

УДК 691.175.2

ПОЛУЧЕНИЕ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ ПОЛИМЕРНЫХ УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИОЛЕФИНОВ И ДРЕВЕСНОЙ МУКИ

© А.А. Шабарин, А.М. Кузьмин*, Ю.И. Матюшкина, И.А. Шабарин

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,
ул. Большевистская, 68, Саранск, 430005 (Россия),
e-mail: kuzmin.a.m@yandex.ru

В работе представлены результаты сравнительного изучения физико-механических, реологических и биодиструкционных характеристик композиционных материалов на основе смеси полиэтиленов низкого (ПЭНД 273-83) и высокого (ПЭВД 15303-003) давления в соотношении 1 : 1 наполненных тонкоизмельченной древесной мукой с размером частиц менее 200 мкм (5–30% по массе) в присутствии 10% компатибилизатора (функционализированного методом щелочного алкохолиза севилена (СЭВА 12206-007)) и технологической добавки 1% полиэтиленгликоля (ПЭГ-115 (4000)). Установлено, что по мере увеличения содержания растительного наполнителя (до 20%) модуль упругости и предел прочности практически не изменяются. Относительное удлинение композита при растяжении превышает 100% (до содержания древесной муки – 15% по массе). Комплексная вязкость и модуль сдвига рассматриваемых расплавов с различным содержанием наполнителя находятся практически на одном уровне. При этом введение древесной муки до 30% и компатибилизатора (10%) способствует незначительному увеличению вязкости и упругости расплавов, что практически не влияет на изменение технологичности композиций по сравнению с ПЭНД 273-83. Для сравнительной оценки способности композитов к биодеструкции исследованы влагопоглощение, химическое потребление кислорода и потеря массы композитов в лабораторном грунте при экспозиции в течение 12 месяцев. Показано, что по мере увеличения содержания наполнителя способность композитов к биодеструкции усиливается.

Ключевые слова: биоразлагаемые композиционные материалы, полиэтилен, севилен, древесная мука, компаундирование, прочность, модуль упругости.

Введение

Применение возобновляемых источников сырья в производстве биологически разрушаемых полимерных упаковочных материалов является основным направлением сокращения объемов образующихся отходов, так как будет обеспечиваться их быстрое разложение под действием микроорганизмов и климатических факторов.

Придание синтетическим полимерам свойства биоразлагаемости является основной задачей, которая позволит значительно сократить количество полимерных отходов и улучшить экологическую обстановку.

В связи с этим в последние годы проводится большой объем исследований в области создания биоразлагаемых композиционных материалов на основе термопластичных связующих с наполнителями, уско-

Шабарин Александр Александрович – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры неорганической химии и аналитической химии, e-mail: shab_aa@mail.ru

Кузьмин Антон Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции, e-mail: kuzmin.a.m@yandex.ru

Матюшкина Юлия Ивановна – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры неорганической химии и аналитической химии, e-mail: yugusyaeva@mail.ru

Шабарин Игорь Александрович – студент, e-mail: igorshabarin2000@mail.ru

ряющими процесс биодеградации [1–8]. В качестве наполнителей используются сухие тонкодисперсные порошки растительного происхождения, к наиболее доступным и часто применяемым относятся отходы деревообрабатывающего производства (щепы, опилки, древесная мука, древесная пыль и др.) [9–15].

В исследованиях [1–4] показана возможность получения биоразлагаемых композиционных материалов на основе полиэтилена и древесной муки, а также других лигноцеллюлозных

* Автор, с которым следует вести переписку.

наполнителей. Введение древесной муки в полиэтиленовую матрицу приводит к увеличению водопоглощения и повреждению полученных образцов почвенными микроорганизмами и плесневыми грибами [1].

