Premkumar, P.S. (2019). Preparation and electrical studies on pure and oxygen plasma treated polyvinyl alcohol films. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 2232–2237. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.12.023>.

4. Abdullah, Z.W., Dong, Y., Davies, I.J. & Barbhuiya, S. (2017). PVA, PVA Blends, and Their Nanocomposites for Biodegradable Packaging Application. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 56(12), 1307–1344. <https://doi.org/10.1080/03602559.2016.1275684>.

5. Abrial, H., Basri, A., Muhammad, F., Fernando, Y., Hafizulhaq, F., Mahardika, M., Sugiarti, E., Sapuan, S.M., Ilyas, R.A. & Stephane, I. (2019). A simple method for improving the properties of the sago starch films prepared by using ultrasonication treatment. *Food Hydrocolloids*, 93, 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.02.012>.

6. Dong, Z., Dong, F., Dai, X., Mao, L. & Bai, Z. (2024). Development of polyvinyl alcohol based active inner coating reinforced with chlorogenic acid and functionalized layered clay for food packaging. *Progress in Organic Coatings*, 196, 108740. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108740>.

7. Jamali, A.R., Shaikh, A.A. & Chandio, A.D. (2024). Influence of Ultrasonication Treatment on Mechanical, Optical, and Physicochemical Properties of Polyvinyl-alcohol/cornstarch Biocomposite Thin Films. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 13(5), 053009. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/ad458e>.

8. Abrial, H., Anugrah, A.S., Hafizulhaq, F., Handayani, D., Sugiarti, E. & Muslimin, A.N. (2018). Effect of nanofibers fraction on properties of the starch based biocomposite prepared in various ultrasonic powers. *International Journal of Biological Macromolecules*, 116, 1214–1221. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.05.067>.

9. Bagal, M.V., Saini, R.R., Shaikh, A.R.I., Patil, S., Mohod, A.V. & Pinjari, D.V. (2022). Effect of additives on degradation of poly vinyl alcohol (PVA) using ultrasound and microwave irradiation. *International Polymer Processing*, 38(1), 30–41. <https://doi.org/10.1515/ipp-2022-4232>.

10. Singha, P., Rani, R. & Badwaik, L.S. (2022). Sweet lime peel, polyvinyl alcohol- and starch-based biodegradable film: preparation and characterization. *Polymer Bulletin*, 80(1), 589–605. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-04040-x>.

11. Abrial, H., Atmajaya, A., Mahardika, M., Hafizulhaq, F., Kadriadi, Handayani, D., Sapuan, S.M. & Ilyas, R.A. (2020). Effect of ultrasonication duration of polyvinyl alcohol (PVA) gel on characterizations of PVA film. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 2477–2486. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.078>.

12. Majeed, Z., Mubashir, M., Show, P.L. & Manzoor, E. (2023). Biodegradation Study of Polyvinyl Alcohol-Based Biocomposites and Bionanocomposites. *Polyvinyl Alcohol*

hol-Based Biocomposites and Bionanocomposites, 31-58. Portico. <https://doi.org/10.1002/9781119593218.ch2>.

13. Panda, P.K., Sadeghi, K. & Seo, J. (2022). Recent advances in poly (vinyl alcohol)/natural polymer based films for food packaging applications: A review. *Food Packaging and Shelf Life*, 33, 100904. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100904>.

14. Gómez-Aldapa, C.A., Velazquez, G., Gutierrez, M.C., Rangel-Vargas, E., Castro-Rosas, J. & Aguirre-Loredo, R.Y. (2020). Effect of polyvinyl alcohol on the physicochemical properties of biodegradable starch films. *Materials Chemistry and Physics*, 239, 122027. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122027>.

15. Gómez-Aldapa, C.A., Velazquez, G., Gutierrez, M.C., Rangel-Vargas, E., Castro-Rosas, J. & Aguirre-Loredo, R.Y. (2020). Effect of polyvinyl alcohol on the physicochemical properties of biodegradable starch films. *Materials Chemistry and Physics*, 239, 122027. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122027>.

16. Srinivasa, P.C., Ramesh, M.N., Kumar, K.R. & Tharanathan, R.N. (2003). Properties and sorption studies of chitosan-polyvinyl alcohol blend films. *Carbohydrate Polymers*, 53(4), 431-438. [https://doi.org/10.1016/s0144-8617\(03\)00105-x](https://doi.org/10.1016/s0144-8617(03)00105-x).

