

Особенности формирования композитов на основе термопластичных полимеров и лигноцеллюлозного наполнителя

В. М. Шаповалов,
Н. С. Винидиктова

*Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси,
Республика Беларусь*

Аннотация. Создание композиционных материалов на основе полимеров и измельченной древесины определяется удачным сочетанием технологических свойств полимеров со структурно-механическими характеристиками древесины, что позволяет разрабатывать композиционные системы с высокой степенью наполнения. Одновременно решаются экономические и экологические вопросы, так как в качестве наполнителя в большинстве случаев используются мелкодисперсные отходы древесины, не требующие специальной подготовки. В статье полученные результаты послужили научным обоснованием для разработки комплексных мер по рецептурно-технологическому обеспечению в процессах экструзионной переработки структуры и свойств высоконаполненных композитов на основе модифицированных термопластичных полимеров и дисперсных лигноцеллюлозных наполнителей, в том числе, в процессах их биоразложения в эксплуатационных условиях. В настоящее время мировое сообщество также стремится снизить использование полимерных материалов из нефтепродуктов и заменить их на биоразлагаемые. Биоразлагаемые полимеры разрушаются в окружающей среде не только под воздействием внешних физических факторов, но и под действием микроорганизмов. Номенклатура биоразлагаемых полимеров и композиций на их основе довольно обширна, но ввиду их высокой стоимости проблема разработки новых видов остается актуальной.

Ключевые слова: высоконаполненные композиты, термопласты, биоразложение, лигноцеллюлозные наполнители, экструзия древопластиков.

Информация о статье: поступила 9 июня 2026 года.

Features of composites formation based on thermoplastic polymers and lignocellulose filler

Viktor M. Shapovalov,
Natalia S. Vinidiktova

*V.A. Bely Institute of Mechanics of Metallopolymer Systems of the National Academy of
Sciences of Belarus, Republic of Belarus*

Abstract. The creation of composite materials based on polymers and shredded wood is determined by the successful combination of the technological properties of polymers with the structural and mechanical characteristics of wood, which allows for the development of composite systems with a high degree of filling. At the same time, economic and environmental issues are addressed, as fine-grained wood waste is used as a filler in most cases and does not require special preparation. In the article, the obtained results served as a scientific basis for the development of comprehensive measures for the formulation and technological support of the structure and properties of highly filled composites based on modified thermoplastic polymers and dispersed lignocellulose fillers in extrusion processing, including their biodegradation under operational conditions. Currently, the global community is also striving to reduce the use of polymer materials derived from petroleum products and to replace them with biodegradable ones. Biodegradable polymers are destroyed in the environment not only by external physical factors but also by microorganisms. The range of biodegradable polymers and their compositions is quite extensive, but due to their high cost, the problem of developing new types remains relevant.

Keywords: highly filled composites, thermoplastics, biodegradation, lignocellulose fillers, extrusion of wood-plastic composites.

Article info: received June 9, 2026.

Введение

Одной из ведущих проблем современного материаловедения является создание нового поколения полимерных композиционных материалов (В.М. Попов et al., 2012; Lee, S. Ho. et al., 2024; А.С. Колосова et al., 2017). При решении указанной проблемы эффективен подход, основанный на сочетании полимеров с дисперсными наполнителями. Среди последних значительное место отводится наполнителям растительного происхождения, ресурсы которых постоянно возобновляются (В.Е. Сыцко et al., 2023; И.З. Файзуллин, 2015; В.В. Глухих et al., 2014; S.A. Pushkin et al., 2015). Так создание композиционных материалов на основе полимеров и измельченной древесины определяется удачным сочетанием технологических свойств полимеров (реологические свойства, совместимость с добавками, и др.) со структурно-механическими характеристиками древесины (волоконная структура, легко обрабатывается, невысокая теплопроводность и др.), что позволяет разрабатывать композиционные системы с высокой степенью наполнения. Одновременно решаются экономические и экологические вопросы, так как в качестве наполнителя в большинстве случаев используются мелкодисперсные отходы древесины, не требующие специальной подготовки (Д.В. Тунцев, Э.Р. Хайруллина и М.Ш. Гайнуллин, 2021; А.В. Горбачев et al., 2023). Перспективность этого пути обусловлена также тем, что он позволяет не только достигать полного использования материалов, в частности, древесины, но и тем, что получаемые материалы имеют физико-механические характеристики, не уступающие большинству традиционных материалов на основе терморезистивных и термопластичных полимеров, значительно превосходя их по показателям экономичности за счет высоких (до 70...80 % по объему) степеней наполнения (В.М. Шаповалов, В.Г. Барсуков и Б.И. Купчинов, 2000; А.А. Клесов, 2010; С.И. Вольфсон et al., 2014). Это представляется также основой для создания биоупотребляемых пластиков – актуальное направление, которое интенсивно развивается во всем мире (В.М. Шаповалов et al., 2024). Использование древесного наполнителя в биоразлагаемых композициях позволяет снизить стоимость полимерных изделий за счет замены дорогостоящего полимерного биоразлагаемого связующего. В то же время развитие принципов создания высоконаполненных материалов на основе полимеров и отходов деревообрабатывающих производств связаны с определенными трудностями, связанными с совместимостью

компонентов композиционной смеси и их стабильной переработкой. Особенно это актуально для высоконаполненных полимеров, к которым относятся экструзионные древеснополимерные композиты (ЭДПК), и где полимерная составляющая в материале очень мала (в пределах 15–20 мас. %). Для решения этой проблемы эффективен метод, применяемый при экструзионной переработке древеснополимерных композитов на основе ПВХ, основанный на предварительном введении в дисперсную древесину модифицирующих веществ и их направленного распределения в процессе переработки между компонентами (S.SH. Lutfullayev, 2021; N.S. Qetin et al., 2011). Однако для композитов на основе полиолефинов применение таких веществ, в особенности, в количествах более 3 мас. % малоэффективно, так как наряду со стабилизацией экструзионного процесса формирования изделий наблюдается снижение физико-механических характеристик материала.

Преодоление этого недостатка возможно при использовании в композиции комплексной добавки, способствующей протеканию в материале конкурирующих процессов пластификации и структурирования полимеров. В особенности это важно для смесей термопластов. Характер взаимодействия бинарного (ПП+ПЭВД и ПЭВД+ПЭНД) связующего с наполнителем обусловлен разной проникающей способностью каждого компонента в структуру наполнителя, которая изменяется в процессе экструзии и зависит как от физико-химических свойств термопластов, так и от реотермического воздействия на композит в целом.