В мировой практике уделяют особое внимание исследованиям по получению и совершенствованию рецептур биоразлагаемых композиционных материалов на основе термопластичных полимеров с целлюлозо-содержащими наполнителями [16] и древесной мукой [18–22]. При этом отмечается, что свойства композита зависят от типа и химического состава древесного наполнителя, выбора полимерной матрицы, используемых методов совмещения и способов переработки [18, 20]. В работе [19] исследованы смеси на основе полиэтилена низкого давления и полилактида с добавлением древесной муки. Показано, что древесная мука незначительно снижает упруго-прочностные характеристики получаемых биокомпозитов, а добавление компатибилизатора в виде маленинизированного полиэтилена способствует однородному распределению наполнителя в смеси полимеров.

Биоразлагаемые композиты находят широкое применение в различных отраслях промышленности, в том числе и в упаковочной отрасли.

Таким образом, целью настоящей работы является получение и исследование физико-механических, реологических и биодеструкционных свойств термопластичных полиолефиновых композитов наполненных древесной мукой, полученной из древесины хвойных пород.

Материалы и методы

В работе использованы полиэтилены низкого (ПЭНД 273-83) и высокого (ПЭВД 15303-003) давления, в качестве пластификатора использовали полиэтиленгликоль ПЭГ-115 (4000), в качестве растительного наполнителя – предварительно высушенные и измельченные на роторно-ножевой мельнице РМ-100 опилки древесины хвойных пород. Размер частиц растительного наполнителя составил менее 200 мкм. В качестве компонента, обеспечивающего термодинамическую совместимость полиэтилена и растительного наполнителя, в композит вводили сэвилен (СЭВА 12206-007), функционализированный методом алкоголиза [6].

Компаундирование компонентов проводилось на лабораторном двухроторном смесителе *HAAKE PolyLab Rheomix 600 OS* при температуре во всех зонах 150 °С и частоте вращения роторов – 50 об./мин.

На рисунке 1 представлены типичные кривые зависимости крутящего момента и температуры от времени смешения композиции. На первом этапе гранулы ПЭНД и ПЭВД загружали в камеру смесителя, где происходило плавление и смешение полимеров (цифра 1); на втором этапе к смеси полиэтиленов добавляли функционализированный сэвилен (цифра 2). После расплавления и гомогенизации термопластичных связующих на третьем этапе вводили растительный наполнитель (цифра 3). Смешение продолжали до установления постоянных значений крутящего момента и температуры. Общее время смешения составило 10 мин.

Для проведения исследований методом прессования на гидравлическом прессе *Gibitre* формовали из компаунда пластины размером 200×200×1 мм. Компрессионное формование проводили при температуре 150 °С и давлении 2.5 МПа в течение 5 мин. Затем без изменения давления в течение 15 мин охлаждали до 40 °С. Из полученных пластин вырубали штанцем стандартные образцы (полоски размером 150×15 мм и диски размером 20 ×1 мм) соответственно для упруго-прочностных (ГОСТ 11262-80) и реологических исследований.

Упруго-прочностные испытания подготовленных образцов проводили на универсальной испытательной машине *UAI-7000 M* при температуре 23±2 °С и скорости движения зажимов – 10 мм/мин. Предел прочности и модуль упругости вычислены по ГОСТ 11262-80 и ГОСТ 9550-81.

Реологические испытания проводились на реометре *Haake MARS III* в динамическом режиме при амплитуде осцилляций ротора – 0.001 рад., в диапазоне угловых скоростей – 0–100 с⁻¹, а температур расплава – 150–180 °С. Рабочий зазор между плоскостями измерительной системы составлял 1 мм. При обработке результатов, полученных для различных температур, использован принцип температурно-временной суперпозиции Больцмана, реализованный в программе *RheoWin TTS*, что позволило расширить диапазон скоростей сдвига расплавов.

