

**А. В. Горбачев, И. З. Файзуллин, С. И. Вольфсон,
А. М. Губайдуллина**

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОАНАЛИЗА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИПРОПИЛЕНА И РИСОВОЙ ШЕЛУХИ

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, полипропилен, рисовая шелуха, термоанализ, термическая стабильность.

В статье исследуются полимерные композиционные материалы на основе полипропилена и рисовой шелухи с использованием методов термического анализа для оценки их химических, физических и структурных изменений при тепловом воздействии. Применены методы синхронного термического анализа, а также проведены исследования масс-спектрометрии для определения содержания и распределения диоксида кремния (SiO₂) в структуре композитов. Особое внимание уделено влиянию дозировки SiO₂ на термические характеристики материалов. В работе проанализированы как контрольный образец полипропилена без наполнителя, так и композиционные материалы с рисовой шелухой различной фракции (до 200, 200–250, 250–355, 355–560, 560–630, 630–1250 мкм) и наполнением в диапазоне от 10% до 60% масс. Результаты показали, что добавление рисовой шелухи повышает температуру начала разложения с 217 °С до 240 °С, указывая на улучшение термостабильности композита. Термогравиметрический анализ продемонстрировал, что увеличение содержания рисовой шелухи снижает потерю массы в интервале 240–400 °С, что подтверждает улучшение стабильности материала. ДТА-кривые показали, что разложение композитов с содержанием рисовой шелухи до 40% происходит в два этапа, а при 50–60% - упрощается до одного этапа с основной потерей массы при более низких температурах. Установлено, что более мелкие частицы наполнителя (до 200–250 мкм) вызывают смещение максимумов экзотермических эффектов в сторону более низких температур, что свидетельствует о влиянии дисперсности наполнителя на термическое поведение материала. Оптимальные характеристики термостабильности и теплового поведения композитов достигнуты при содержании наполнителя в диапазоне 40–50% и размере частиц до 200 мкм, что позволяет эффективно сохранять структуру материала при высоких температурах.

**A. V. Gorbachev, I. Z. Faizullin, S. I. Volfson,
A. M. Gubaidullina**

APPLICATION OF THERMAL ANALYSIS FOR THE STUDY OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS BASED ON POLYPROPYLENE AND RICE HUSKS

Keywords: polymer composite materials, polypropylene, rice husk, thermal analysis, thermal stability.

The article investigates polymer composite materials based on polypropylene and rice husk using thermal analysis methods to evaluate their chemical, physical, and structural changes under thermal exposure. Methods of simultaneous thermal analysis were applied, and mass spectrometry studies were conducted to determine the content and distribution of silicon dioxide (SiO₂) within the composite structure. Particular attention was paid to the effect of SiO₂ dosage on the thermal characteristics of the materials. Both a control polypropylene sample without filler and composite materials with rice husk of various fractions (up to 200, 200–250, 250–355, 355–560, 560–630, 630–1250 μm) and filler content ranging from 10% to 60% by mass were analyzed. The results showed that the addition of rice husk increases the temperature of the beginning of decomposition from 217 °C to 240 °C, indicating improved thermal stability of the composite. Thermogravimetric analysis demonstrated that increasing the rice husk content reduces mass loss in the 240–400 °C range, confirming the material's enhanced stability. DTA curves revealed that decomposition of composites containing up to 40% rice husk occurs in two stages, while at 50–60% it simplifies to a single stage with the primary mass loss at lower temperatures. It was established that smaller filler particles (up to 200–250 μm) shift the peaks of exothermic effects toward lower temperatures, indicating the impact of filler dispersion on the material's thermal behavior. The optimal characteristics of thermal stability and behavior were achieved with a filler content in the 40–50% range and particle size up to 200 μm, allowing the material's structure to be effectively preserved at high temperatures.

