





## Современные аспекты исследования влияния физических воздействий на свойства полимеров





|                        |              |  |   |
|------------------------|--------------|--|---|
| Марина И. Губанова     | <sup>1</sup> | <a href="mailto:gubanovami@mgupp.ru">gubanovami@mgupp.ru</a>   |  0000-0003-3547-716X |
| Анастасия О. Соловьева | <sup>1</sup> | <a href="mailto:kytiama@mail.ru">kytiama@mail.ru</a>           |  0000-0003-3701-5962 |
| Ирина А. Кирш          | <sup>1</sup> | <a href="mailto:irina-kirsh@ya.ru">irina-kirsh@ya.ru</a>       |  0000-0003-3370-4226 |
| Ольга А. Банникова     | <sup>2</sup> | <a href="mailto:bannikovaao@mgupp.ru">bannikovaao@mgupp.ru</a> |  0000-0003-0633-0003 |

<sup>1</sup> Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 11, Москва, 125080, Россия

**Аннотация.** Статья посвящена анализу современных аспектов физического воздействия на полимерные материалы и их качественные характеристики. В процессе изучения литературы были выделены как положительные, так и отрицательные стороны физического воздействия на структуру, и качество полимерных материалов. В качестве физических методов воздействия были рассмотрены: ультрафиолетовое облучение, ионизирующее и микроволновое излучения, лазерное воздействие, механическое нагружение, термическая обработка и другие. Описан опыт применения физического воздействия для расширения области применения полимеров, включая повышение прочности, термостойкости, устойчивости к коррозии и др. Затронуты риски, которые могут возникать в результате воздействия на различные структуры полимерных материалов, в том числе применяемых для упаковки пищевых продуктов. Обозначена перспективность изучения влияния микроволнового излучения, как вида физического воздействия на полимеры, с целью снижения негативных последствий. Данная статья может быть полезна специалистам, занимающимся разработкой и производством полимерных материалов, а также для научных исследователей, занимающихся изучением физических свойств материалов.

**Ключевые слова:** полимеры, полимерные материалы, микроволновое излучение, физическое воздействие, сверхвысокочастотное излучение, модификация полимеров.

## Modern aspects of the study of the influence of physical effects on the properties of polymers

|                        |              |  |   |
|------------------------|--------------|--|---|
| Marina I. Gubanova     | <sup>1</sup> | <a href="mailto:gubanovami@mgupp.ru">gubanovami@mgupp.ru</a>   |  0000-0003-3547-716X |
| Anastasia O. Solovyova | <sup>1</sup> | <a href="mailto:kytiama@mail.ru">kytiama@mail.ru</a>           |  0000-0003-3701-5962 |
| Irina A. Kirsh         | <sup>1</sup> | <a href="mailto:irina-kirsh@ya.ru">irina-kirsh@ya.ru</a>       |  0000-0003-3370-4226 |
| Olga A. Bannikova      | <sup>2</sup> | <a href="mailto:bannikovaao@mgupp.ru">bannikovaao@mgupp.ru</a> |  0000-0003-0633-0003 |

<sup>1</sup> Biotechnological University, Volokolamskoye Shosse, 11, Moscow, 125080, Russia

**Abstract.** The article is devoted to the analysis of modern aspects of physical impact on polymer materials and their qualitative characteristics. In the process of studying the literature, both positive and negative sides of physical impact on the structure and quality of polymer materials were identified. The following physical methods of exposure were considered: ultraviolet irradiation, ionizing and microwave radiation, laser exposure, mechanical loading, heat treatment and others. The experience of applying physical impact to expand the field of application of polymers, including increasing strength, heat resistance, corrosion resistance, etc., is described. The risks that may arise as a result of exposure to various structures of polymer materials, including those used for food packaging, are touched upon. The prospects of studying the effect of microwave radiation as a type of physical impact on polymers in order to reduce negative consequences are indicated. This article may be useful for specialists involved in the development and production of polymer materials, as well as for scientific researchers studying the physical properties of materials.

**Keywords:** polymers, polymer materials, microwave radiation, physical impact, ultrahigh frequency radiation, modification of polymers.

### Введение

Бурное развитие естественных наук, наблюдающееся в последние десятилетия, основано на значительном расширении технических возможностей исследований и тесном переплетении достижений химии, физики, биологии и других областей естествознания. Это способствовало тому, что во второй

половине XX в. появились новые области химии (лазерная химия, плазменная и фотохимия, химия высоких давлений). В последние 10 – 15 лет уже в XXI в. к ним присоединилось перспективное направление химии, в которой используется сверхвысокочастотное (СВЧ) излучение, возникшее на стыке физики и химии. Данное направление включает в себя химические

Для цитирования

Губанова М.И., Соловьева А.О., Кирш И.А., Банникова О.А. Современные аспекты исследования влияния физических воздействий на свойства полимеров // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 3. С. 165–172. doi:10.20914/2310-1202-2023-3-165-172

For citation

Gubanova M.I., Solovyova A.O., Kirsh I.A., Bannikova O.A. Modern aspects of the study of the influence of physical effects on the properties of polymers. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2023. vol. 85. no. 3. pp. 165–172. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2023-3-165-172

превращения с участием твердых диэлектриков и жидкостей, связанные с использованием энергии микроволнового (или СВЧ) поля [1].