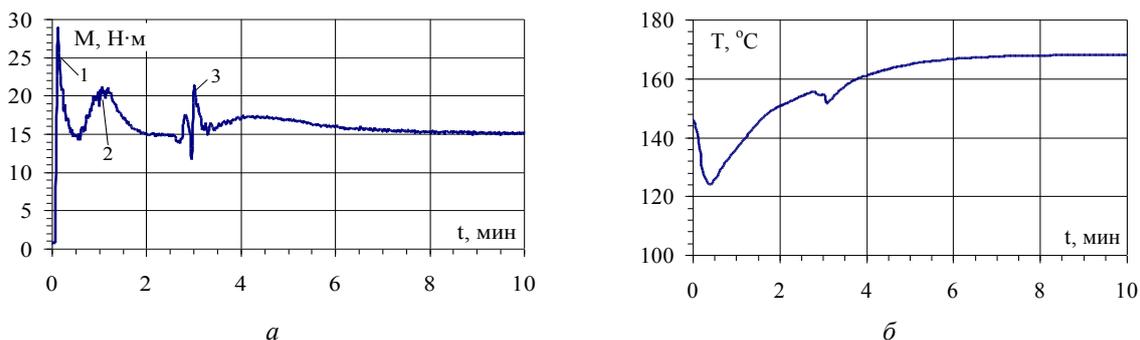


Рис. 1. Типичные кривые зависимости крутящего момента (*а*) и температуры (*б*) от времени смешения

Испытание композиционных материалов на влагопоглощение проводили согласно ГОСТ 4650-80 (метод А). Влажность наполнителя (древесная мука) определяли термогравиметрическим методом на анализаторе влажности «Эвлас-2М».

Разлагаемость композиционных материалов оценивали по потере их массы при выдержке образцов в грунте, приготовленном в соответствии с ГОСТ 9.060-75, при экспозиции в течение 12 месяцев (температура воздуха 23 ± 2 °С) и по результатам химического поглощения кислорода (ХПК) единицей площади композита при окислении его раствором дихромата калия в кислой среде [2]. Растворы дихромата калия (0.1 моль-экв./л), соли Мора (0.05 моль-экв./л), N-фенилантралиновой кислоты готовили в соответствии с ПНД Ф 14.1:2.100-97. Для создания кислой среды использовали серную кислоту (ч.д.а.). Кипячение композитов проводили в термостойкой колбе с обратным холодильником в течение 2 ч. Окислительный раствор содержал 15 мл 0.1 моль-экв./л дихромата калия в присутствии 5 мл серной кислоты (96%). Остаточную концентрацию $K_2Cr_2O_7$ определяли титрованием раствором соли Мора с N-фенилантралиновой кислотой.

Результаты и их обсуждение

По строению главной цепи синтетические полимеры бывают карбоцепные и гетероцепные. При этом гетероцепные полимеры за счет гетероатомов в главной цепи проявляют способность к биоразложению. Разложение полимеров, происходящее под каталитическим влиянием бактерий и других биологических объектов, лучше всего происходит в присутствии влаги. Поэтому к числу биоразлагаемых относятся гидрофильные полимеры, поверхность которых хорошо смачивается водой. Такими являются, прежде всего, природные гетероцепные полимеры целлюлоза и крахмал.

Вещественный состав древесины различных пород существенно колеблется. Но в целом можно отметить, что древесина хвойных пород содержит целлюлозу (48–56%), лигнин (26–30%), гемицеллюлоз (23–26%) [17]. Поэтому древесную муку перспективно использовать в качестве наполнителя в полиолефины при производстве биоразлагаемых упаковочных пленок. Чтобы обеспечить достижение термодинамической совместимости между всеми компонентами полимерной смеси, целесообразно использовать компатибилизаторы. В качестве последнего нами предложено использовать функционализированный методом щелочного алкоголиза сэвилен СЭВА Ф [6]. Выбор в качестве полимерной матрицы комбинации полиэтиленов объясняется необходимостью обеспечения хорошего комплекса упруго-прочностных показателей (за счет ПЭНД 273-83), повышения технологичности расплава (за счет ПЭВД 15303-003). Согласно ранее проведенным исследованиям [7], соотношение между ПЭНД 273-83 и ПЭВД 15303-003 целесообразно использовать равным 1 : 1 по массе.

Содержание древесной муки в композите варьировали в диапазоне 5–30% по массе. Ранее на примере наполнителя крахмала было показано, что оптимальное содержания компатибилизатора (СЭВА Ф) в композите должно составляет 10% по массе [6]. В качестве пластификатора в композит вводили 1% полиэтиленгликоля (ПЭГ-115 (4000)).