Введение

Анализ научных источников, опубликованных с 2017 по 2024 гг. [1-9,10,11], показывает растущий интерес к производству полимерных композиционных материалов (ПКМ) с лигноцеллюлозными наполнителями. К таким наполнителям относятся древесные волокна, кукурузные, льняные и конопляные волокна, солома, а также шелуха пшеницы, овса, риса и др. Эти композиты находят применение в медицине, упаковке, аэрокосмической отрасли, автомобилестроении, строительстве и производстве мебели благодаря своей экологической ценности и способности

к повторной переработке, что делает их перспективными с точки зрения устойчивого развития.

Особый интерес в России качестве лигноцеллюлозного наполнителя вызывает рисовая шелуха [12-13], объем валового сбора в результате обмола по результатам составляет 190 тыс. тонн в среднем ежегодно. за последние 10 лет при максимальном значении в 2023 г. 220 тыс. т, минимальном в 2013 г. – 159 тыс. т [14-17]. Рисовая шелуха содержит около 20% аморфного диоксида кремния (SiO₂) [18], отличается низкой стоимостью, экологичностью и доступностью. Использование таких наполнителей способ-

ствуется повышению экологической устойчивости полимерных композиционных материалов и улучшает физико-механические свойства [19].

Для исследования термических процессов композитов с добавлением рисовой шелухи ключевое значение имеют методы термогравиметрического и дифференциально термогравиметрического анализа (ТГ-ДТГ) и дифференциально-термического анализа (ДТА) [20]. Эти методики позволяют подробно изучить термическую стабильность и изменения массы при нагреве композита, фиксируя тепловые эффекты, возникающие в результате разложения как полимера, так и термочувствительных лигноцеллюлозных наполнителей. Применение синхронного термоанализа предоставляет возможность комплексного изучения стабильности полимерных композиционных материалов при различных температурах, что критически важно для материалов, предназначенных для эксплуатации в условиях температурных колебаний, например, в автомобилестроении и строительстве [21-23]. Такой подход способствует оптимизации состава композитов и прогнозированию их долговечности и надежности.

Экспериментальная часть

В качестве полимерного связующего использовался полипропилен экструзионной марки PP H250 GP/3 производства ПАО «СИБУР холдинг» (г. Тольск, Россия). Для повышения термической стабильности полимеров в процессе переработки был использован антиоксидант марки Irganox 1010 производителя BASF Societas Europaea (г. Людвигсхафен, Германия). В качестве наполнителя использовалась рисовая шелуха производителя ООО «Агродар» (г. Краснодар, Россия).

Перед смешением рисовую шелуху высушивали при температуре 100 °С в течение 24 часов, для достижения его влажности до 1-2%. Для получения рисовой шелухи с определенными размерами частиц были использованы сита с различными диаметрами отверстий устанавливаемые на вибростол марки ЭКРОС-6700 (ПЭ-6700) производителя ООО «ЭКРОСХИМ» (Санкт-Петербург, Россия). Сита устанавливались в порядке уменьшения диаметра отверстий, начиная с самого крупного 1250 мкм и заканчивая самым мелким 200 мкм. Размер частиц, получаемый в процессе просеивания составлял до 200 мкм, 200-250 мкм, 250-355 мкм, 355-560 мкм, 560-630 мкм, 630-1250 мкм. Время работы вибрационного стола составляло не менее 5 минут. При завершении вибрации фракции, оставшиеся на каждом сите, собирались в отдельные контейнеры.

Полимерные композиционные материалы, наполненные рисовой шелухой с различными размерами частиц, были получены на двухроторном смесителе закрытого типа «Measuring Mixer 350E» производителя Krauss Maffei (Германия). Дозировка просеянного наполнителя была фиксированной и составляла 50% масс. Irganox 1010 был использован в дозировке 0,1%. Температура смешения составляла 180°С, продолжительность смешения 6 минут при частоте вращения роторов 80 об/мин.