Установлено, что микроволновое излучение способно в десятки и сотни раз ускорять многие химические реакции, вызывать быстрый объемный нагрев жидких и твердых образцов, эффективно (быстро и полностью) удалять влагу из твердых препаратов, в том числе высокопористых, модифицировать свойства различных сорбентов. Использование энергии СВЧ вместо применяемой в настоящее время тепловой энергии теплоносителей в промышленных установках позволяет значительно упростить технологические схемы, исключить все процессы и устройства, связанные с подготовкой теплоносителя, а также снизить вредные выбросы в атмосферу [2]. Данные положительные характеристики этого метода позволяют широко применять СВЧ излучение при производстве полимерных материалов. Ограничения использования СВЧ-излучения в таком случае в основном связаны с отсутствием оборудования для промышленного применения. А также на данном этапе развития науки мало изученным является вопрос негативного влияния СВЧ излучения на полимерные материалы [3].

В сравнении с СВЧ излучением, широко изучен вопрос влияния других методов физического воздействия на полимерные материалы. Среди таких методов можно выделить: механическое, термическое, электрическое, оптическое и радиационное воздействие [4]. Каждый из этих методов может привести к изменению структуры и свойств полимеров, что может быть полезно в различных областях применения или же повлечь за собой негативные последствия.

Электрические методы физического воздействия включают в себя различные способы электрической обработки, такие как электрическое поле, электрический ток, электростатический разряд и т. д. Они могут привести к изменению электрических свойств полимеров, могут увеличить их проводимость, диэлектрическую проницаемость и т. д. [5].

Оптические методы включают в себя изменение световых свойств полимеров, таких как прозрачность, цвет и т. д. Они могут использоваться для улучшения эстетических свойств полимеров или для создания новых функциональных свойств, таких как фоточувствительность [6].

Другой распространенный метод физического воздействия на полимеры – термическая обработка. При таком виде обработки полимеров

происходит изменение их молекулярной структуры и механических свойств [7]. Особенно это касается термопластичных полимеров, которые могут быть переработаны многократно. Термическая обработка может быть проведена при высокой или низкой температуре в зависимости от требуемых свойств материала [8].

Изменение свойств полимеров с помощью радиации, включая ультрафиолетовую, гамма- и электронную обработку, также позволяет получать полимеры с новыми свойствами и улучшенными характеристиками. Наноструктурирование полимеров, включая наночастицы и нановолокна, позволяет улучшать их механические, электрические и оптические свойства [9]. Модификация поверхности полимеров, включая плазменную обработку, обработку лазером и химическую функционализацию, позволяет улучшать адгезию, влагостойкость и другие свойства. Изменение морфологии полимеров, включая супрамолекулярную самоорганизацию и пространственное направление полимерных цепей, позволяет улучшать их оптические, электрические и механические свойства [10].

Используемый процесс физического воздействия на полимеры представляет собой нагрев в электрической печи при температуре выше 1000 градусов в течение нескольких дней, что делает его невозможным в промышленных масштабах. В связи с этим использование микроволнового излучения в качестве источника нагрева явилось большим шагом вперед в синтезе углеродных ксерогелей [11]. Первоначально микроволновый нагрев применялся в качестве метода сушки после реакций синтеза для удаления растворителя, оставшегося во внутренней структуре геля. В настоящее время эта технология используется для всего процесса синтеза [12], в результате чего время синтеза сокращается с 5 дней (необходимых для обычного нагрева) до 5 часов при использовании микроволновой технологии. Это делает процесс намного более экономически эффективным и дает возможность синтезировать органические ксерогели в больших масштабах с помощью простой и быстрой процедуры. Микроволновое устройство, используемое для синтеза углеродных ксерогелей, представляет собой многорежимную микроволновую печь (лабораторная разработка и конструкция) с магнетроном мощностью 1000 Вт на частоте 2,45 ГГц. Он также оснащен термпарой типа К, которая позволяет контролировать и контролировать температуру с помощью ПИД-регулятора, который подключен к термопаре и регулирует количество подаваемой мощности [13–15].

## Обсуждение

Введение многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) и СВЧ-модификация полиэфирной матрицы влияет на показатели прочности, процессы структурообразования, морфологию и термостойкость полимерного композитного материала [16–18]. Введение МУНТ в полиэфирную матрицу повышает прочность композита, что, вероятно, связано с изменением структуры композита в результате химического взаимодействия функциональных групп на поверхности МУНТ с олигомером, что подтверждается данными дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Микроволновая обработка полиэфирной матрицы на стадии олигомера инициировала реакцию отверждения; при этом наблюдалось изменение характера разрушения образца с образованием углублений, свидетельствующее о способности композита противостоять образованию микротрещин. Обработка полимеризованного композита в поле СВЧ изменила его структуру за счет релаксационных процессов, повысив прочностные показатели [19].

В работе [20] изучалась возможность модификации эпоксидного композита с помощью микроволнового излучения на стадии олигомера. Оптимальная мощность и время обработки привели к увеличению прочности композита на изгиб и растяжение на 26% и 29% соответственно. На основе результатов, полученных при помощи сканирующего электронного микроскопа, исследователями было отмечено изменение структуры композита. СВЧ-обработка привела к увеличению доли пластического разрушения, которое авторы связывают с образованием более плотной трехмерной сшитой структуры вокруг частиц наполнителя [21].