Зависимость физико-механических характеристик от содержания наполнителя в композитах представлена в таблице 1. Видно, что по мере увеличения содержания древесной муки (до 20%) модуль упругости E и предела прочности σ изменяются не значительно. Относительное удлинение композита при растяжении L превышает 100% при содержании наполнителя до 15% по массе. Максимальный предел прочности и модуль упругости показывает композиция с содержанием 10% древесной муки.

Для сравнительной оценки технологичности полученных компаундов проведены реологические исследования при температурах 150, 160, 170, 180 °С, отвечающих процессам получения пленок методом плоскощелевой экструзии.

Реологические испытания расплавов композитов в динамическом режиме проводили на реометре *Haake MARS III* на измерительной системе «плоскость-плоскость» (с диаметрами рифленых ротора и неподвижной плоскости 20 мм). Испытания проведены в динамическом режиме при амплитуде осцилляций ротора – 0.001 рад., в диапазоне угловых скоростей – 0–100 с⁻¹, а температур расплава – 150–180 °С. Согласно соотношениям Кокса-Мерца такие испытания эквивалентны испытаниям с вращающимся ротором, если угловая скорость осциллирующего ротора соответствует скорости сдвига расплава, достигаемой при вращении ротора [23].

Рабочий зазор между плоскостями измерительной системы составлял 1 мм. При обработке результатов, полученных для различных температур, использован принцип температурно-временной суперпозиции Больцмана, реализованный в программе *RheoWin TTS*, что позволило расширить диапазон скоростей сдвига расплавов.

На рисунках 2 и 3 представлены зависимости комплексной вязкости и динамического модуля сдвига, характеризующего упругость расплава, при температуре приведения 150 °С от скорости сдвига (угловой скорости осцилляций ротора при амплитуде 0.001 рад.) с концентрацией древесного наполнителя 5 и 30%. Из графиков следует, что комплексная вязкость рассматриваемых расплавов описывается степенным законом Оствальда де Ваале.

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1},$$

где τ – напряжение сдвига, Па; K – коэффициент консистенции, Па·сⁿ; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с⁻¹; n – показатель степени вязкости.

Таблица 1. Физико-механические характеристики композитов на основе, СЭВА(Ф) (10%), древесная мука (5–30%), ПЭГ (1%), ПЭНД : ПЭВД 1 : 1 (Остальное) (n=5, P=0.90)

Содержание древесной муки, %	Модуль упругости (E), МПа	Относительное удлинение (L), %	Предел прочности (σ), МПа
5	225±9	199	12.94±0.4
10	227±11	136	13.22±0.12
15	219±13	101	12.9±0.7
20	212±8	26	11.80±0.18
25	184±10	14	10.62±0.14
30	168±11	10	10.34±0.25

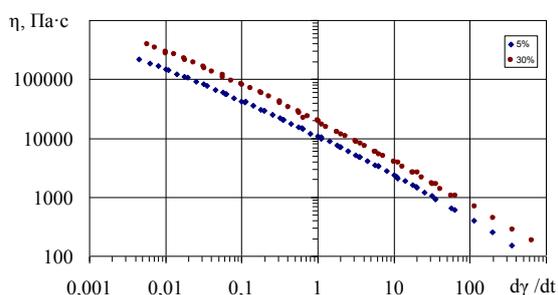


Рис. 2. Типичные кривые зависимости комплексной вязкости расплавов композитов от угловой скорости ротора, приведенные к $T_0=150$ °С, для концентраций древесной муки 5% и 30%; $d\gamma/dt$ – угловая скорость сдвига

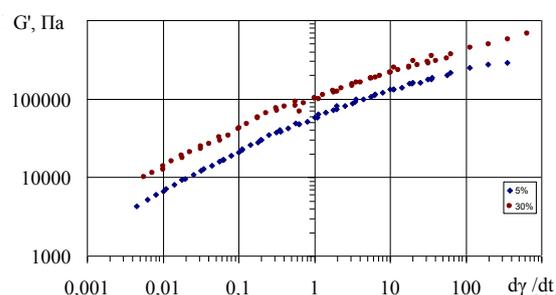


Рис. 3. Типичные кривые зависимости динамического модуля сдвига расплавов композитов от угловой скорости ротора, приведенные к $T_0=150$ °С, для концентраций древесной муки 5% и 30%; $d\gamma/dt$ – угловая скорость сдвига

Повышение концентрации древесной муки от 5 до 30% способствует незначительному увеличению комплексной вязкости и динамического модуля упругости, что подтверждается реологическими характеристиками, приведенными в таблице 2.

Все процессы биодеструкции полимерных материалов под действием факторов окружающей среды протекают в присутствии влаги и кислорода воздуха. Поэтому для сравнительной оценки исследованы влагопоглощения, ХПК и потеря массы композитов в лабораторном грунте при экспозиции в течение 12 месяцев. Представленные в таблице 3 результаты показывают, что по мере увеличения содержания наполнителя способность композитов к биодеструкции усиливается.

Таблица 2. Реологические характеристики разрабатываемых биоразлагаемых композиций

Содержание древесной муки, %	Коэффициент консистенции, К, Па·с ⁿ	Показатель степени вязкости, n	Коэффициент корреляции, R
5	9713	0.3686	0.995
10	10225	0.3686	0.995
15	11131	0.3762	0.995
20	10123	0.305	0.992
25	14976	0.3278	0.996
30	17007	0.3297	0.996

Таблица 3. Величины влагопоглощения, ХПК и потери массы в грунте (12 месяцев) образцов композитов на основе СЭВА(Ф) (10%), древесная мука (5–30%), ПЭГ(1%), ПЭНД : ПЭВД 1 : 1 (Остальное) (n=5, P=0.90)

Содержание древесной муки, %	Влагопоглощение, %	ХПК, мг О/дм ²	Потеря массы в грунте, %
5	0.25±0.02	9.7±0.9	1.7±0.2
10	0.35±0.05	12.5±1.0	2.9±0.5
15	0.44±0.01	21.7±1.6	5.9±0.6
20	0.67±0.09	29.1±1.9	7.0±0.6
25	1.25±0.16	46.0±2.3	8.1±0.7
30	1.82±0.03	70.0±0.9	9.1±0.7

Выводы

Таким образом, в результате проведенного исследования получены и исследованы образцы биоразлагаемых композиционных материалов с древесным наполнителем. Применение древесной муки хвойных пород позволит снизить себестоимость упаковочных материалов, но при этом сохраняются удовлетворительные технологические и упруго-прочностные характеристики.

Список литературы

1. Колесникова Н.Н., Королева А.В., Лихачев А.Н., Луканина Ю.К., Пантюхов П.А., Попов А.А., Хватов А.В., Стоянов О.А., Заиков Г.Е., Абзальдинов Х.С. Биоразлагаемые композиционные материалы на основе полиэтилена и древесной муки // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. №21. С. 164–167.
2. Попов А.А., Зыкова А.К., Масталыгина Е.Е. Биоразлагаемые композиционные материалы (Обзор) // Химическая физика. 2020. Т. 39. №6. С. 71–80. DOI: 10.31857/S0207401X20060096.
3. Пантюхов П.В., Монахова Т.В., Попов А.А. Композиционные материалы на основе полиэтилена и лигноцеллюлозных наполнителей структура и свойства // Башкирский химический журнал. 2012. №2. С. 111–117.
4. Попов А.А., Пантюхов П.В., Монахова Т.В. Свойства композиционных материалов, полученных на основе полиэтилена и лигноцеллюлозы // Новое в полимерах и полимерных композитах. 2012. №2. С. 141–149.
5. Шабарин А.А., Шабарин А.А., Водяков В.Н., Кузьмин А.М. Получение биоразлагаемых упаковочных материалов на основе полиолефинов и свекловичного жома // Техника и оборудование для села. 2017. №7. С. 14–19.
6. Шабарин А.А., Шабарин А.А., Водяков В.Н. Получение биоразлагаемых композиционных материалов на основе полиэтилена и функционализированного методом алкоголиза сополимера этилена с винилацетатом // Вестник Мордовского университета. 2016. №2. С. 259–268. DOI: 10.15507/0236-2910.026.201602.259-268.
7. Шабарин А.А., Шабарин А.А., Водяков В.Н., Кузьмин А.М. Биоразлагаемые композиционные материалы на основе полиолефинов и пивной дробины // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 19. №17. С. 67–70.

8. Роговина С.З., Прут Э.В., Берлин А.А. Композиционные материалы на основе синтетических полимеров, армированных волокнами природного происхождения (Обзор) // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2019. Т. 61. №4. С. 291–315. DOI: 10.1134/S2308112019040084.
9. Роговина С.З., Грачев А.В., Алексанян К.В., Прут Э.В. Исследование термостабильности смесей на основе синтетических полимеров и природных полисахардов // *Химия растительного сырья*. 2010. №4. С. 45–50.
10. Харьковская Е.М., Менделеев Д.И., Гусева М.А., Шклярчук Б.Ф., Герасин В.А., Антипов Е.Н. Исследование структуры и способности к окислительному разложению полимер-полимерных композиций на основе крахмала и полиэтилена, полученных методом полимеризационного наполнения // *Высокомолекулярные соединения. Серия Б*. 2017. Т. 59. №5. С. 393–401. DOI: 10.7868/S2308113917050059.
11. Шишлов О.Ф., Дождикова С.А., Глухих В.В. Изучение влияния вида наполнителя на кинетику отверждения композиционных материалов на основе фенолкарданолформальдегидных новолоочных смол // *Химия растительного сырья*. 2014. №4. С. 219–227. DOI: 10.14258/jcrpm.201404232.
12. Захаров В.П., Фахретдинов Р.К., Галиев Л.Р., Садритдинов А.Р., Лаздин Р.Ю., Кулиш Е.И. Физико-химические свойства вторичного полипропилена, наполненного древесной мукой // *Пластические массы*. 2018. №7-8. С. 62–64.
13. Катраков И.Б., Маркин В.И., Колосов П.В. Бифункциональные синтетические связующие как альтернатива бесформальдегидного производства древесных плитных материалов // *Химия растительного сырья*. 2018. №3. С. 251–260. DOI: 10.14258/jcrpm.2018034338.
14. Вольфсон С.И., Файзулин И.З., Мусин И.Н., Грачев А.Н., Пушкин А.С. Физико-механические и реологические характеристики древесно-полимерных композитов на основе термически и механически модифицированного наполнителя // *Пластические массы*. 2015. №5-6. С. 39–43.
15. Абдрахманова Л.А., Хантимиров А.Г., Низамов Р.К., Хозин В.Г. Древесно-полимерные наномодифицированные поливинилхлоридные строительные композиты // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13, вып. 4 (115). С. 426–434. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.426-434.
16. Глухих В.В., Шкуро А.Е., Гуда Т.А., Стоянов О.В. Получение, свойства и применение биоразлагаемых древесно-полимерных композитов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. Т. 15. №9. С. 75–82.
17. Никитин В.М., Оболенский А.В., Щеголев В.П. *Химия древесины и целлюлозы*. М., 1978. 368 с.
18. Chan C.M., Vandi L.-J., Pratt S., Halley P., Richardson D., Werker A., Laycock B. Composites of Wood and Biodegradable Thermoplastics: A Review // *Polymer Reviews*. 2017. Vol. 58(3). Pp. 444–494. DOI: 10.1080/15583724.2017.1380039.
19. Quitadamo A., Massardier V., Valente M. Eco-Friendly Approach and Potential Biodegradable Polymer Matrix for WPC Composite Materials in Outdoor Application // *International Journal of Polymer Science*. 2019. Vol. 2019. 3894370. DOI: 10.1155/2019/3894370.
20. Satyanarayana K.G., Arizaga G.G.C., Wypych F. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers – An overview // *Progress in Polymer Science*. 2009. Vol. 34(9). Pp. 982–1021. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2008.12.002.
21. Vedrtnam A., Kumar S., Chaturvedi S. Experimental study on mechanical behavior, biodegradability, and resistance to natural weathering and ultraviolet radiation of wood-plastic composites // *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 176. 107282. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107282.
22. Tsou C.-Y., Wu C.-L., Tsou C.-H., Chiu S.-H., Suen M.-C., Hung W.-S. Biodegradable composition of poly(lactic acid) from renewable wood flour // *Polymer Science Series B*. 2015. Vol. 57(5). Pp. 473–480. DOI: 10.1134/s1560090415050164.
23. Шрамм Г. *Основы практической реологии и реометрии*. М., 2003. 312 с.

Поступила в редакцию 29 апреля 2021 г.

После переработки 15 февраля 2022 г.

Принята к публикации 14 апреля 2022 г.

Для цитирования: Шабарин А.А., Кузьмин А.М., Матюшкина Ю.И., Шабарин И.А. Получение биоразлагаемых полимерных упаковочных материалов на основе полиолефинов и древесной муки // *Химия растительного сырья*. 2022. №2. С. 307–314. DOI: 10.14258/jcrpm.2022029532.

*Shabarin A.A., Kuzmin A.M.**, Matushkina Y.I., Shabarin I.A. PRODUCTION OF BIODEGRADABLE POLYMERIC PACKAGING MATERIALS BASED ON POLYOLEFINS AND WOOD FLOUR*National Research Ogarev Mordovia State University, ul. Bol'shevistskaya, 68, Saransk, 430005 (Russia)*

The paper presents the results of a comparative study of the physics and mechanical, rheological and biodegradation characteristics of composite materials based on a mixture of polyethylenes of low (LDPE 273-83) and high (HDPE 15303-003) pressure in a ratio of 1 : 1. The composite was also filled with finely ground wood flour with a particle size of less than 200 microns (5-30% by weight) and 10% compatibilizer (functionalized by the alkaline alcoholysis splitting method of sevilene (EVA 12206-007) and a processing additive of 1% polyethylene glycol (PEG-115 (4000)). It has been found that with an increase in the content of wood flour (up to 20%), the modulus of elasticity and ultimate strength practically have not changed. The tensile elongation of the composite exceeds 100% (if the content of wood flour is up to 15% by weight). The complex viscosity and shear modulus of the considered melts with different filler contents are practically at the same level. At the same time, the introduction of wood flour up to 30% and a compatibilizer (10%) promotes a slight increase in the viscosity and elasticity of melts, which practically does not affect the change in the manufacturability of the compositions in comparison with LDPE 273-83. For a comparative assessment of the ability of composites to biodegradation, moisture absorption, chemical oxygen consumption, and weight loss of composites in laboratory soil during exposure for 12 months were studied. It has been shown that as the filler content increases, the biodegradability of composites increases.

Keywords: biodegradable composite materials, polyethylene, sevilene (EVA), wood flour, compounding, strength, elastic modulus.

Referenses

1. Kolesnikova N.N., Koroleva A.V., Likhachev A.N., Lukanina Yu.K., Pantyukhov P.A., Popov A.A., Khvatov A.V., Stoyanov O.A., Zaikov G.Ye., Abzal'dinov Kh.S. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, vol. 16, no. 21, pp. 164–167. (in Russ.).
2. Popov A.A., Zykova A.K., Mastalygina Ye.Ye. *Khimicheskaya fizika*, 2020, vol. 39, no. 6, pp. 71–80. DOI: 10.31857/S0207401X20060096. (in Russ.).
3. Pantyukhov P.V., Monakhova T.V., Popov A.A. *Bashkirskiy khimicheskij zhurnal*, 2012, no. 2, pp. 111–117. (in Russ.).
4. Popov A.A., Pantyukhov P.V., Monakhova T.V. *Novoye v polimerakh i polimernykh kompozitakh*, 2012, no. 2, pp. 141–149. (in Russ.).
5. Shabarin A.A., Shabarin A.A., Vodyakov V.N., Kuz'min A.M. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela*, 2017, no. 7, pp. 14–19. (in Russ.).
6. Shabarin A.A., Shabarin A.A., Vodyakov V.N. *Vestnik Mordovskogo universiteta*, 2016, no. 2, pp. 259–268. DOI: 10.15507/0236-2910.026.201602.259-268. (in Russ.).
7. Shabarin A.A., Shabarin A.A., Vodyakov V.N., Kuz'min A.M. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 17, pp. 67–70. (in Russ.).
8. Rogovina S.Z., Prut E.V., Berlin A.A. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Seriya A*, 2019, vol. 61, no. 4, pp. 291–315. DOI: 10.1134/S2308112019040084. (in Russ.).
9. Rogovina S.Z., Grachev A.V., Aleksanyan K.V., Prut E.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2010, no. 4, pp. 45–50. (in Russ.).
10. Khar'kova Ye.M., Mendeleyev D.I., Guseva M.A., Shklyaruk B.F., Gerasin V.A., Antipov Ye.N. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Seriya B*, 2017, vol. 59, no. 5, pp. 393–401. DOI: 10.7868/S2308113917050059. (in Russ.).
11. Shishlov O.F., Dozhdikov S.A., Glukhikh V.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2014, no. 4, pp. 219–227. DOI: 10.14258/jcprm.201404232. (in Russ.).
12. Zakharov V.P., Fakhretdinov R.K., Galiyev L.R., Sadritdinov A.R., Lazdin R.Yu., Kulish Ye.I. *Plasticheskiye massy*, 2018, no. 7-8, pp. 62–64. (in Russ.).
13. Katrakov I.B., Markin V.I., Kolosov P.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2018, no. 3, pp. 251–260. DOI: 10.14258/jcprm.2018034338. (in Russ.).
14. Vol'fon S.I., Fayzulin I.Z., Musin I.N., Grachev A.N., Pushkin A.S. *Plasticheskiye massy*, 2015, no. 5-6, pp. 39–43. (in Russ.).
15. Abdrakhmanova L.A., Khantimirov A.G., Nizamov R.K., Khozin V.G. *Vestnik MGSU*, 2018, vol. 13, no. 4 (115), pp. 426–434. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.426-434. (in Russ.).
16. Glukhikh V.V., Shkuro A.Ye., Guda T.A., Stoyanov O.V. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, vol. 15, no. 9, pp. 75–82. (in Russ.).
17. Nikitin V.M., Obolenskiy A.V., Shchegolev V.P. *Khimiya drevesiny i tsellyulozy*. [Chemistry of wood and cellulose]. Moscow, 1978, 368 p. (in Russ.).
18. Chan C.M., Vandi L.-J., Pratt S., Halley P., Richardson D., Werker A., Laycock B. *Polymer Reviews*, 2017, vol. 58(3), pp. 444–494. DOI: 10.1080/15583724.2017.1380039.
19. Quitadamo A., Massardier V., Valente M. *International Journal of Polymer Science*, 2019, vol. 2019, 3894370. DOI: 10.1155/2019/3894370.

* Corresponding author.

20. Satyanarayana K.G., Arizaga G.G.C., Wypych F. *Progress in Polymer Science*, 2009, vol. 34(9), pp. 982–1021. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2008.12.002.
21. Vedrtnam A., Kumar S., Chaturvedi S. *Composites Part B: Engineering*, 2019, vol. 176, 107282. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107282.
22. Tsou C.-Y., Wu C.-L., Tsou C.-H., Chiu S.-H., Suen M.-C., Hung W.-S. *Polymer Science Series B*, 2015, vol. 57(5), pp. 473–480. DOI: 10.1134/s1560090415050164.
23. Shramm G. *Osnovy prakticheskoy reologii i reometrii*. [Fundamentals of practical rheology and rheometry]. Moscow, 2003, 312 p. (in Russ.).

Received April 29, 2021

Revised February 15, 2022

Accepted April 14, 2022

For citing: Shabarin A.A., Kuzmin A.M., Matushkina Y.I., Shabarin I.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2022, no. 2, pp. 307–314. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2022029532.