Далее для испытаний композиций с различными дозировками наполнителя был выбран размер частиц наполнителя до 200 мкм. Дозировка композитов составляла 10÷20÷30÷40÷50÷60% масс.. Композиции были получены на полупромышленном двухшнековом экструдере Kraussmaffei ZE 25*60 производителя Krauss Maffei (Германия). Температура по зонам составляла – T₁=25 °С, T₂=50 °С, T₃=70 °С, T₄=100 °С, T₅=180 °С, T₆=180 °С, T₇=190 °С, T₈=190 °С, T₉=205 °С, T₁₀=210 °С, T₁₁=220 °С, T₁₂=220 °С, T₁₃=220 °С где T₁ – зона загрузки сырья, а T₁₃ – это зона головки экструдера.

Обсуждение результатов

Кривые ТГ-ДТА и ДТГ всех образцов приведены на рисунках 1-4.

Полимерный композиционный материал, наполненный рисовой шелухой с различной дозировкой

На рисунках 1–2 представлены ТГ-ДТА и ДТГ кривые образцов полипропилена, наполненного рисовой шелухой с различной дозировкой.

ТГ-кривые (рисунок 1) показывают, что в низкотемпературной области (29–240 °С) для всех образцов наблюдается потеря массы, которая увеличивается с ростом содержания рисовой шелухи. Максимальная потеря массы в этом интервале составляет 4,50% для образца с 50% наполнителя, а минимальная — 0,29% для образца с 10%. В интервале температур 240–400 °С начинается интенсивная потеря массы, общая величина которой также уменьшается с увеличением доли рисовой шелухи. Наибольшая потеря массы в этом интервале (92,77%) зафиксирована для образца с 10% наполнителя, наименьшая — 72,4% для образца с 60%. Обнаружено, что с увеличением дозировки рисовой шелухи уменьшается общая потеря массы во всем интервале нагрева. Это может быть связано с более высоким содержанием углеродистой фазы, способной окисляться при высоких температурах.

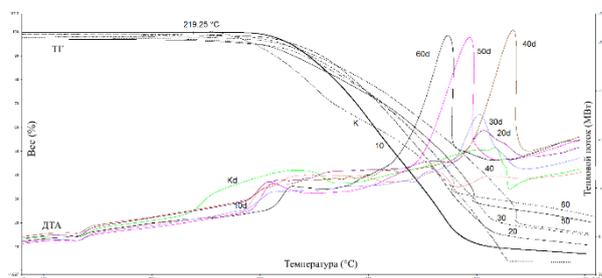


Рис. 1 – ТГ-ДТА кривые образцов полипропилена наполненного рисовой шелухой с различной дозировкой

Fig. 1 – TG-DTA curves of polypropylene samples filled with rice husk with different dosages

ДТА-кривые (рисунок 1) показывают, что во всех образцах в интервале температур 150–177 °С регистрируется малый эндотермический эффект с максимумом около 165–166 °С. В интервале температур

выше 215 °С наблюдаются сложные экзотермические эффекты, свидетельствующие о фазовых превращениях. В интервале 200-290 °С эффект растянутый, без явно выраженных максимумов. Далее выше 290 °С для контрольного и с добавкой 10% рисовой шелухи проявляются также слегка размытые экзотермические эффекты. Начиная с 20% добавки наблюдается разрешенный экзотермический эффект. С увеличением добавки рисовой шелухи этот эффект становится узкоинтервальным и его максимум смещается в сторону уменьшения температуры.

ДТГ-кривые (рисунок 2) показывают, что в интервале температур 240–400 °С регистрируются эндотермические эффекты. Для образцов с 10% и 20% рисовой шелухи наблюдаются два максимума, причем они смещены к более высоким температурам по мере увеличения содержания наполнителя (от 298 °С и 330 °С для 10% до 330 °С и 348 °С для 20%). Для образцов с 30%, 40%, 50% и 60% рисовой шелухи зарегистрирован один максимум, также с тенденцией к смещению в сторону высоких температур при увеличении содержания наполнителя: от 348 °С для 30% до 332 °С для 60%. С увеличением дозировки рисовой шелухи смещение максимумов эндотермических эффектов к более высоким температурам указывает на изменение термической стабильности материала.