Цель работы – исследование влияния рецептурно-технологических аспектов переработки на процессы формирования высоконаполненных лигноцеллюлозными наполнителями полимерных композитов и их эксплуатационные свойства.

Материалы и методы исследования

В качестве связующего использовали термопластичные полимеры: полипропилен (ПП) марки 21030-16 (ТУ 6-05-1756-76), полиэтилен низкого давления (ПЭНД) марки 20706-016 (ГОСТ 16338-85), полиэтилен высокого давления (ПЭВД) марки 10802-020 (ГОСТ 16337-77). В качестве полимерной матрицы в биоразлагаемых композициях применяли – полилактид (ПЛА) марки 4043D. Для наполнения термопластов применяли лигноцеллюлозные частицы: измельченную древесину с размером частиц до 3 мм или древесную муку (ДМ, ГОСТ 16361) и гречневую лузгу (ГЛ), измельченную до 0,8 мм. В компо-

зиции вводили технологические добавки: диоктилфталат (ДОФ, ГОСТ 8728-88), триэтанолламин (ТЭА, ГОСТ 9966-88), сополимеры этилена и пропилена (СЭП), этилена и винилацетата (СЭВ), вазелиновое масло (ВМ, ГОСТ 3164-78).

Технологический процесс получения композиционного материала на основе полимерного связующего и лигноцеллюлозного наполнителя состоял из этапов механического смешения компонентов и экструзионной переработки.

Композиции на основе полиолефинов получали методом двухстадийной экструзионной переработки. На первом этапе гранулы одного из термопластов смешивали с древесными частицами в двухлопастном смесителе при температуре 20–25 °С, модифицированными пластификатором. Смесь пропускали через одношнековый экструдер при температуре 150–200 °С (по зонам) при скорости вращения шнека 20 об/мин с измельчением на частицы размером до 5 мм. На втором этапе их смешивали с гранулами второго полимера, перерабатывали в экструдере, а экструдат дробили на гранулы размером до 5 мм. Из полученного композиционного материала формовали изделие.

Для приготовления композиционного материала на основе ПЛА гранулы полимера смешивали с ВМ, далее с измельченным лигноцеллюлозным компонентом. Полученную смесь загружали в двухшнековый экструдер SUPLAST с диаметром шнека 25 мм и проводили экструзию ленты через щелевую головку при следующих технологических режимах: частота вращения шнека 60–80 об/мин, температура 130–185 °С (по зонам). Расплав пропускали через щелевую головку, подавали на тянущее устройство в виде вальцов, придавая форму листа толщиной 3 мм, нарезали на заготовки, из которых при температуре 80 °С формовали изделие.

Физико-механические характеристики композиционных материалов определяли по стандартным методам. Испытания на растяжения проводили на машине Instron 5567. Ударную вязкость определяли на маятниковом копре КМ-0,5.

Водопоглощение образцов изучали по ГОСТ 4650. Образцы материала в форме дисков диаметром (50±1) мм и толщиной (3,0±0,2) мм погружали в дистиллированную воду при температуре (23±2) °С. Для анализа в рамках стандарта образцы композиционного материала выдерживали в течение суток, для изучения длительного воздействия воды – образцы выдерживали в водной среде в течение 3 месяцев, наблюдая визуальные изме-

нения и регистрируя еженедельное изменение массы. Гравиметрическим методом с последующим расчетом определяли массу воды, поглощенную испытуемым образцом.

Для проведения испытаний на биоразложение использовали ГОСТ Р 57225, позволяющий определить степень разложения образцов материала при лабораторных испытаниях в условиях, имитирующих интенсивный аэробный процесс компостирования. Так как метод не предназначен для определения биоразлагаемости пластмасс в реальных условиях компостирования, параллельно были проведены дополнительные испытания. В пластиковые контейнеры объемом 1 л, заполненные почвогрунтом на половину высоты, помещали поверх почвы исследуемые образцы после взвешивания горизонтально (30х30х2 мм) и засыпали почвой до верха контейнера, проливали водой. Контейнеры помещали в разогретый до 28±2 °С термостат. После выдерживания образцов в течение необходимого количества времени (1, 2 и т. д. месяцев), образцы извлекались из почвы и проводили: визуальную оценку, взвешивание (после просушивания), расчет изменения массы.

$$\Delta m = \frac{(m - m_0)}{m_0} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где Δm – изменение массы образца (%), m – масса образца после нахождения в почве в течение заданного времени (г), m_0 – первоначальная масса образца (г).

Обсуждение результатов

Ранее указывалось, что для композитов на основе полиолефинов применение пластификаторов не всегда целесообразно, так как наряду с улучшением совместности компонентов материала прослеживается снижение его физико-механических характеристик. Анализ научных литературных данных показал, что для качественного совмещения компонентов смеси необходимы значительные сдвиговые напряжения, обеспечивающие при формовании композита улучшение контактного взаимодействия наполнителя с полимером (В.М. Шаповалов, В.Г. Барсуков и Б.И. Купчинов, 2000). Учитывая необходимость протекания в материале конкурирующих процессов пластификации и структурирования полимера, для повышения совместности компонентов в композит мы вводили комплексную добавку в виде смеси ДОФ и ТЭА в соотношении 1,0 : 0,5 соответственно. Как видно из рисунка 1 ее содержание в композиции оптимально в пределах 1,5–2,5 мас. %.

При этом отмечено существенное влияние последовательности совмещения компонентов на свойства материала при экструзионной переработке древесно-наполненного композита (таблица 1).

По результатам испытаний полученных композиционных материалов более высокие технические характеристики соответствуют образцам, изготовленным по следующему технологическому процессу: модифициро-

вание ДН смесью ДОФ+ТЭА в соотношении 1,0 : 0,5; 2), смешение модифицированной ДН с ПЭ и далее с ПП. При последовательности смешения ДН с ПП и далее с ПЭ также наблюдается улучшение свойств композита по сравнению с исходным композитом, где производилось одновременное совместное смешение компонентов смеси (таблица 1).