Использование микроволнового излучения в качестве метода нагрева не только значительно сокращает время синтеза и делает его масштабируемым, но и позволяет модифицировать режим нагрева как метод управления свойствами получаемых материалов. С одной стороны, изменение температуры и / или времени синтеза может привести к получению материалов с другими свойствами [22]. С другой стороны, микроволновый нагрев позволяет синтезировать различные количества образцов при правильном выборе мощности микроволн [23]. Несмотря на то, что эти переменные можно использовать для управления свойствами, их значимость не так велика, как у химических переменных, что является преимуществом для применения процесса в промышленных масштабах. Подобно обычному методу синтеза, микроволновый нагрев позволяет модифицировать химические параметры, что включает в себя концентрацию всех используемых реагентов. Одной из основных химических переменных является pH раствора прекурсора [24].

Существует практика применения микроволнового излучения для улучшения эксплуатационных характеристик полимеров. Среди возможных наиболее важной является концепция о возможности использования СВЧ-излучения для инициирования перестроения структуры полярных полимеров с целью получения необходимых в конкретном случае свойств. Проводилась обработка ПВХ-пленки сверхвысокочастотным излучением с удельной энергией 205,8 кДж/кг, с целью определения механизма перестроения ее структуры (рисунок 1). Сравнительный анализ структур пленок показал, что у необработанной СВЧ-излучением ПВХ-пленки преобладает аморфная структура (рисунок 1а, в). Под воздействием СВЧ-излучения в ПВХ изменяется ориентация боковых ответвлений его макромолекул, что способствует росту числа центров кристаллизации. В результате уменьшается общая площадь аморфных областей структуры в пользу вновь образующейся кристаллической фазы (рисунок 1б), что сопровождается повышением степени упорядоченности в расположении макромолекул полимера (рисунок 1г). Молекулы ПВХ начинают перестраиваться в параллельные строчки (рисунок 1г), что является признаком роста его кристалличности, обеспечивающего улучшение физико-механических свойств ПВХ пленки [25].

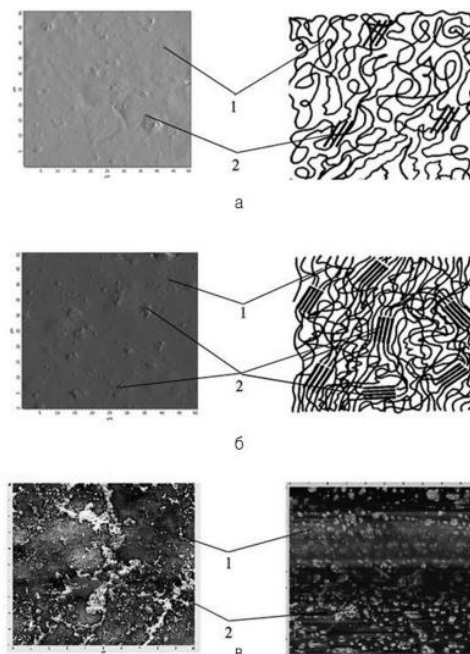


Рисунок 1. Изображения структуры ПВХ-пленки ( $\times \cdot 106$ ) 1 – аморфная область; 2 – область кристаллизации; а, в – без СВЧ-обработки; б, г – после СВЧ-обработки (удельная энергия излучения 205,8 кДж/кг)

Figure 1. Images of the PVC film structure ( $\times \cdot 106$ ) 1 – amorphous region; 2 – crystallization region; а, в – without microwave treatment; б, г – after microwave treatment (specific radiation energy 205.8 kJ/kg)

Также существуют расчетные результаты рентгеновской спектроскопии иллюстрирующие, что доля кристаллической фазы поливинилхлорида, обработанного удельной энергией СВЧ-излучения 205,8 кДж/кг, лежит в интервале 85–88%, что немного выше доли кристалличности необработанного поливинилхлорида (рисунок 2) [25].

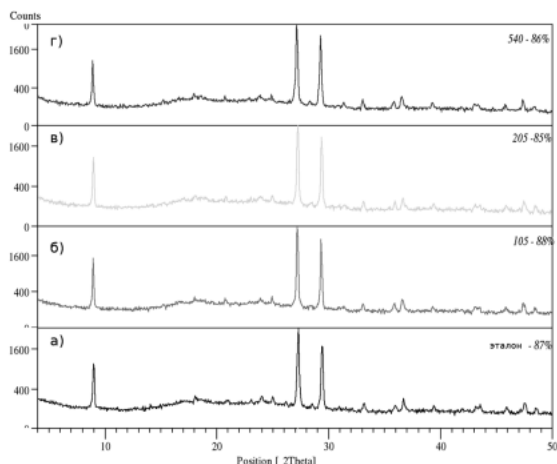


Рисунок 2. Рентгеновские дифрактограммы поливинилхлорида с различной обработкой: а – эталон, б – подвергнутого воздействию энергии 102,5 кДж/кг, в – 205,8 кДж/кг, г – 540 кДж/кг

Figure 2. X-ray diffractograms of polyvinyl chloride with various treatments: а – standard, б – exposed to energy 102.5 kJ/kg, в – 205.8 kJ/kg, г – 540 kJ/kg

При эксплуатации многие полимеры могут деградировать и терять свои свойства. Деструкция полимеров может быть вызвана механическими воздействиями, ультрафиолетовым излучением, тепловым воздействием и т. д. Отрицательное влияние может проявляться в изменении механических свойств, термостойкости, устойчивости к химическим воздействиям и других свойств, что может привести к потере функциональности материала [26]. Физическая модификация полимеров может происходить на разных стадиях их жизненного цикла: в процессе синтеза, влияние на переработку, улучшение свойств и при эксплуатации. В процессе синтеза полимеры могут быть модифицированы путем добавления различных мономеров, катализаторов или ингибиторов, что может привести к изменению их свойств, таких как прочность, термостойкость, устойчивость к химическим воздействиям и т. д. [27].

Механическая обработка является одним из методов физического воздействия на полимеры. Она может проводиться в разных формах, например, растяжение, сжатие, изгиб, удар и т. д. В результате механической обработки полимерных материалов может происходить изменение их структуры и свойств [28]. Например, при растяжении полимеры могут становиться

более прочными и упругими, а также приобретать новые свойства, такие как память формы. В то же время, излишнее механическое напряжение может приводить к разрушению полимеров под воздействием высоких температур. При нагревании полимеров до высоких температур происходят различные процессы, которые могут привести к разрушению материала. Одним из таких процессов является термическое разложение полимера. При этом высокотемпературные молекулы начинают распадаться на более мелкие фрагменты, что приводит к образованию газов и понижению молекулярной массы полимера. Эти процессы могут сопровождаться образованием свободных радикалов, которые способствуют дальнейшему разрушению материала [29, 30].

Термические методы включают в себя нагревание, охлаждение, термообработку и т. д. Нагревание также может привести к изменению молекулярной структуры полимеров, что может привести к улучшению их свойств или наоборот, к деградации материала [31]. Охлаждение может привести к изменению твердости и хрупкости полимеров.

Также высокие температуры могут приводить к изменению морфологии полимера, что в свою очередь может влиять на его механические свойства. Например, при нагревании полиэтилена до температур выше его температуры плавления происходит изменение кристаллической структуры материала, что приводит к уменьшению его прочности и упругости [32]. В целом, высокие температуры являются одним из наиболее опасных факторов для полимерных материалов, и необходимо учитывать их воздействие при выборе материала и проектировании конструкций [33].

Кроме термического разложения, при высоких температурах происходит диффузия различных веществ, которые могут вступать в химические реакции с полимером и приводить к его разрушению. При нагревании полиэтилена в присутствии кислорода происходит окисление материала, что может привести к образованию трещин и дальнейшему разрушению [34].

Но в тоже время изучено, что термическая обработка может приводить к увеличению кристалличности полимеров, что повышает их прочность и жесткость. Такой вид обработки также можно применять для изменения формы полимерных материалов и для формовки изделий или приведения их в нужную форму. Для этого используются специальные оборудование, такие как экструдеры, пресс-формы и другие. Но в то же время, слишком высокая температура может привести к деградации полимерных материалов и ухудшению их свойств [35].

Механические методы воздействия включают в себя различные способы механической обработки, такие как деформация, растяжение, изгиб, сжатие и т. д. Они могут привести к изменению физических свойств полимеров, таких как прочность, упругость, твердость и т. д. Влияние механических методов воздействия может быть как положительным, так и отрицательным, в зависимости от того, как именно они применяются [36].

Ультрафиолетовое излучение может приводить к изменению механических свойств полимеров, таких как прочность на разрыв и усталость материала [37]. Для того чтобы избежать нежелательных изменений в свойствах полимерных материалов, часто применяют ультрафиолетостойкие добавки, которые защищают материалы от действия ультрафиолетовых лучей [38]. Также можно использовать специальные методы обработки, например, лакирование, покрытие пленкой или применение специальных покрытий.

Многочисленные исследования, свидетельствуют от том, что в результате воздействия микроволн на упаковку, состоящую из полимерных материалов, происходит миграция вредных веществ в пищевую продукцию [39]. Исследовано, что приоритетными контаминантами, в таком случае являются: из полипропилена – ацетон, метанол, кадмий, медь, никель, свинец и цинк; из полистирола – свинец, никель и хром; из полиэтилентерефталата – гексан, ацетон, бензол, диоктилфталат, дибутилфталат, железо, медь; из меламина – формальдегид, из силикона – изопропанол, железо, цинк, медь и хром; из керамики – кадмий, медь, свинец, цинк, алюминий, бор. Также установлено, что под влиянием микроволн происходит увеличение миграции в модельные среды большинства исследованных металлов: железа, никеля в 100% случаев; меди – 72,2%, бора – 71,4%, свинца – 69,2%, марганца – 66,6%,

кадмия – 64,3%, алюминия – 60%, цинка – 58,3% и хрома – 50% [34]. Данные результаты свидетельствуют о негативном воздействии СВЧ-излучения на полимерные материалы, используемые в качестве упаковки для пищевой продукции [40].

### Заключение

Анализ научно-технической литературы в области изучения влияния физического воздействия на полимерные материалы свидетельствует о необходимости и важности исследования специфики негативного влияния таких воздействий. Наиболее мало изученным является вопрос безопасности использования микроволнового излучения, так как есть свидетельства, сообщающие о возникновении высоких рисков при данном способе физического воздействия. Накопленный к настоящему времени экспериментальный материал позволил приступить к созданию теоретических основ для определения степени важности негативного влияния СВЧ-излучения на полимерные материалы. В течение последних нескольких лет появились исследования посвященные проблеме ухудшения качественных показателей полимеров в результате определенных видов физического воздействия на них. Однако, исследования в этом направлении нельзя считать полными.