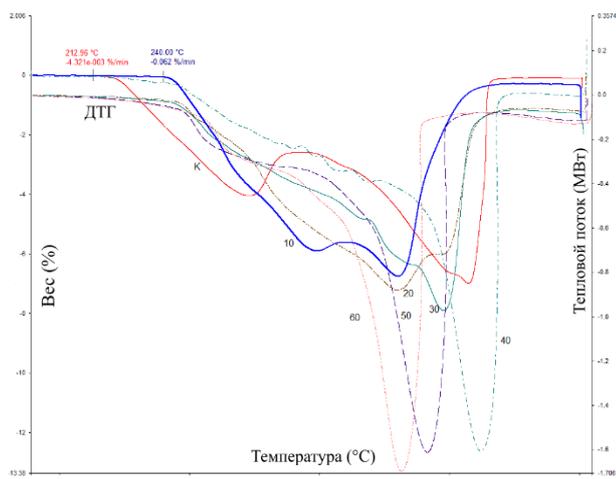


Рис. 2 – ДТГ кривые образцов полипропилена, наполненного рисовой шелухой с различной дозировкой

Fig. 2 – DTG curves of polypropylene samples filled with rice husk with different dosages

Анализ термических данных показал, что температура плавления полипропилена для контрольной пробы и всех композитов регистрируется при 166 °С, однако при содержании рисовой шелухи 50% и 60% она снижается на 1 °С. Введение наполнителя повышает температуру начала разложения с 217 °С (контроль) до 240 °С, что указывает на рост термостабильности. По ТГ-кривым, увеличение содержания рисовой шелухи снижает потерю массы в интервале 240–400 °С. ДТГ-кривые показывают, что при концентрации наполнителя до 40% разложение происходит в два этапа, тогда как при 50% и 60% оно упрощается до одного этапа, смещаясь в область более низких температур.

Полимерный композиционный материал, наполненный рисовой шелухой с различными размерами частиц

На рисунках 3-4 представлены ТГ-ДТА и ДТГ кривые образцов полипропилена, наполненного рисовой шелухой с различными размерами частиц. Характер кривых аналогичен кривым предыдущей серии.

По ТГ-кривым (рисунок 3) потеря массы наполненных рисовой шелухой с различными размерами частиц, происходит в два этапа: в низкотемпературной области в интервале 29-240 °С наблюдается плавная потеря массы порядка 4-4,5% масс. Начиная с 240 °С регистрируется ускоренная потеря массы от 75 до 79% масс.

По ДТА-кривым (рисунок 3) видно, что в интервале температур 155-177 °С регистрируется малый интенсивности эндотермический эффект с максимумами при 166 °С. Начиная с 230 °С регистрируется два экзотермических эффекта с максимумами при 256 °С и 355-358 °С. Однако исключением в этом ряду являются образцы, наполненные рисовой шелухой с размерами частиц до 200 мкм и 200-250 мкм с максимумами второго эффекта при 347°С и 349 °С.

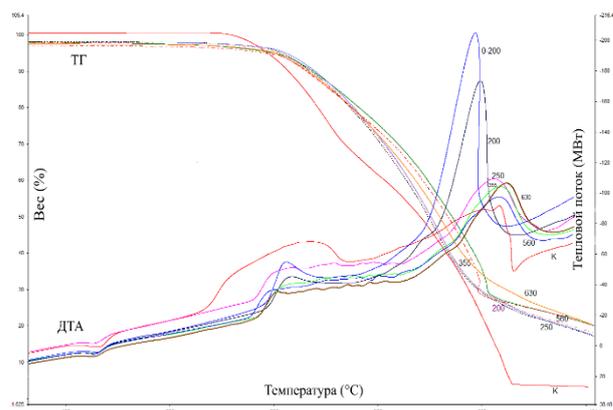


Рис. 3 – ТГ-ДТА кривые образцов полипропилена наполненного рисовой шелухой с различными размерами частиц