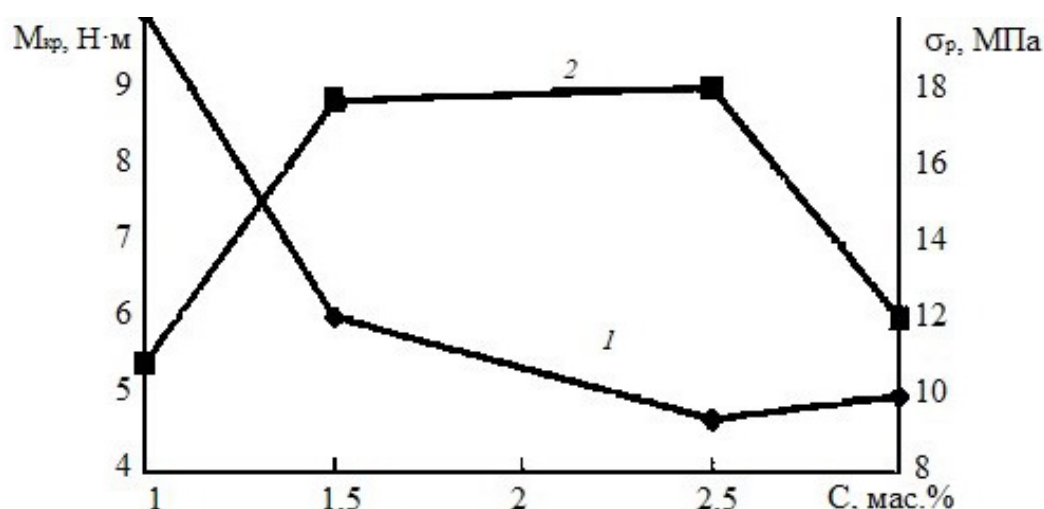


Рисунок 1 – Зависимость крутящего момента на валу двигателя ($M_{кр}$) и прочности при растяжении (σ_p) от содержания комплексного модификатора

Figure 1 – Dependence of the torque on the engine shaft ($M_{кр}$) and tensile strength (σ_p) on the content of the complex modifier

Таблица 1 – Влияние способа совмещения компонентов на физико-механические характеристики ЭДПК

Table 1 – The influence of the method of combining components on the physical and mechanical characteristics of the EDP

Физико-механические характеристики	Способы совмещения компонентов ЭДПК*		
	совместное	раздельное с модифицированием	
	(ПП+ПЭ)+ДН	(ПЭ+ДН)+ПП	(ПП+ДН)+ПЭ
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа вдоль направления экструзии	11	20–24	15–18
	5	13–15	8,5–10
Ударная вязкость, кДж/м	2,8	6,8–7,4	4,6–5,5
Водопоглощение за сутки, %	4,2	1,0–1,5	1,8–2,9

Примечание: * ПП – 40 мас. %, ПЭ – 20 мас. %.

Для изучения влияния модификатора ДОФ+ТЭА на формирование структуры композита в системе «древесина – полимер – древесина» предложена физическая модель (рисунок 2), в которой отражены стадии формирования граничного слоя и внедренного слоя полимера в древесине (рисунок 2 а), а также фрагменты полимера в порах древесины (рисунок 2 б).

Проведенные исследования показали, что термопластичное связующее, которое совмещается с древесиной, в первую очередь, – поглощается ее капиллярно-пористой системой. На это указывает структура скола образца «древесина – полимер – древесина» (рисунок 2 б), где наблюдается направленное проникновение полимерного связующего вглубь модифицированной ДОФ+ТЭА древесины. При этом ТЭА способствует размягчению древесины, а ДОФ делает полимерное связующее более пластичным, что в совокупности обеспечивает более глубокое проникновение расплава полимера

в структуру древесины. Это подтверждают и данные по глубине затекания ПП и ПЭ в капиллярно-пористую систему древесины (рисунок 3), где для ПЭ эти значения имеют более высокие показатели.

Таким образом, достижение более высоких значений физико-механических характеристик (таблица 1) возможно при совмещении модифицированного ДН с последующим отдельным введением компонентов полимерного связующего ((ПЭ+ДН)+ПП и (ПП+ДН)+ПЭ), что в комплексе обеспечивает формирование на границе раздела «древесина – термопласт», иммобилизованного в порах древесины. Как показали проведенные эксперименты, реализация удельных прочностных характеристик наполнителя в более полной степени проявляется при формировании изделий под действием сдвиговых и сжимающих напряжений, не вызывающих значительного разрушения частиц дисперсной древесины. Внедренный в древесину и иммобилизованный, таким

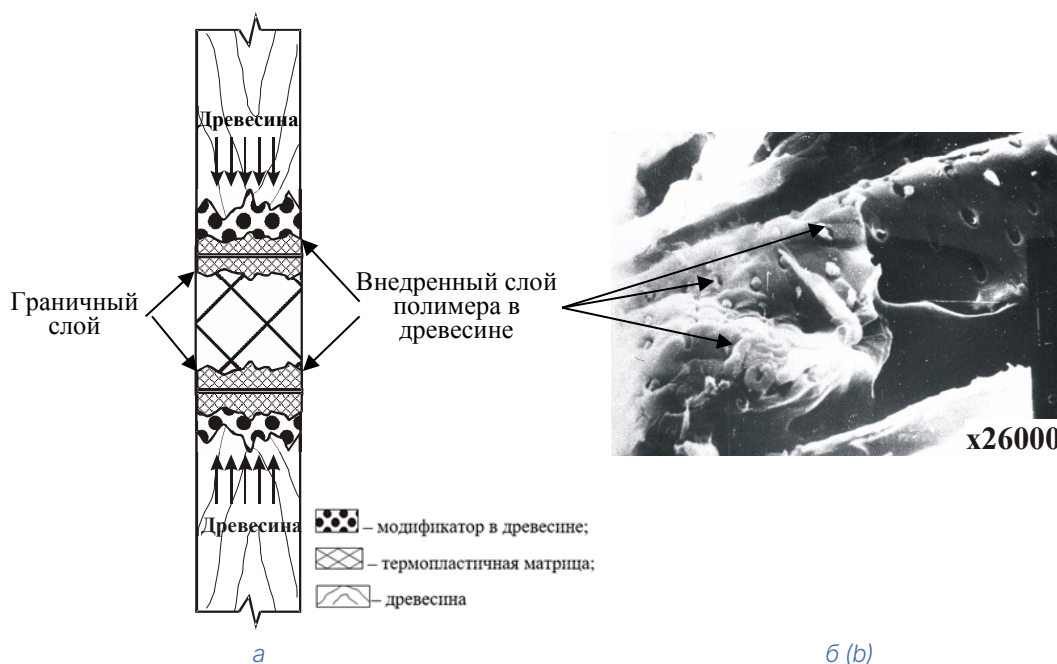


Рисунок 2 – Модель формирования древесно-полимерной структуры:
а – формирование граничного и внедренного в древесине слоев полимера,
б – фрагменты полимера в порах древесины