Так, дискуссионным остается вопрос о безопасности использования излучения СВЧ-диапазона в процессе производства и эксплуатации полимерной продукции. Экспериментальные данные по исследованию миграции вредных веществ из полимерной упаковки непосредственно в пищевую продукцию приводятся в литературе редко. Наиболее изучена миграция мономеров, например, винилхлорида и некоторых других добавок из ПВХ-материалов, что вызвано их широким использованием в пищевой промышленности и установлением канцерогенной опасности указанного мономера.

### Литература

- 1 Шавшукова С.Ю., Вихарева И.Н., Удалова Е.А. Применение микроволнового излучения в химии полимеров // Башкирский химический журнал. 2010. Т. 17. № 2. С. 116–120.
- 2 Шаганов О.Т., Янов В.В., Зенитова Л.А. Исследование поведения полиэтилена, наполненного шунгитом в условиях климатических воздействий // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 19. № 15. С. 113–116.
- 3 Калганова С.Г., Архангельский Ю.С., Лаврентьев В.А., Тригорный С.В. Научные основы модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле // Вопросы электротехнологии. 2017. № 1. С. 26–35.
- 4 Абуталипова Е.М., Кузеев И.Р., Шулаев Н.С. Улучшение эксплуатационных свойств изоляционных покрытий с использованием сверхвысокочастотного излучения // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2013. № 4. С. 316–327.
- 5 Насыбуллин А.Р. Разработка и исследование СВЧ-устройств для технологий переработки полиэтилентерефталата. 2012.
- 6 Банный В.А., Игнатенко В.А. Применение полимерных радиопоглощающих материалов в решении проблемы электромагнитной безопасности // Проблемы здоровья и экологии. 2016. № 3 (49). С. 9–13.
- 7 Бокова Е.С., Сайдук А.А., Андрианова Г.П. Влияние электромагнитной обработки на условия получения и свойства полимер-полимерных комплексов на основе полиакриловой кислоты и мочевиноформальдегидного сополимера // Пластические массы. 2007. № 2. С. 44–47.
- 8 Сулейманов Д.Ф., Сулейманова А.А. Конструкция вальцов для получения рифленых листов из поливинилхлоридных материалов // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2019. № 16. С. 8–10.
- 9 Бараненко Д.А. и др. Влияние микроволновой обработки на показатели качества и безопасности упакованных пищевых ингредиентов с низким содержанием влаги // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2017. № 3. С. 3–9.