Fig. 3 – TG-DTA curves of rice husk filled polypropylene samples with different particle sizes

По ДТГ-кривым (рисунок 4) видно, что в интервале температур 240-400 °С регистрируется затяжной эндотермический эффект с явно выраженными максимумами от 330 °С до 342 °С. По ДТГ кривым максимумы этих потерь достигают при 328 при этом максимум эффекта для большинства образцов сохраняется при 328 °С. Исключением являются образцы, наполненные с размерами частиц до 200 мкм и 200-250 мкм, где максимумы эффекта наблюдается при 342 °С и 345 °С.

Анализ кривых показал, что разложение композитов полипропилена с рисовой шелухой происходит в два этапа. В интервале 29–240 °С наблюдается плавная потеря массы (~4–4,5%), а с 240 °С начинается интенсивная потеря массы до 75–79%. ДТА-кривые регистрируют эндотермический эффект при 166 °С и

два экзотермических эффекта с максимумами при 256 °С и 355–358 °С. Однако у образцов с размерами частиц шелухи до 200 мкм и 200–250 мкм второй максимум сдвигается к 347–349 °С. По ДТГ-кривым максимальная потеря массы в интервале 240–400 °С достигает пика при 328 °С для большинства образцов. Исключение составляют композиты с более мелкими частицами (до 250 мкм), у которых максимум эффекта смещается к 342–345 °С. Это указывает на влияние размера частиц на термостабильность и поведение материала при нагревании.

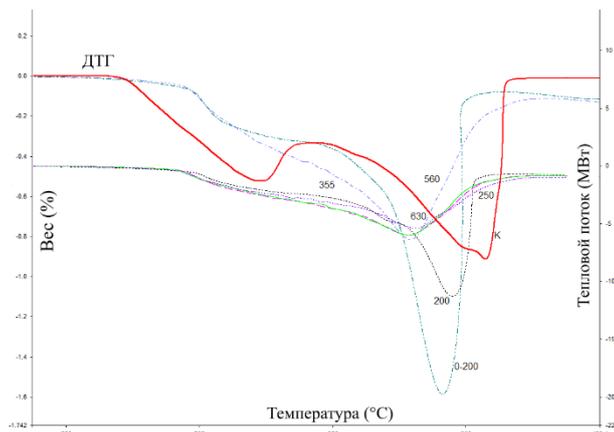


Рис. 4 – ДТГ кривые образцов полипропилена наполненного рисовой шелухой с различными размерами частиц

Fig. 4 – DTG curves of rice husk filled polypropylene samples with different particle sizes

Масс-спектрометрия полимерных композиционных материалов

В рамках исследования полимерных композиционных материалов на основе полипропилена и рисовой шелухи была проведена масс-спектрометрия для оценки содержания SiO₂ в образцах с различной дозировкой рисовой шелухи.

Согласно результатам анализа (таблица 1) контрольный образец практически не показал содержание SiO₂, тогда как при наполнении полимера до 60% содержание SiO₂ достигло 12,42%.

Таблица 1 - Масс-спектрометрия полимерных композиционных материалов на основе полипропилена и рисовой шелухи

Table 1 - Mass spectrometry of polymer composites based on polypropylene and rice husks

№	SiO ₂
Контрольный образец	0,02
10	2,33
20	4,67
30	6,96
40	7,62
50	11,13
60	12,42

Известно, что повышение концентрации рисовой шелухи в полимерных композитах приводит к увеличению содержания SiO₂, что увеличивает их термическую стабильность [24]. Корреляция между содержанием SiO₂ и термостабильностью композитов подчеркивает необходимость точного подбора концентрации наполнителя при разработке материалов, предназначенных для эксплуатации в условиях термических нагрузок.