17. Pawan Kumar Agrawal, Pragya Sharma, V.K. Singh, Sakshi Chauhan. (2023). A Comprehensive Review on the Engineering of Biocompatible Polyvinyl Alcohol Composites with Enhanced Properties Using Carbonaceous Fillers, *J. Mater. Environ. Sci.*, 14(5), 560-581.

18. Teodorescu, M., Bercea, M. & Morariu, S. (2019). Biomaterials of PVA and PVP in medical and pharmaceutical applications: Perspectives and challenges. *Biotechnology Advances*, 37(1), 109-131. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.11.008>.

19. Das, D., Panesar, P.S., Saini, C.S. & Kennedy, J.F. (2022). Improvement in properties of edible film through non-thermal treatments and nanocomposite materials: A review. *Food Packaging and Shelf Life*, 32, 100843. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100843>.

20. Singla, M. & Sit, N. (2021). Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105506. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105506>.

21. Cai, B., Mazahreh, J., Ma, Q., Wang, F. & Hu, X. (2022). Ultrasound-assisted fabrication of biopolymer materials: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 209, 1613-1628. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.055>.

22. Lan, W., Liang, X., Lan, W., Ahmed, S., Liu, Y. & Qin, W. (2019). Electrospun Polyvinyl Alcohol/d-Limonene Fibers Prepared by Ultrasonic Processing for Antibacterial Active Packaging Material. *Molecules*, 24(4), 767. <https://doi.org/10.3390/molecules24040767>.

23. Abrial, H., Atmajaya, A., Mahardika, M., Hafizulhaq, F., Kadriadi, Handayani, D., Sapuan, S.M. & Ilyas, R.A. (2020). Effect of ultrasonication duration of polyvinyl alcohol (PVA) gel on characterizations of PVA film. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 2477-2486. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.078>.

24. Gogate, P.R. & Prajapat, A.L. (2015). Depolymeri-

zation using sonochemical reactors: A critical review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 27, 480-494. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.06.019>.

25. Liu, P., Wang, R., Kang, X., Cui, B. & Yu, B. (2018). Effects of ultrasonic treatment on amylose-lipid complex formation and properties of sweet potato starch-based films. *Ultrasonics Sonochemistry*, 44, 215-222. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.029>.

26. Abrial, H., Hartono, A., Hafizulhaq, F., Handayani, D., Sugiarti, E. & Pradipta, O. (2019). Characterization of PVA/cassava starch biocomposites fabricated with and without sonication using bacterial cellulose fiber loadings. *Carbohydrate Polymers*, 206, 593-601. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.054>.

27. Yang, Q.-Y., Lu, X.-X., Chen, Y.-Z., Luo, Z.-G. & Xiao, Z.-G. (2019). Fine structure, crystalline and physicochemical properties of waxy corn starch treated by ultrasound irradiation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 51, 350-358. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.09.001>.

28. Falsafi, S.R., Maghsoudlou, Y., Rostamabadi, H., Rostamabadi, M.M., Hamed, H. & Hosseini, S.M.H. (2019). Preparation of physically modified oat starch with different sonication treatments. *Food Hydrocolloids*, 89, 311-320. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.10.046>.

29. Gul, O., Saricaoglu, F.T., Besir, A., Atalar, I. & Yazici, F. (2018). Effect of ultrasound treatment on the properties of nano-emulsion films obtained from hazelnut meal protein and clove essential oil. *Ultrasonics Sonochemistry*, 41, 466-474. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.10.011>.

Information about the authors

M. I. Gubanov — Candidate of Technical Sciences, docent, Associate Professor of the Departments of Chemistry, Technology of Polymers and Packaging Solutions, Federal State Educational Institution of Higher Education "Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)".

N. S. Bazhenov — Assistant of the Departments of Chemistry, Technology of Polymers and Packaging Solutions, Federal State Educational Institution of Higher Education "Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)".

I. A. Kirsh — Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Departments of Chemistry, Technology of Polymers and Packaging Solutions, Federal State Educational Institution of Higher Education "Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)".

O. A. Bannikova — Candidate of Technical Sciences, docent, Associate Professor of the Departments of Chemistry, Technology of Polymers and Packaging Solutions, Federal State Educational Institution of Higher Education "Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)".

N. S. Shmakova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Departments of Chemistry, Technology of Polymers and Packaging Solutions, Federal State Educational Institution of Higher Education "Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)".

Z. V. Shirokhova — Student of the Departments of Chemistry, Technology of Polymers and Packaging Solutions, Federal State Educational Institution of Higher Education "Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)".

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.