- 10 Мудров А.Н. Влияние микроволнового нагрева на кинетические закономерности процесса радикальной полимеризации виниловых мономеров. 2013.
- 11 Абуталипова Е.М. и др. Влияние энергии СВЧ-излучения на эволюцию структуры полимерных материалов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2015. №. 4. С. 151–162.
- 12 Рахманкулов Д.Л., Шавшукова С.Ю., Выхарева И.Н. Применение микроволнового излучения в пищевой отрасли // Башкирский химический журнал. 2008. Т. 15. №. 1. С. 73–75.
- 13 Горин Д.А. и др. Влияние микроволнового излучения на полимерные микрокапсулы с неорганическими наночастицами // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. №. 2. С. 45.
- 14 Кузнецов Р.Е. Влияние микроволнового излучения на синтез и свойства водорастворимых полимеров N-винилпирролидона и акриламида. 2009.
- 15 Абуталипова Е.М., Бугай Д.Е. Научные основы применения свч излучения для улучшения технологических свойств полимерных изоляционных покрытий // Нефтегазовое дело. 2015. Т. 13. №. 3. С. 94–98.
- 16 Симилайская Б.С. Некоторые аспекты миграции химических веществ под влиянием СВЧ-излучения // Токсикологический вестник. 2011. №. 2 (107). С. 42–45.
- 17 Абуталипова Е.М. и др. Исследование влияния энергии электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на структуру и свойства полимерных изоляционных материалов // Нефтегазохимия. 2016. №. 4. С. 51–55.
- 18 Нефедов В.Н. и др. Перспективы применения наукоёмких микроволновых технологий // T-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. 2017. Т. 11. №. 6. С. 33–37.
- 19 Катаева С.Е. О санитарно-химических исследованиях полимерных материалов, применяемых в народном хозяйстве // Гигиена и санитария. 1992. №. 2. С. 57–58.
- 20 Баронин Г.С. и др. Влияние СВЧ-излучения на формирование структурно-механических свойств модифицированных полимер-углеродных материалов при твердофазной экструзии // Прикладная математика & Физика. 2011. Т. 23. №. 11 (106). С. 123–128.
- 21 Чихачева И.П. и др. Влияние микроволнового излучения на фазовое состояние и свойства поливинилового спирта // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2010. Т. 53. №. 3. С. 93–97.
- 22 Завражин Д.О., Попов А.Г. Влияние СВЧ-излучения на формирование структуры с улучшенными физико-механическими характеристиками модифицированных полимер-углеродных материалов при твердофазной обработке давлением // Перспективные материалы. 2011. №. 11. С. 389–395.
- 23 Сулейманов Д.Ф. и др. Технология изменения характеристик изоляционных материалов на основе поливинилхлорида под влиянием микроволнового излучения // Sciences of Europe. 2017. №. 13–2 (13). С. 94–98.
- 24 Румянцева Ю.В. и др. Влияние микроволнового излучения на радикальную полимеризацию акриламида в растворе в режиме динамической мощности // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2012. Т. 55. №. 12. С. 114–117.
- 25 Фазуллин Д.Д., Маврин Г.В., Шайхiev И.Г. Воздействие СВЧ-излучения на тонкопленочные полимерные мембраны // Электронная обработка материалов. 2019. Т. 55. №. 3. С. 58–65.
- 26 Abutalipova E.M. et al. Investigation of the effect of microwave-radiation energy flux on the structure and properties of polymeric insulating materials // Chemical and Petroleum Engineering. 2016. V. 52. №. 3–4. P. 212–216.
- 27 Afzal H.M. et al. Influence of microwave irradiation on thermal properties of PVA and PVA/graphene nanocomposites // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2020. V. 139. P. 353–365.
- 28 Rawat N.K., Ghosal A., Ahmad S. Influence of microwave irradiation on various properties of nanopolythiophene and their anticorrosive nanocomposite coatings // RSC Advances. 2014. V. 4. №. 92. P. 50594–50605.
- 29 Heidarpour M., Movahed S.O., Jourabchi S. The effect of microwave irradiation on the flotation of the selected polymers as a potential solution for plastic recycling // Journal of Polymers and the Environment. 2021. V. 29. P. 3130–3144.
- 30 Икромов Н.А. Исследования физико-механических свойств радиационно модифицированных эпоксидных композиций и покрытий на их основе // Universum: технические науки. 2021. №. 12-6 (93). С. 59-60.
- 31 Аристов В.М., Аристова Е.П. Влияние структурной неоднородности на физические свойства частично кристаллических полимеров // Пластические массы. 2016. №. 3–4. С. 15–18.
- 32 Столяренко В.И., Ольшанский В.И. Анализ элементов технологии производства геленков из композиционного материала на основе стеклоткани // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2021. №. 2 (41). С. 81–89.
- 33 Дедов А.В., Черноусова Н.В. Эффективность снижения скорости десорбции пластификатора из поливинилхлорида // Пластические массы. 2017. №. 1–2. С. 12–14.
- 34 Аристов В.М., Аристова Е.П. Влияние релаксационных явлений на физические свойства полимерных материалов // Пластические массы. 2017. №. 5–6. С. 3–6.
- 35 Негматов С.С. и др. Исследование вязкоупругих и адгезионно-прочностных свойств и разработка эффективных вибропоглощающих композиционных полимерных материалов и покрытий машиностроительного назначения // Пластические массы. 2020. №. 7–8. С. 32–36.
- 36 Студцов В.Н., Черемухина И.В. Оценка физико-химической активности различных способов физической модификации // Фундаментальные исследования. 2016. №. 2–2. С. 299–302.
- 37 Черниговская М.А. Способы модификации полимерных материалов для формирования гибридных композитов с протонпроводящими свойствами // Вестник АНГТУ №. 2019. Т. 13. С. 101.
- 38 Аккубикова В.А., Даутова И.Ф. Создание композиционных полимерных материалов методами модификации // Образование, наука и технологии: проблемы и перспективы. 2020. С. 120–122.
- 39 Симилайская Б.С. Некоторые аспекты миграции химических веществ под влиянием СВЧ-излучения // Токсикологический вестник. 2011. №. 2 (107). С. 42-45.
- 40 Тверитникова И.С. и др. Модификация полимерных смесей с сополимерами для получения полимерных композиций с улучшенными деформационно-прочностными характеристиками // Health, Food & Biotechnology. 2019. Т. 1. №. 3. С. 92–105.
- 41 Абдукаримова С.А., Бозорова Н.Х., Тураев Э.Р. Особенности модификации полипропилена // Universum: технические науки. 2022. №. 1–2 (94). С. 80–84.

42 Nakajima H., Dijkstra P., Loos K. The recent developments in biobased polymers toward general and engineering applications: Polymers that are upgraded from biodegradable polymers, analogous to petroleum-derived polymers, and newly developed // *Polymers*. 2017. V. 9. №. 10. P. 523.

43 Кирш И.А. и др. Регулирование физико-механических свойств вторичного полиэтилентерефталата путем химической и физической модификации // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. №. 7. С. 79–82.

44 Жазаева Е.М. Влияние термической обработки на макроскопические характеристики смесей полимеров // Нальчик: КБГУ им. ХМ Бербекова. 2015.

## References

1 Shavshukova S.Yu., Vikhareva I.N., Udalova E.A. Application of microwave radiation in polymer chemistry. *Bashkir Chemical Journal*. 2010. vol. 17. no. 2. pp. 116–120. (in Russian).

2 Shaganov O.T., Yanov V.V., Zenitova L.A. Investigation of the behavior of polyethylene filled with shungite under climatic influences. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2016. vol. 19. no. 15. pp. 113–116. (in Russian).

3 Kalganova S.G., Arkhangelsky Yu.S., Lavrentiev V.A., Trigorly S.V. Scientific principles of modification of polymer materials in a microwave electromagnetic field. *Issues of electrotechnology*. 2017. no. 1. pp. 26–35. (in Russian).

4 Abutalipova E.M., Kuzev I.R., Shulaev N.S. Improvement of operational properties of insulating coatings using ultrahigh-frequency radiation. *Electronic scientific journal Oil and Gas business*. 2013. no. 4. pp. 316–327. (in Russian).