Выводы

Таким образом, с использованием методов термического анализа при тепловом воздействии оценены термостабильность и влияние дозировки и размеров частиц наполнителя на термическое поведение полимерных композитов на основе полипропилена и рисовой шелухи. Это важно для оптимизации состава композитов, что позволяет повысить их устойчивость к высоким температурам и снизить экологическое воздействие.

Температура плавления полимера для всех образцов составляет 166 °С, но при высоком содержании наполнителя (50–60%) она снижается на 1 °С. Добавление рисовой шелухи увеличивает температуру начала разложения с 217 °С (контроль) до 240 °С, что свидетельствует о повышении термостабильности. По данным ТГ анализа, с увеличением дозировки рисовой шелухи снижается потеря массы в интервале 240–400 °С, что также подтверждает улучшение стабильности материала. ДТА-кривые показали, что разложение композитов с содержанием рисовой шелухи до 40% происходит в два этапа, в то время как при содержании 50–60% оно упрощается до одного этапа с максимальной потерей массы при более низких температурах.

Анализ кривых термогравиметрии показал, что потеря массы композитов происходит в два этапа: при низкотемпературном плавном процессе (29–240 °С) теряется около 4–4,5% массы, а с 240 °С начинается ускоренное разложение с потерей до 75–79%. Максимумы экзотермических эффектов при 256 °С и 355–358 °С смещаются в зависимости от размеров частиц наполнителя: для частиц до 200–250 мкм максимум наблюдается при более низких температурах (347–349 °С), что указывает на значительное влияние дисперсности наполнителя на термическое поведение материала.

Повышение концентрации рисовой шелухи в композитах коррелирует с ростом содержания диоксида кремния (SiO₂), что также оказывает значительное влияние на термостабильность материала. Данные выводы подчеркивают важность точного подбора концентрации и дисперсности наполнителя для повышения эксплуатационных характеристик полимерных композитов, особенно в условиях термических нагрузок.

Оптимальная композиция для полимерных композитов на основе полипропилена и рисовой шелухи достигается при содержании наполнителя в диапазоне 40–50% и размере частиц до 200 мкм. В этом составе композиты демонстрируют лучшую термостабильность, сохраняя структуру при повышенных температурах и снижая углеродный след.