Figure 2 – Model of formation of wood-polymer structure:
formation of boundary and embedded polymer layers in wood (a), polymer fragments in wood pores (b)

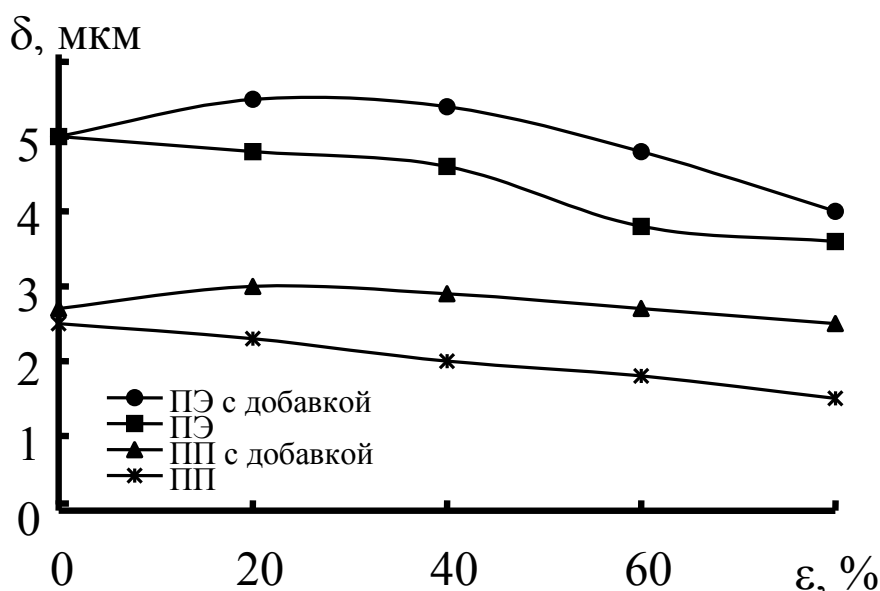


Рисунок 3 – Зависимость глубины затекания (δ) связующего в капиллярно-пористую структуру древесины от состава (добавка ДОФ+ТЭА) и степени уплотнения (ϵ)

Figure 3 – Dependence of the penetration depth (δ) of the binder into the capillary-porous structure of wood on the composition (additive DOP+TEA) and the degree of compaction (ϵ)

образом, полимер принимает участие в процессах деформирования древеснополимерного композита и при экструзионной переработке создает условия для снижения концентраций напряжений в межфазных областях древеснополимерной системы. Об эффективности раздельного совмещения компонентов смеси также свидетельствует снижение внутреннего (межчастичного) трения в системе, которое для материалов на основе смеси полиолефинов регистрируется при степени наполнения дисперсной древесиной не менее 20 мас. % (рисунок 4).

Отмечено, что одним из недостатков при использовании в древеснонаполненной композиционной системе на основе ПП и ПЭ является склонность ПП к фибрилляции. Наиболее сильно это проявляется при нагружении композитов в условиях повышенной влажности, что способствует снижению стабильности их эксплуатационных характеристик. Для устранения этого недостатка предложено вводить в композит полифункциональные модификаторы, которые обеспечивают совместимость ПП и ПЭ. Проведенные исследования показали, что наиболее эффективными компатибилизаторами для

исследуемых композитов представляются сополимеры этилена и пропилена (СЭП) и этилена и винилацетата (СЭВ). Установлено, что их оптимальное содержание в композите для СЭП составляет 8–12 мас. %, а для СЭВ 7–10 мас. %. При таких соотношениях компонентов достигалось возрастание предела прочности при растяжении композита на 12–18 %.

В работе [А.В. Шаповалов, З.Л. Тартаковский и В.М. Шаповалов, 2012] были представлены результаты экспериментальных исследований воздействия микроорганизмов на ЭДПК. Показано, что при экспозиции образцов ЭДПК на основе полиолефинов в почве в анаэробных условиях, наблюдается потеря массы, образование пор, растрескивание и разрушение материала образцов, обусловленное окислением полимера. Кроме того, при визуальной оценке отмечено их обрастание микроорганизмами. Определено, что процессы разрушения образцов находятся в прямой зависимости от концентрации в них измельченной древесины. На это указывают показатели потери прочности образцов с различным содержанием в композитах измельченной

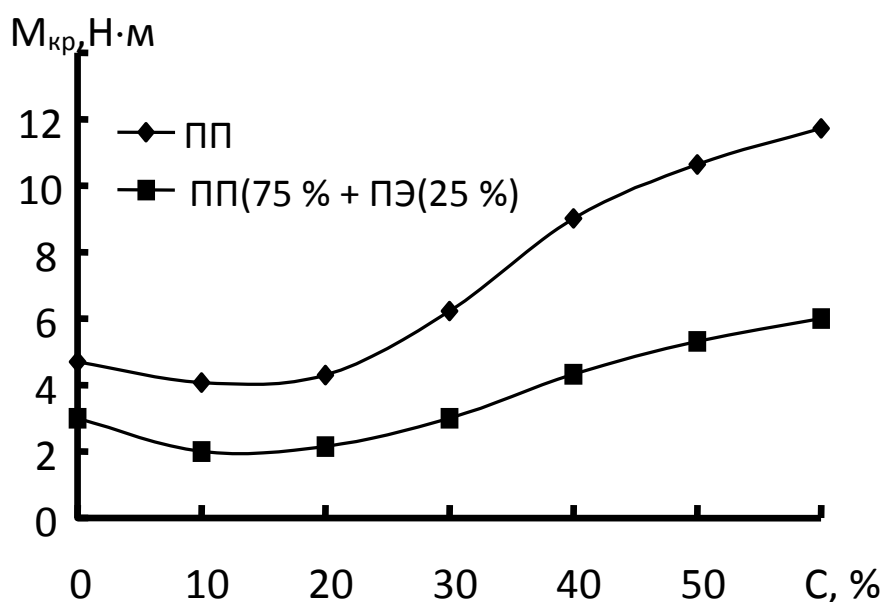


Рисунок 4 – Зависимость при переработке крутящего момента ($M_{кр}$) на валу двигателя установки «Rheochord – 90» от степени наполнения композита (С)