5 Nasybullin A.R. Development and research of microwave devices for polyethylene terephthalate processing technologies. 2012. (in Russian).

6 Banny V.A., Ignatenko V.A. Application of polymer radio-absorbing materials in solving the problem of electromagnetic safety. *Problems of health and ecology*. 2016. no. 3 (49). pp. 9–13. (in Russian).

7 Bokova E.S., Saiduk A.A., Andrianova G.P. Influence of electromagnetic treatment on the conditions for obtaining and properties of polymer-polymer complexes based on polyacrylic acid and urea-formaldehyde copolymer. *Plastic masses*. 2007. no. 2. pp. 44–47. (in Russian).

8 Suleymanov D.F., Suleymanova A.A. Design of rollers for producing corrugated sheets from polyvinyl chloride materials. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2019. no. 16. pp. 8–10. (in Russian).

9 Baranenko D.A. et al. The effect of microwave processing on the quality and safety of packaged food ingredients with low moisture content. *Scientific journal of NIU ITMO. The series "Processes and devices of food production"*. 2017. no. 3. pp. 3–9. (in Russian).

10 Mudrov A.N. The effect of microwave heating on the kinetic laws of the process of radical polymerization of vinyl monomers. 2013. (in Russian).

11 Abutalipova E.M. et al. The effect of microwave radiation energy on the evolution of the structure of polymer materials. *Problems of collection, preparation and transportation of oil and petroleum products*. 2015. no. 4. pp. 151–162. (in Russian).

12 Rakhmankulov D.L., Shavshukova S.Yu., Vikhareva I.N. Application of microwave radiation in the food industry. *Bashkir Chemical Journal*. 2008. vol. 15. no. 1. pp. 73–75. (in Russian).

13 Gorin D.A. et al. The effect of microwave radiation on polymer microcapsules with inorganic nanoparticles. *Letters to ZhTF*. 2006. vol. 32. no. 2. pp. 45. (in Russian).

14 Kuznetsov R.E. The effect of microwave radiation on the synthesis and properties of water-soluble polymers of N-vinylpyrrolidone and acrylamide. 2009. (in Russian).

15 Abutalipova E.M., Bugai D.E. Scientific foundations of the use of microwave radiation to improve the technological properties of polymer insulation coatings. *Oil and gas business*. 2015. vol. 13. no. 3. pp. 94–98. (in Russian).

16 Simileyskaya B.S. Some aspects of chemical migration under the influence of microwave radiation. *Toxicological Bulletin*. 2011. no. 2 (107). pp. 42–45. (in Russian).

17 Abutalipova E.M. et al. Investigation of the effect of electromagnetic radiation energy in the microwave range on the structure and properties of polymer insulation materials. *Oil and gas chemistry*. 2016. no. 4. pp. 51–55. (in Russian).

18 Nefedov V.N. et al. Prospects for the application of high-tech microwave technologies. *T-Comm-Telecommunications and Transport*. 2017. vol. 11. no. 6. pp. 33–37. (in Russian).

19 Kataeva S.E. On sanitary and chemical studies of polymer materials used in the national economy. *Hygiene and sanitation*. 1992. no. 2. pp. 57–58. (in Russian).

20 Baronin G.S. et al. The effect of microwave radiation on the formation of structural and mechanical properties of modified polymer-carbon materials during solid-phase extrusion. *Applied Mathematics & Physics*. 2011. vol. 23. no. 11 (106). pp. 123–128. (in Russian).

21 Chikhacheva I.P. et al. The effect of microwave radiation on the phase state and properties of polyvinyl alcohol. *News of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology*. 2010. vol. 53. no. 3. pp. 93–97. (in Russian).

22 Zavrzhin D.O., Popov A.G. The effect of microwave radiation on the formation of a structure with improved physical and mechanical characteristics of modified polymer-carbon materials during solid-phase pressure treatment. *Promising materials*. 2011. no. 11. pp. 389–395. (in Russian).

23 Suleymanov D.F. et al. Technology of changing the characteristics of insulating materials based on polyvinyl chloride under the influence of microwave radiation. *Sciences of Europe*. 2017. no. 13–2 (13). pp. 94–98. (in Russian).

24 Rumyantseva Yu. V. et al. Effect of microwave radiation on radical polymerization of acrylamide in solution in dynamic power mode. *News of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology*. 2012. vol. 55. no. 12. – pp. 114–117. (in Russian).

25 Fazullin D.D., Mavrin G.V., Shaikhiev I.G. The effect of microwave radiation on thin-film polymer membranes. *Electronic processing of materials*. 2019. vol. 55. no. 3. pp. 58–65. (in Russian).

26 Abutalipova E.M. et al. Investigation of the effect of microwave-radiation energy flux on the structure and properties of polymeric insulating materials. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016. vol. 52. no. 3–4. pp. 212–216.

27 Afzal H.M. et al. Influence of microwave irradiation on thermal properties of PVA and PVA/graphene nanocomposites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. vol. 139. pp. 353–365.

28 Rawat N.K., Ghosal A., Ahmad S. Influence of microwave irradiation on various properties of nanopolythiophene and their anticorrosive nanocomposite coatings. *RSC Advances*. 2014. vol. 4. no. 92. pp. 50594–50605.

29 Heidarpour M., Movahed S.O., Jourabchi S. The effect of microwave irradiation on the flotation of the selected polymers as a potential solution for plastic recycling. *Journal of Polymers and the Environment*. 2021. vol. 29. pp. 3130–3144.



- 30 Ikromov N.A. Research on the physical and mechanical properties of radiation-modified epoxy compositions and coatings based on them. *Universum: technical sciences*. 2021. no. 12-6 (93). pp. 59-60. (in Russian).
- 31 Aristov V.M., Aristova E.P. The effect of structural heterogeneity on the physical properties of partially crystalline polymers. *Plastic masses*. 2016. no. 3-4. pp. 15-18. (in Russian).
- 32 Stolyarenko V.I., Olshansky V.I. Analysis of the elements of the technology for the production of gaskets from a composite material based on fiberglass. *Bulletin of the Vitebsk State Technological University*. 2021. no. 2 (41). pp. 81-89. (in Russian).
- 33 Dedov A.V., Chernousova N.V. Efficiency of reducing the rate of desorption of plasticizer from polyvinyl chloride. *Plastic masses*. 2017. no. 1-2. pp. 12-14. (in Russian).
- 34 Aristov V.M., Aristova E.P. Influence of relaxation phenomena on the physical properties of polymer materials. *Plastic masses*. 2017. no. 5-6. pp. 3-6. (in Russian).
- 35 Negmatov S.S. et al. Research of viscoelastic and adhesive-strength properties and development of effective vibration-absorbing composite polymer materials and coatings for machine-building purposes. *Plastic masses*. 2020. no. 7-8. pp. 32-36. (in Russian).
- 36 Studetsov V.N., Cheremukhina I.V. Evaluation of physicochemical activity of various methods of physical modification. *Fundamental research*. 2016. no. 2-2. pp. 299-302. (in Russian).
- 37 Chernihiv M.A. Methods of modification of polymer materials for the formation of hybrid composites with proton-conducting properties. *Bulletin of AnGTU No. 2019. vol. 13. pp. 101. (in Russian).*
- 38 Akkubikova V.A., Dautova I.F. Creation of composite polymer materials by modification methods. *Education, science and technology: problems and prospects*. 2020. pp. 120-122. (in Russian).
- 39 Simileiskaya B.S. Some aspects of migration of chemical substances under the influence of microwave radiation. *Toxicological Bulletin*. 2011. no. 2 (107). pp. 42-45. (in Russian).
- 40 Tveritnikova I.S. et al. Modification of polymer mixtures with copolymers to obtain polymer compositions with improved deformation and strength characteristics. *Health, Food & Biotechnology*. 2019. vol. 1. no. 3. pp. 92-105. (in Russian).
- 41 Abduraimova S.A., Bozorova N.H., Turaev E.R. Features of polypropylene modification. *Universum: technical sciences*. 2022. no. 1-2 (94). pp. 80-84. (in Russian).
- 42 Nakajima H., Dijkstra P., Loos K. The recent developments in biobased polymers towards general and engineering applications: Polymers that are upgraded from biodegradable polymers, analogous to petroleum-derived polymers, and newly developed. *Polymers*. 2017. vol. 9. no. 10. pp. 523.
- 43 Kirsh I.A. et al. Regulation of physical and mechanical properties of secondary polyethylene terephthalate by chemical and physical modification. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2015. vol. 18. no. 7. pp. 79-82. (in Russian).
- 44 Zhazayeva E.M. The effect of heat treatment on the macroscopic characteristics of polymer mixtures. *Nalchik: KBSU named after HM Berbekov*. 2015. (in Russian).

## Сведения об авторах

**Марина И. Губанова** к.т.н., доцент, кафедра промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы, Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 11, Москва, 125080, Россия, gubanovami@mgupp.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3547-716X>

**Анастасия О. Соловьева** аспирант, кафедра промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы, Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 11, Москва, 125080, Россия, kytiana@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3701-5962>

**Ирина А. Кириш** д.х.н., зав. кафедрой, кафедра промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы, Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 11, Москва, 125080, Россия, irina-kirsh@ya.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3370-4226>

**Ольга А. Банникова** к.т.н., доцент, кафедра промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы, Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 11, Москва, 125080, Россия, bannikovaoa@mgupp.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0633-0003>

## Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Information about authors

**Marina I. Gubanov** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, industrial design, packaging technology and expertise department, Biotechnological University, Volokolamskoye Shosse, 11, Moscow, 125080, gubanovami@mgupp.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3547-716X>

**Anastasia O. Solovyova** graduate student, industrial design, packaging technology and expertise department, Biotechnological University, Volokolamskoye Shosse, 11, Moscow, 125080, kytiana@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3701-5962>

**Irina A. Kirsh** Dr. Sci. (Chem.), head of department, Industrial design, packaging technology and expertise department, Biotechnological University, Volokolamskoye Shosse, 11, Moscow, 125080, irina-kirsh@ya.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3370-4226>

**Olga A. Bannikova** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, industrial design, packaging technology and expertise department, Biotechnological University, Volokolamskoye Shosse, 11, Moscow, 125080, bannikovaoa@mgupp.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0633-0003>

## Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

|                      |                                |                             |
|----------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Поступила 21/06/2023 | После редакции 11/07/2023      | Принята в печать 18/08/2023 |
| Received 21/06/2023  | Accepted in revised 11/07/2023 | Accepted 18/08/2023         |