Литература

1. A. Vinod, M.R. Sanjay, S. Suchart, P. Jyotishkumar, J. Cleaner Prod., 258, 120978 (2020).
2. А.В. Горбачев, И.З. Файзуллин, С.И. Вольфсон, Ю.М. Казаков, Вестн. Технол. ун-та, 25, 8, 148-157 (2022).
3. J. Feng, S. Li, R. Peng, T. Sun, X. Xie, Q. Shi, J. Appl. Polym. Sci., 138, 11, 50022 (2021).
4. A. Gallo, G. Paës, F. Allais, J. Beaugrandbd, RSC Adv., 7, 55, 34638-34654 (2017).
5. G. Kannan, R. Thangaraju, J. Nat. Fibers, 19, 13, 7100-7131 (2022).
6. M.A.M. Rizal, S. Agusril, N.M. Nurazzi, N. Faiz, Fibers Polym., 24, 2, 337-353 (2023).
7. I. Fayzullin, A. Gorbachev, S. Volfson, Y. Serikbayev, A. Nakyp, N. Akyzbekov, Polymers, 16, 12, 1703 (2024).
8. F.J. Alonso-Montemayor, D. Navarro-Rodríguez, M. Delgado-Aguilar, M.G. Neira-Velázquez, C.N. Aguilar, A.O. Castañeda-Facio, R.I. Narro-Céspedes, Cellulose, 29, 2, 659-683 (2022).
9. V. Arumugaprabu, R. D. J. Johnson, S. Vigneshwaran, In book: Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications, Springer, Cham, 2020, С. 991-1004.
10. I.Z. Fayzullin, I.N. Musin, S.I. Volfson, A.A. Nikiforov, Key Engineering Materials., 816, 1, 197-201 (2019).
11. И.З. Файзуллин, С.И. Вольфсон, А.В. Канарский, И.В. Захаров, А.В. Горбачев, Технология органических веществ, 1, 225-226 (2021).
12. Е.Н. Подденежный, Н.Е. Дробышевская, А.А. Бойко, В.М. Шаповалов, Н.С. Дробышевский, 47-57 (2023).
13. Е.М. Готлиб, Р.Ш. Нгуму, А.Р. Валеева, А.Р. Гимранова, Э.Р. Галимов, С. 113-118 (2020).
14. А.С. Мельникова, Д.С. Султанова, Сборник трудов конкурса научно-исследовательских работ «Безопасность и охрана труда», Секция 1, 2023, С. 37-40.
15. Т.Н. Полутина, А.Е. Меньшова, Е.Г. Михалкина, Вестн. Курск. гос. сельск. акад., 8, 32-37 (2014).
16. Е.М. Готлиб, Т.Н.Ф. Ха, Г.Г. Исламова, Е.С. Ямалеева, Т.З. Лыгина, Полимеры в строит., науч. интернет-журн., 1, 26-35 (2019).
17. Н.Н. Малышева, Материалы ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2022 г. Краснодар: Кубанский госуд. аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2023. – С. 267-268.
18. D. Battezzore, S. Bocchini, J. Alongi, A. Frache, RSC Adv., 4, 97, 54703-54712 (2014).
19. Р.В. Сидельников, А.Д. Мишина, А.Э. Пивинский, Материалы конференции «Образование. Наука. Производство», 2021, С. 1512-1514.
20. M.A. Suhot, M.Z. Hassan, S.A. Aziz, M.Y. Md Daud, Polymers, 13, 15, 2391 (2021).
21. F. Guesmi, M. Elfarhani, A. Mkaddem, S. Ghazali, A.S. Bin Mahfouz, A. Jarraya, Polymers, 14, 10, 2084 (2022).
22. X. Xu, N. Gupta, Adv. Theory Simul., 2, 4, 1800131 (2019).
23. FZ Arrakhiz, M El Achaby, M Malha, MO Bensalah, O Fassi-Fehri, R Bouhfid, K Benmoussa, A. Qaiss, Mater. Des., 43, 200-205 (2013).
24. S. Siengchin, R. Dangtungee, J. Thermoplast. Compos. Mater., 27, 10, 1428-1447 (2014).