Figure 4 – Dependence of the torque ($M_{кр}$) on the engine shaft of the Rheochord-90 installation on the degree of filling of the composite (C)

древесины, где при степени наполнения ДН в количестве более 50 мас. % наблюдается существенное снижение прочности (порядка 50 %), что свидетельствует, прежде всего, о создании благоприятной среды для микроорганизмов. Испытания образцов ЭДПК на грибостойкость (по ИСО 846) показали, что степень развития плесневых грибов при их наполнении > 50 мас. % соответствует 2–3 баллам (А.В. Шаповалов, З.Л. Тартаковский и В.М. Шаповалов, 2012). Таким образом проведенные исследования подтвердили возможность биоразложения ЭДПК в почве вследствие действия на них почвенных микроорганизмов.

В то же время, наличие в композите даже незначительного количества не биоразлагаемого полимера может ограничить область применения композиционного материала ввиду его вредного воздействия на окружающую среду, что свидетельствует о необходимости разработки полностью биоразлагаемых композиционных материалов. В связи с этим в ИММС НАН Беларуси были проведены исследовательские работы по изучению возможности получения биоразлагаемых композицион-

ных материалов на основе возобновляемых источников сырья (гречневая лузга – ГЛ и древесная мука – ДМ) и полилактида (ПЛА) марки 4043Д.

Экспериментальные исследования показали, что композиционные материалы на основе ПЛА с лигноцеллюлозным дисперсным наполнителем (с точки зрения формообразования композитов и получения приемлемых свойств) вполне работоспособны (В.М. Шаповалов et al., 2024). Однако при их переработке возникла проблема совместимости компонентов материала. В связи с этим для устранения этого недостатка предложено использовать модифицирование компонентов путем введения в композит пластификатора – вазелинового масла (ВМ). Такое модифицирование предполагает усиление межфазных взаимодействий в системе «лигноцеллюлозный наполнитель–полимер». Важным также является возможность полного разложения композита в аэробных условиях, что указывает на высокую перспективность такого направления.

Учитывая, что водопоглощение материала существенно влияет на скорость процесса биоразрушения,

была изучена зависимость водопоглощения исследуемых композиционных материалов от степени наполнения и вида наполнителя (рисунок 5). В ходе эксперимента отмечено, что в течение 1 сут испытаний водопоглощение образцов, наполненных до 50 %, не превышает 3 %, а при наполнении в композите более 50 % этот показатель составляет 8–10 %. При длительных испытаниях наполненных образцов (1–3 мес) их масса достигала 35 %.

В ходе испытаний (более 2 мес) отмечено также образование на поверхности наполненных образцов микроорганизмов, в то время как на исходном ПЛА следов таковых не зарегистрировано (рисунок 6). Отмечена прямая зависимость объема образовавшихся микроорганизмов от количества наполнителя в композиции.

Так при визуальной оценке образцов, наполненных ДМ, показано существенное изменение цвета (потемнение) и наличие колоний микроорганизмов (после 1 мес испытаний). Интенсификация процесса биоразложения образцов с ДМ и ГЛ подтверждается ростом разных видов плесневых грибов на их поверхности (рисунок 7).

На процесс биоразложения образцов указывает изменение показателя массы во время их экспозиции в грунте (таблица 2). Показана прямая зависимость снижения показателя массы образцов от содержания наполнителя в композиции. При этом процесс биоразложения интенсивнее происходит у образцов с ДМ. Таким

образом, введение в ПЛА лигноцеллюлозных наполнителей создает дополнительный источник питательной среды для микроорганизмов, что способствует более активному биоразложению материала.

Проведенный комплекс испытаний на биоразложение по ГОСТ Р 57225, имитирующих интенсивный аэробный процесс компостирования в лабораторных условиях, позволил также установить полный период разложения материала, находящийся в пределах 5 месяцев.

Из композиционного материала на основе ПЛА, наполненного лигноцеллюлозным наполнителем, были сформованы экспериментальные образцы объемных изделий (рисунок 8), что свидетельствует о возможности переработки данного вида биоразлагаемого материалов методами экструзии, прессования и литья под давлением в изделия для различных областей промышленности (отделочные материалы, тара, упаковка и т. д.).

Заключение

Таким образом, полученные результаты послужили научным обоснованием для разработки комплексных мер по рецептурно-технологическому обеспечению в процессах экструзионной переработки структуры и свойств высоконаполненных композитов на основе модифицированных термопластичных полимеров и дисперсных лигноцеллюлозных наполнителей. Установлено

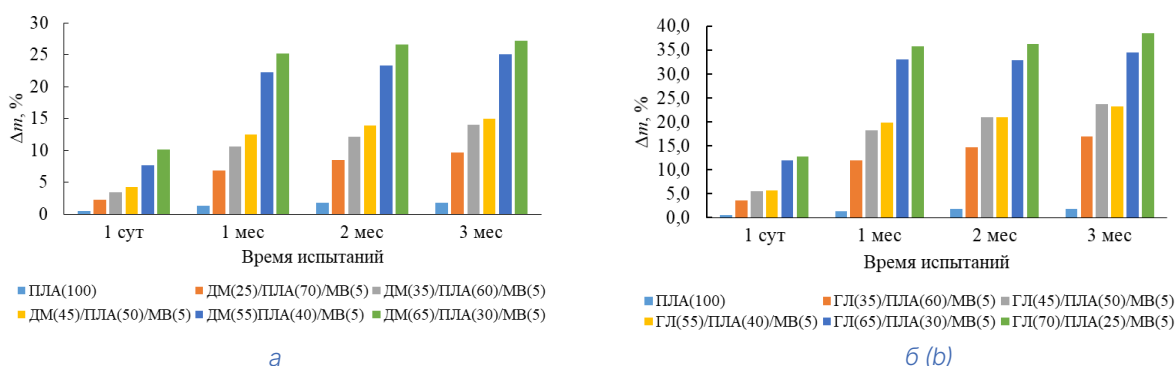


Рисунок 5 – Диаграмма зависимости степени водопоглощения композиционного материала на основе ПЛА от количества наполнителя:

а – древесная мука, б – гречневая лузга

Figure 5 – Diagram of the dependence of the degree of water absorption on a composite material based on PLA on the amount of filler:

a – wood flour, b – buckwheat husk

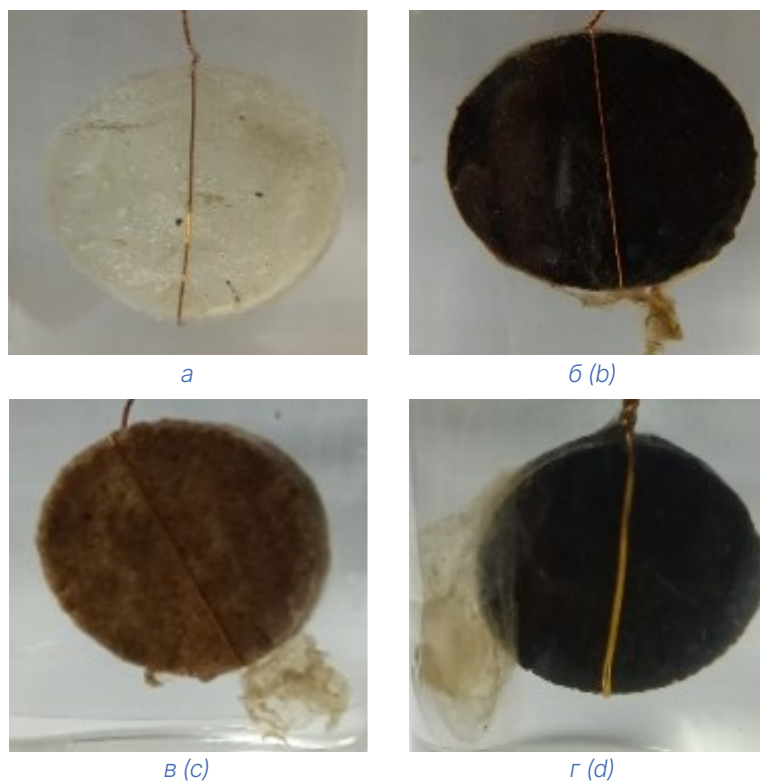


Рисунок 6 – Образцы биоразлагаемых материалов после экспозиции в воде (мас. %):
а – ПЛА(100); б – ГЛ(45)/ПЛА(50)/МВ(5); в – ДМ(65)/ПЛА(30)/МВ(5); г – ГЛ(55)/ПЛА(30)/МВ(5)
Figure 6 – Samples of biodegradable materials after exposure to water (wt. %):
a – PLA(100); b – GL(45)/PLA(50)/MV(5); c – DM(65)/PLA(30)/MV(5); d – GL(55)/PLA(30)/MV(5)

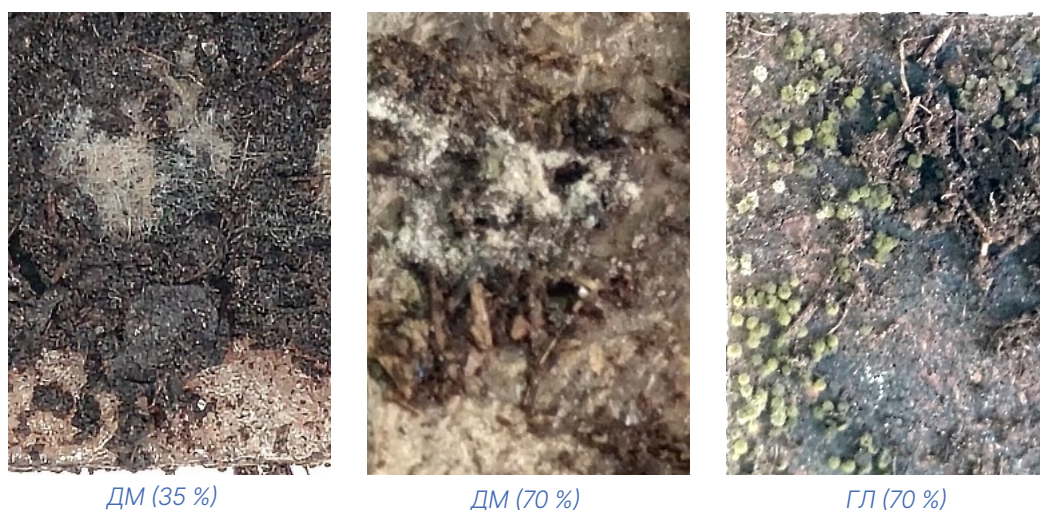


Рисунок 7 – Образцы после 1 месяца испытаний на биоразложение, засеянные колониями грибов (x5)
Figure 7 – Samples after 1 month of biodegradation testing, seeded with fungal colonies (x5)

Таблица 2 – Изменение массы образцов из композиционных материалов

Table 2 – Change in mass of samples made of composite materials

Состав	Изменение массы Δm (%) от времени испытаний (мес)			
	1	3	5	7
ПЛА(100)	0,5	0,2	0,4	0,1
ДМ(25)/ПЛА(70)/МВ(5)	7,4	-3,3	-7,1	-12,9
ДМ(35)/ПЛА(60)/МВ(5)	11,9	-3,4	-8,6	-14,0
ДМ(45)/ПЛА(50)/МВ(5)	5,3	-3,3	-10,2	-14,0
ДМ(55)/ПЛА(40)/МВ(5)	8,6	-6,6	-10,6	-14,3
ДМ(65)/ПЛА(30)/МВ(5)	4,5	-10,5	-11,5	-19,6
ГЛ(35)/ПЛА(60)/МВ(5)	6,5	-3,2	-2,6	-6,6
ГЛ(45)/ПЛА(50)/МВ(5)	6,1	-4,1	-8,1	-9,4
ГЛ(55)/ПЛА(40)/МВ(5)	6,6	-5,1	-6,6	-11,0
ГЛ(65)/ПЛА(30)/МВ(5)	14,1	-6,4	-6,0	-11,7
ГЛ(70)/ПЛА(25)/МВ(5)	3,7	-11,4	-11,5	-13,0