References

1. A. Vinod, M.R. Sanjay, S. Suchart, P. Jyotishkumar, J. Cleaner Prod., 258, 120978 (2020).
2. A.V. Gorbachev, I.Z. Faizullin, S.I. Wolfson, Y.M. Kazakov, Herald of Technological University, 25, 8, 148-157 (2022).
3. J. Feng, S. Li, R. Peng, T. Sun, X. Xie, Q. Shi, J. Appl. Polym. Sci. 138, 11, 50022 (2021).
4. A. Gallo, G. Paës, F. Allais, J. Beaugrandbd, RSC Adv., 7, 55, 34638-34654 (2017).
5. G. Kannan, R. Thangaraju, J. Nat. Fibers, 19, 13, 7100-7131 (2022).
6. M. A. M. Rizal, S. Agusril, N. M. Nurazzi, N. Faiz, Fibers Polym. grades, 24, 2, 337-353 (2023).
7. I. Fayzullin, A. Gorbachev, S. Volfson, Y. Serikbayev, A. Nakyp, N. Akyzbekov, Polymers, 16, 12, 1703 (2024).
8. F.J. Alonso-Montemayor, D. Navarro-Rodríguez, M. Delgado-Aguilar, M.G. Neira-Velázquez, C.N. Aguilar, A.O. Castañeda-Facio, R.I. Narro-Céspedes, Cellulose, 29, 2, 659-683 (2022).
9. V. Arumugaprabu, R. D. J. Johnson, S. Vigneshwaran, In book: Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications, Springer, Cham, 2020, P. 991-1004.
10. I.Z. Fayzullin, I.N. Musin, S.I. Volfson, A.A. Nikiforov, Key Engineering Materials, 816, 1, 197-201 (2019).
11. I.Z. Faizullin, S.I. Volfson, A.V. Kanarsky, I.V. Zakharov, A.V. Gorbachev, Technology of Organic Substances, 1, 225-226 (2021).
12. E.N. Poddenezhny, N.E. Drobyshevskaya, A.A. Boyko, V.M. Shapovalov, N.S. Drobyshevsky, 47-57 (2023).
13. E.M. Gotlib, R.S. Ntsumu, A.R. Valeeva, A.R. Gimranova, E.R. Galimov, P. 113-118 (2020).
14. A.S. Melnikova, D.S. Sultanova, Proceedings of the competition of research works 'Safety and labour protection', Section 1, 2023, P. 37-40.
15. T.N. Polutina, A.E. Menshova, E.G. Mikhalkina, Vestn. Kursk. gos. selsk. akad., 8, 32-37 (2014).
16. E.M. Gotlib, T.N.F. Ha, G.G. Islamova, E.S. Yamaleeva, T.Z. Lygina, Polymers in stroitel, Sci. Online Journal, 1, 26-35 (2019).
17. N.N. Malysheva, Materials of the annual scientific-practical conference of teachers on the results of research and development for 2022 Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, 2023. – С. 267-268.
18. D. Battezzore, S. Bocchini, J. Alongi, A. Frache, RSC Adv., 4, 97, 54703-54712 (2014).
19. R. V. Sidelnikov, A. D. Mishina, A. E. Pivinsky, Proceedings of the conference 'Education. Science. Production', 2021, P. 1512-1514.
20. M.A. Suhot, M.Z. Hassan, S.A. Aziz, M.Y. Md Daud, Polymers, 13, 15, 2391 (2021).
21. F. Guesmi, M. Elfarhani, A. Mkaddem, S. Ghazali, A.S. Bin Mahfouz, A. Jarraya, Polymers, 14, 10, 2084 (2022).
22. X. Xu, N. Gupta, Adv. Theory Simul., 2, 4, 1800131 (2019).
23. FZ Arrakhiz, M El Achaby, M Malha, MO Bensalah, O Fassi-Fehri, R Bouhfid, K Benmoussa, A. Qaiss, Mater. Des., 43, 200-205 (2013).
24. S. Siengchin, R. Dangtungee, J. Thermoplast. Compos. Mater., 27, 10, 1428-1447 (2014).

© **А. В. Горбачев** – аспирант, кафедра Химии и технологии переработки эластомеров (ХТПЭ), институт Полимеров (ИП), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, alexandergorbachow@gmail.com; **И. З. Файзуллин** – к.т.н., доцент кафедры ХТПЭ, ИП, КНИТУ, ilnur-fz@mail.ru; **С. И. Вольфсон** – д.т.н., заведующий кафедрой ХТПЭ, ИП, КНИТУ, svolfson@kstu.ru; **А. М. Губайдуллина** – к.т.н., доцент кафедры Технологии неорганических веществ и материалов, инженер I категории Лабораторного Комплекса "НаноАналитика", КНИТУ, GubaidullinaAF@corp.knrntu.ru.

© **A. V. Gorbachev** – PhD-student, Department of Chemistry and Technology of Elastomer Processing (CTEP), Institute of Polymers (IP), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, alexandergorbachow@gmail.com; **I. Z. Fayzullin** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor at the CTEP department, IP, KNRTU, ilnur-fz@mail.ru; **S. I. Wolfson** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Head of the CTEP department, IP, KNRTU, svolfson@kstu.ru; **A. M. Gubaidullina** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor at the Department of Technology of Inorganic Substances and Materials, Engineer of the 1st category at the Laboratory Complex NanoAnalytics, KNRTU, GubaidullinaAF@corp.knrntu.ru.