Рисунок 8 – Экспериментальные образцы изделий из композита на основе ПЛА
с ДМ (коричневый) и ГЛ (черный)

Figure 8 – Experimental samples of composite products based on PLA with DM (brown) and GL (black)

влияние последовательности введения компонентов при переработке высоконаполненных ЭДПК. Оптимальной является технология с предварительной обработкой ДН и раздельным совмещением компонентов (ПЭ+ДН)+ПП и (ПП+ДН)+ПЭ, обеспечивающая формирование на границе раздела «древесина – термопласт» иммобилизованного полимера в капиллярно-пористой структуре древесины. Внедренный в древесину и иммобилизованный полимер, принимая участие в процессах деформирования древеснополимерного композита, снижает концентрации напряжений в межфазных областях древеснополимерной системы. Изучена роль лигноцеллюлозных наполнителей (древесная мука, гречневая лузга)

при разработке биоразлагаемых композиционных материалов на основе ПЛА. Установлена зависимость водопоглощения и биоразложения от вида и содержания лигноцеллюлозных наполнителей (до 70 мас. %). Экспериментально установлено, что период биоразложения исследуемых композитов составил до 5 мес. Из разработанных композиционных материалов с содержанием наполнителя до 70 % получены экспериментальные образцы объемных формоустойчивых изделий.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Многофункциональные и композиционные материалы», задание 4.2.2.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Биоразлагаемые полимерные смеси и композиты из возобновляемых источников. [2013]. Санкт-Петербург: Научные основы и технологии, Российская Федерация.

Вольфсон, С.И., Мусин, И.Н., Файзуллин, И.З., Лыгина, Т.З. и Трофимова, Ф.А. [2014]. Модифицированные древесно-полимерные композиты. *Пластические массы*, № 1–2, С. 41–44.

Горбачев, А.В., Файзуллин, И.З., Вольфсон, С.И., Канарский, А.В., Захаров, И.В. и Казаков, Ю.М. [2023]. Композиционный материал на основе полиолефинов и модифицированных растительных наполнителей. *Пластические массы*, № 1 (1–2), С. 48–52. DOI:10.35164/0554-2901-2023-1-2-48-52.

Глухих, В.В., Мухин, Н.М., Шкуро, А.Е. и Бурындин, В.Г. [2014]. *Получение и применение изделий из древесно-полимерных композитов с термопластичными полимерными матрицами.* Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, Российская Федерация.

Клесов, А.А. [2010]. *Древесно-полимерные композиты.* Санкт-Петербург: Научные основы и технологии, Российская Федерация.

Колосова, А.С., Сокольская, М.К., Виткалова, И.А., Торлова, А.С. и Пикалов, Е.С. [2017]. Наполнители для модификации современных полимерных композиционных материалов. *Фундаментальные исследования*, № 10 (часть 3), С. 459–465.

Попов, В.М., Новиков, А.П., Бусарин, Э.Н. и Лушникова, Е.Н. [2012]. К созданию полимерных композиционных материалов с повышенными теплофизическими и механическими свойствами. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, Т 8, № 4, С. 153–155.

Сыцко, В.Е., Антонова, Е.Л., Шаповалов, В.М. и Зотов, С.В. [2023]. Рециклинг древесно-полимерных материалов как основа импортозамещения. *Потребительская кооперация*, № 3 [82], С. 14–18.

Тунцев, Д.В., Хайруллина, Э.Р. и Гайнуллин, М.Ш. [2021]. Технология переработки древесных отходов. *Инновационные решения социальных, экономических и технологических проблем современного общества: сб. науч. ст. по итогам круглого стола с всерос. и междунар. участием (15-16 июля 2021 г.)*, С. 41–43.

Файзуллин, И.З. [2015]. *Древесно-полимерные композиционные материалы на основе полипропилена и модифицированного древесного наполнителя: дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук*, Казань, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Российская Федерация.

Шаповалов, В.М., Барсуков, В.Г. и Купчинов, Б.И. [2000]. *Технология переработки высоконаполненных композитов.* Гомель: ИММС НАНБ, Республика Беларусь.

Шаповалов, В.М., Винидиктова, Н.С., Коваленко, М.А. и Конакова, О.В. [2024]. Биоразлагаемые пластики на основе растительного сырья: разновидности, свойства, области применения (обзор). *Полимерные материалы и технологии*,

ТЮ, № 2, С. 6–19.

Шаповалов, А.В., Тартаковский, З.Л. и Шаповалов, В.М. (2012). Исследование возможности вторичной переработки и биоразложения экструзионных древеснополимерных материалов. *Проблемы лесоведения и лесоводства: сборник научных трудов ИЛ НАН Беларуси*, № 72, С. 413–419.

Çetin, N.S., Özmen, N. and Birinci, E. (2011). Acetylation of wood with various catalysts. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, vol. 31, iss. 2, pp. 142–153.

Pushkin, S.A., Kozlova, L.V., Makarov, A.A., Grachev, A.N. and Gorshkova, T.A. (2015). Cell wall components in torrefied softwood and hardwood samples. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 116 (November), pp. 102–113.

Lee, S.Ho., Luvnish, A., Su, X., Meng, Q., Liu, M., Kuan, H.-C., Saman, W., Boström, M., Boström, M. and Ma, J. (2024). Advancements in polymer (Nano)composites for phase change material-based thermal storage: A focus on thermoplastic matrices and ceramic/carbon fillers. *Smart Materials in Manufacturing*, vol. 2., pp. 1–11. DOI:10.1016/j.smmf.2024.100044.

Lutfullayev, S.S.H. (2021). *Development of thermostabilizers for polyvinylchloride based on secondary modified products: monografiya*. Pune: Novateur Publication, India.

REFERENCES

Biorazlagaemye polimernye smesi i kompozity iz vozobnoslyayemykh istochnikov [Biodegradable polymer blends and composites from renewable sources]. (2013). Saint Petersburg: Scientific Foundations and Technologies, Russian Federation (In Russian).

Wolfson, S.I., Musin, I.N., Fayzullin, I.Z., Lygina, T.Z. and Trofimova, F.A. (2014). Modified wood-polymer composites [Modificirovannyye drevesno-polimernyye kompozity]. *Plasticheskie massy = Plastics*, no. 1–2, pp. 41–44. (In Russian).

Gorbachev, A.V., Fayzullin, I.Z., Wolfson, S.I., Kanarsky, A.V., Zakharov, I.V. and Kazakov, Yu.M. (2023). Composite material based on polyolefins and modified plant fillers [Kompozitsionnyy material na osnove poliolefinov i modificirovannykh rastitel'nykh napolnitelej]. *Plasticheskie massy = Plastics*, no. 1(1–2), pp. 48–52. DOI:10.35164/0554-2901-2023-1-2-48-52 (In Russian).

Glukhikh, V.V., Mukhin, N.M., Shkuro, A.E. and Buryndin, V.G. (2014). *Poluchenie i primeneniye izdelij iz drevesno-polimernykh kompozitov s termoplastichnymi polimernymi matricami* [Production and application of products from wood-polymer composites with thermoplastic polymer matrices]. Ekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, Russian Federation (In Russian).

Klesov, A.A. (2010). *Drevesno-polimernyye kompozity* [Wood-polymer composites]. St. Petersburg: Scientific Foundations and Technologies, Russian Federation (In Russian).

Kolosova, A.S., Sokolskaya, M.K., Vitkalova, I.A., Torlova, A.S. and Pikalov, E.S. (2017). Fillers for modifying modern polymer composite materials [Napolniteli dlya modifikatsii sovremennykh polimernykh kompozitsionnykh materialov]. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, no. 10 (part 3), pp. 459–465 (In Russian).

Popov, V.M., Novikov, A.P., Busarin, E.N. and Lushnikova, E.N. (2012). On the creation of polymer composite materials with enhanced thermophysical and mechanical properties [K sozdaniyu polimernykh kompozitsionnykh materialov s povyshennymi teplofizicheskimi i mekhanicheskimi svoystvami]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, vol. 8, no. 4, pp. 153–155 (In Russian).

Sytsko, V.E., Antonova, E.L., Shapovalov, V.M. and Zotov, S.V. (2023). Recycling of wood-polymer materials as a basis for import substitution [Recikling drevesno-polimernykh materialov kak osnova importozameshcheniya]. *Potrebitel'skaya kooperatsiya = Consumer Cooperatives*, no. 3 (82), pp. 14–18 (In Russian).

Tuntsev, D.V., Khairullina, E.R. and Gainullin, M.Sh. (2021). Wood Waste processing technology [Tekhnologiya pererabotki drevesnykh othodov]. *Innovatsionnye resheniya social'nykh, ekonomicheskikh i tekhnologicheskikh problem sovremennogo obshchestva: sb. nauch. st. po itogam kruglogo stola s vseros. i mezhdunar. uchastiem (15–16 iyulya 2021 g.) = Innovative Solutions to Social, Economic, and Technological Problems of Modern Society: Coll. scientific articles following the round table with all-Russian and international participation (July 15–16, 2021)*, pp. 41–43 (In Russian).

Fayzullin, I.Z. (2015). *Drevesno-polimernye kompozicionnye materialy na osnove polipropilena i modifitsirovannogo drevesnogo napolnitelya: diss. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tekhn. nauk* [Wood-polymer composite materials based on polypropylene and modified wood filler: Dissertation for the degree of Cand. Sci]. Kazan, Kazan National Research Technological University, Russian Federation [In Russian].

Shapovalov, V.M., Barsukov, V.G. and Kupchinov, B.I. (2000). *Tekhnologiya pererabotki vysokonapolnennykh kompozitov* [Highly filled composites processing technology]. Gomel: IMMS NASB, Republic of Belarus [In Russian].

Shapovalov, V.M., Vinidiktova, N.S., Kovalenko, M.A. and Konakova, O.V. (2024). Biodegradable plastics based on plant-based raw materials: types, properties, and applications (review) [Biorazlagaemye plastiki na osnove rastitel'nogo syr'ya: raznovidnosti, svoystva, oblasti primeneniya (obzor)]. *Polimernye materialy i tekhnologii = Polymer Materials and Technologies*, vol. 10, no. 2, pp. 6–19 [In Russian].

Shapovalov, A.V. Tartakovsky, Z.L. and Shapovalov, V.M. (2012). Study of the possibility of recycling and biodegradation of extruded wood-polymer materials [Issledovanie vozmozhnosti vtorichnoj pererabotki i biorazlozheniya ekstruzionnykh drevesnopolimernykh materialov]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva: sbornik nauchnykh trudov IL NAN Belarusi = Problems of Forestry and Silviculture: Collection of Scientific Papers of the IL NAS of Belarus*, no. 72, pp. 413–419 [In Russian].

Çetin, N.S., Özmen, N. and Birinci, E. (2011). Acetylation of wood with various catalysts. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, vol. 31, iss. 2, pp. 142–153.

Pushkin, S.A., Kozlova, L.V., Makarov, A.A., Grachev, A.N. and Gorshkova, T.A. (2015). Cell wall components in torrefied softwood and hardwood samples. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 116 [November], pp. 102–113.

Lee, S.Ho., Luvnish, A., Su, X., Meng, Q., Liu, M., Kuan, H.-C., Saman, W., Boström, M., Boström, M. and Ma, J. (2024). Advancements in polymer (Nano)composites for phase change material-based thermal storage: A focus on thermoplastic matrices and ceramic/carbon fillers. *Smart Materials in Manufacturing*, vol. 2., pp. 1–11. DOI:10.1016/j.smmf.2024.100044.

Lutfullayev, S.SH. (2021). *Development of thermostabilizers for polyvinylchloride based on secondary modified products: monografiya*. Pune: Novateur Publication, India.

Информация об авторах

Information about the authors

Шаповалов Виктор Михайлович

Доктор технических наук, главный научный сотрудник отдела № 1, Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, Республика Беларусь.

E-mail: shapovalov@mpri.org.by

Винидиктова Наталья Сергеевна

Кандидат технических наук, заведующая отделом № 1, Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, Республика Беларусь.

Viktor M. Shapovalov

Doctor of Science (in Engineering), Chief Researcher, Department No.1, V.A. Bely Institute of Mechanics of Metallopolymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus.

E-mail: shapovalov@mpri.org.by

Natalia S. Vinidiktova

Candidate of Sciences (in Engineering), Head of Department No. 1, V.A. Bely Institute of Mechanics of Metallopolymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus.