



ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА СОВРЕМЕННЫХ УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Мухиддинов Б.Ф. ¹[0009-0006-2411-2914], Истамов Х.Й. ²[0009-0008-6550-2980],
Оликулов Ф.Ж. ³[0009-0006-1417-1937]

¹Навоийский государственный горный и технологический университет, доктор
химических наук, профессор кафедры “Химическая технология”,
E_mail: muhiddinov.b@mail.ru

²Навоийский государственный горный и технологический университет, базовый
докторант кафедры “Химическая технология”, E_mail: hayot.istamov.job@gmail.com

³Навоийский государственный горный и технологический университет, (PhD), доцент
кафедры “Химическая технология”, E_mail: faxriyor2009@mail.ru

Аннотация. В статье представлен комплексный анализ проблемы утилизации синтетических полимеров и перспектив использования биоразлагаемых материалов в производстве современной упаковки. Исследован мировой рынок биопластиков, показывающий устойчивый рост с прогнозируемым увеличением от 2,09 млн тонн в 2024 году до 4,63 млн тонн к 2029 году. Проведена классификация и характеристика существующих биоразлагаемых полимеров. Представлены результаты экспериментальных исследований композиционных материалов на основе полипропилена и кукурузного крахмала с использованием моностеарата глицерина (GMS) в качестве компатибилизатора. Установлено, что оптимальная концентрация GSM составляет 2-3%, обеспечивая улучшение совместимости компонентов, снижение водопоглощения на 20-25% и повышение прочностных характеристик на 10-15%. Разработанные композиции с содержанием крахмала 40-50% демонстрируют значительную степень биодеструкции (потеря массы 30-38% после 6 месяцев компостирования) при сохранении удовлетворительных эксплуатационных свойств. Техно-экономический анализ подтверждает экономическую целесообразность производства данных материалов по сравнению с существующими коммерческими аналогами, что делает их перспективными для широкого внедрения в промышленность упаковочных материалов.

Ключевые слова: биоразлагаемые полимеры, композиционные материалы, полипропилен, крахмал, моностеарат глицерина, компатибилизатор, упаковочные материалы, экологичность, биодegradация, устойчивое развитие.

Annotatsiya. Maqolada sintetik polimerlarni utilizatsiya qilish muammosi va zamonaviy qadoqlash materiallari ishlab chiqarishda bioparchalanuvchi materiallardan foydalanish istiqbollari bo'yicha kompleks tahlil taqdim etilgan. Global bioplastiklar bozori 2024 yildagi 2,09 million tonnadan 2029 yilga kelib 4,63 million tonnaga kutilayotgan barqaror o'sishni ko'rsatmoqda. Mavjud bioparchalanuvchi polimerlarning tasnifi va tavsifi o'tkazilgan. Glitserin monostearat (GMS)ni moslashtirgich (kompatibilizator) sifatida qo'llagan holda polipropilen va makkajo'xori kraxmali asosidagi kompozit materiallar bo'yicha eksperimental tadqiqotlar natijalari taqdim etilgan. GMSning optimal kontsentratsiyasi 2-3% ekanligi aniqlangan, bu komponentlarning moslashuvchanligini yaxshilaydi, suv shimishini 20-25% ga kamaytiradi va mustahkamlik xususiyatlarini 10-15% ga oshiradi. 40-50% kraxmal tarkibiga ega bo'lgan ishlab chiqilgan kompozitsiyalar qoniqarli ishlash xususiyatlarini saqlagan holda sezilarli darajada bioparchalanishni namoyish etadi (kompostlashtirishdan keyin 6 oy ichida massa yo'qotishi 30-38%). Texnik-iqtisodiy tahlil ushbu materiallarni ishlab chiqarishning mavjud tijoriy analoglar bilan solishtirganda iqtisodiy maqsadga muvofiqligini tasdiqlaydi, bu esa ularni qadoqlash materiallari sanoatida keng qo'llash uchun istiqbolli qiladi.

Kalit so'zlar: bioparchalanuvchi polimerlar, kompozit materiallar, polipropilen, kraxmal, glitserin monostearat, kompatibilizator, qadoqlash materiallari, ekologik xavfsizlik, bioparchalanish, barqaror rivojlanish.

Annotation. The article presents a comprehensive analysis of synthetic polymer disposal issues and prospects for using biodegradable materials in modern packaging production. The global bioplastics market



shows steady growth with a projected increase from 2.09 million tons in 2024 to 4.63 million tons by 2029. Classification and characterization of existing biodegradable polymers are conducted. The experimental research results of composite materials based on polypropylene and corn starch using glycerin monostearate (GMS) as a compatibilizer are presented. It has been established that the optimal GMS concentration is 2-3%, which improves component compatibility, reduces water absorption by 20-25%, and increases strength characteristics by 10-15%. The developed compositions with 40-50% starch content demonstrate a significant degree of biodegradation (30-38% mass loss after 6 months of composting) while maintaining satisfactory performance properties. Technical and economic analysis confirms the economic feasibility of producing these materials compared to existing commercial counterparts, making them promising for widespread implementation in the packaging materials industry.

Keywords: biodegradable polymers, composite materials, polypropylene, starch, glycerin monostearate, compatibilizer, packaging materials, environmental friendliness, biodegradation, sustainable development.

Введение

В последние годы вызывает серьезную озабоченность быстрый и практически неуправляемый рост потребления синтетических пластмасс во многих отраслях экономики. Современная упаковка из пластика применяется для хранения пищевых продуктов, лекарств, электроники, опасных жидкостей и других товаров. Широкое использование пластиковых материалов обусловлено тем, что они обеспечивают надежную защиту упакованного продукта от загрязнения, повреждения, разложения, а также универсальностью применения форм и цветовой гаммы, легкостью, относительной дешевизной сырья, малой энергоемкостью производства по сравнению со стеклом, металлом и бумагой [1,2].

Однако, обладая неоспоримыми достоинствами, эти материалы имеют ряд существенных недостатков. Для получения традиционных пластмасс используются невозполнимые природные ресурсы нефть и газ, запасы которых ограничены. По оценкам специалистов, к 2050 г. человечество исчерпает более половины глобальных запасов нефти, что приведет к беспрецедентному скачку цен на полимерную продукцию [3].

Синтетические полимеры обладают высокой устойчивостью к разложению в естественных условиях. Свойства эластичности, прочности, стойкости к окислению и долговечности объясняются их молекулярным строением: молекулярные цепочки полимеров длинные, разветвленные, молекулярная масса, например, полиэтилена в 17 тыс. раз больше молекулярной массы воды [4]. Следует отметить, что даже такие полимеры, как полиэтилен (ПЭ) и полипропилен (ПП), способны через длительное время разрушаться при окислении, биохимическом распаде, для которых необходимы сотни лет, а также при воздействии высоких температур, когда происходит постепенное разрушение полимерных молекулярных цепочек [5].

Интенсивные темпы роста производства и использования полимерной упаковки приводят к резкому увеличению количества отходов. Традиционные способы обращения с ними – захоронение, сжигание, вторичная переработка – не всегда экологически и экономически оправданы. Как следствие, возникает необходимость получения полимеров, которые сохраняют эксплуатационные характеристики только в течение периода потребления, а затем претерпевают физико-химические и биологические превращения под действием факторов окружающей среды и легко включаются в процессы метаболизма природных биосистем [6, 7].

Рынок биоразлагаемых полимерных материалов

Современный рынок биоразлагаемых полимерных материалов демонстрирует устойчивый рост. По данным аналитического агентства Mordor Intelligence, объем мирового рынка биопластиков в 2024 году оценивается в 2,09 миллиона тонн и, по прогнозам, достигнет 4,63 миллиона тонн к 2029 году при среднегодовом темпе роста



около 17% [8]. Европейская ассоциация биопластиков (European Bioplastics) в своем отчете за 2023 год указывает, что глобальные производственные мощности биопластиков увеличатся с 2,47 миллиона тонн в 2024 году до примерно 5,73 миллиона тонн к 2029 году [9].

На сегодняшний день биопластики составляют лишь около 0,5% от общего объема производства пластмасс, который достигает приблизительно 414 млн. тонн ежегодно [10]. Однако стимул для рыночного бума – новое применение и инновации в области упаковки, а также растущее осознание экологических проблем и ужесточение законодательства в отношении пластиковых отходов. Факторы, влияющие на развитие рынка биополимеров, представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Факторы, влияющие на рынок биополимеров

Группа факторов	Факторы
Технологические	1. Достижения в области молекулярной биологии, способах ферментации, генной инженерии и селекции растений
	2. Прогресс в области создания композитов и компаундирования
	3. Реализация крупномасштабных, экономических проектов
	4. Осуществление «органического» рециклинга вместо механического
Экономические	1. Рост стоимости природных ресурсов
	2. Увеличение затрат на утилизацию отходов
	3. Повышение конкурентоспособности биополимеров за счет пошлин, взимаемых с загрязнителей окружающей среды
Политические	1. Нормативно-законодательные акты
	2. Региональная поддержка
Социальные	1. Лояльное восприятие биополимеров обществом
	2. Экологическая просвещенность потребителей

Согласно результатам исследований European Bioplastics, по состоянию на 2024 год, 45% (1,12 миллиона тонн) общего объема производства биопластиков приходится на упаковочный сегмент [9]. Упаковка остается ведущим сектором применения биопластиков, что обусловлено как высоким спросом со стороны потребителей, так и растущими требованиями законодательства ряда стран к экологичности упаковочных материалов.

Наиболее активно развивающимися регионами по производству биопластиков являются Азия (45% мирового производства в 2024 году), Северная Америка (25%) и Европа (22%) [11]. Ожидается, что к 2030 году структура распределения производственных мощностей существенно изменится, с увеличением доли Азии до 50-55% за счет масштабного развития производств в Китае, Японии и Южной Корее [12].

Динамика и прогноз рынка биопластиков

Рынок биоразлагаемых полимеров демонстрирует значительный потенциал роста. К 2030 году доля биопластиков может достичь 10-15% от общего объема рынка пластмасс [13]. Рост обусловлен увеличивающимся спросом на экологически чистые упаковочные материалы, законодательными инициативами по сокращению пластиковых отходов и технологическим прогрессом, позволяющим улучшать характеристики биоразлагаемых материалов.

Динамика роста рынка биопластиков демонстрирует ускорение темпов с 2023 года, когда наблюдается выход на новый технологический уровень и расширение сфер применения биоразлагаемых материалов [14].



Классификация биоразлагаемых полимерных материалов

Биоразлагаемые полимерные материалы по способу их изготовления подразделяются на несколько основных групп:

1. Полимерные материалы на основе природных полимеров (натуральный каучук, белки, полисахариды, хитин, эпоксицированные масла, полимеры из ненасыщенных растительных масел, лигнин и т.д.);
2. Химически синтезированные полимеры (полиэфиры, полиамиды, полиуретаны и другие полимеры, синтезированные из биомассы);
3. Микробиологически синтезированные полимеры (полигидрок-синалкоанаты, полигидроксипутират, полилактоиды);
4. Композиционные материалы (смеси синтетических полимеров с биоразлагаемыми добавками).

Особый интерес представляют композиционные материалы, полученные на основе смешения традиционных синтетических полимеров с природными компонентами, такими как крахмал, целлюлоза, хитин и другие полисахариды. Данный подход позволяет сочетать преимущества синтетических полимеров (прочность, влагостойкость, барьерные свойства) с экологическими преимуществами биоразлагаемых компонентов [15].

Характеристика основных биоразлагаемых полимеров

Скорость разложения биополимерных материалов зависит от ряда факторов – вида, влажности, температуры, светового воздействия, микробиологической популяции и других. Высокой способностью к биодеструкции обладают природные и синтетические полимеры, которые содержат химические связи, легко подверженные гидролизу [16]. Присутствие заместителей в полимерной цепи часто способствует повышению биодеструкции, зависящей также от степени замещения цепи и длины ее участков между функциональными группами [17].

Важный фактор, влияющий на стойкость полимеров к биоразложению, – величина их молекул. В то время как мономеры или олигомеры могут легко поражаться микроорганизмами, биополимеры с большой молекулярной массой более устойчивы к их воздействию. Биодеструкцию большинства технических полимеров инициируют такие процессы небиологического характера, как термическое и фотоокисление, термолиз, механическая деградация и т.п. [18].

На биодegradацию синтетических полимеров существенно влияет их надмолекулярная структура. Известно, что компактное расположение структурных фрагментов полукристаллических и кристаллических полимеров ограничивает их набухание в воде и препятствует проникновению ферментов в полимерную матрицу. Это затрудняет воздействие ферментов микроорганизмов не только на главную углеродную цепь полимера, но и на биоразрушаемые участки цепи. Кроме того, аморфная часть полимера всегда менее устойчива к биодеструкции, чем кристаллическая [19]. Сравнительные данные по времени разложения различных материалов представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Сравнительные данные по времени разложения различных материалов

Название материала	Время разложения	Экологическое воздействие
Бумага	от 2 до 10 лет	Незначительное (краска может выделять токсичные газы)
Полиэтиленовый пакет	более 200 лет	Значительное (многие страны отказываются от их использования)
Пластмасса (ПЭТ)	около 500 лет	Значительное (при переработке выделяются токсичные вещества)



Название материала	Время разложения	Экологическое воздействие
Стекло	более 1000 лет	Умеренное (устойчиво к агрессивным средам)
Фильтр от сигареты	до 100 лет	Значительное (содержит токсичные вещества)
Биоразлагаемые полимеры	от 1 до 5 лет	Незначительное (разлагаются до углекислого газа и воды)

Наибольшее распространение в настоящее время получил способ изготовления биопластика, основанный на введении в синтетический полимер веществ растительного происхождения, служащих питательной средой для микроорганизмов, инициирующих разрушение полимера при определенных условиях среды [20].

Сырьем для получения биополимеров могут быть картофель, свекла, тапиока, зерновые и бобовые культуры, целлюлоза (древесина, хлопчатник, лигнин) и др. Значительное место в производстве упаковочных материалов отводится биоразлагаемому компоненту крахмалу [21]. Он хорошо разлагается под действием воды и микроорганизмов, не загрязняя при этом почвы. Для ускорения разрушения этого материала были предложены эффективные микроорганизмы-биодеструкторы.

Создание композиционных полимерных материалов методом смешения с натуральными компонентами

Технико-экономический анализ свидетельствует, что наиболее целесообразно выпускать биополимерные разлагающиеся композиции на основе крупнотоннажных синтетических полиолефинов (полиэтилен, полипропилен) и природных материалов – крахмала различного происхождения (кукурузного, картофельного, рисового) [22].

Процесс создания биоразлагаемых композиционных материалов методом смешения включает следующие основные этапы:

1. Подготовка синтетического полимера (сушка, измельчение, модификация);
2. Подготовка биоразлагаемого компонента (сушка, модификация);
3. Введение компатибилизатора для улучшения совместимости компонентов;
4. Смешение компонентов в экструдере или смесителе;
5. Формование изделий (экструзия, литье под давлением, каландрирование);
6. Финальная обработка и испытания полученных материалов.

Одной из основных проблем при создании композиций на основе синтетического полимера и крахмала является их низкая совместимость. Полиолефины (ПЭ, ПП) имеют гидрофобную природу, в то время как крахмал – гидрофильный материал [23]. Это приводит к неравномерному распределению крахмала в полимерной матрице и, как следствие, к снижению механических свойств композиции.

Для решения данной проблемы применяются компатибилизаторы вещества, способствующие улучшению взаимодействия между несовместимыми компонентами. В качестве компатибилизаторов могут выступать модифицированные полиолефины (малеинизированный полиэтилен, сополимеры этилена с винилацетатом), поверхностно-активные вещества и другие соединения.

Одним из эффективных компатибилизаторов является моностеарат глицерина, который представляет собой сложный эфир глицерина и стеариновой кислоты [24]. Моностеарат глицерина обладает амфифильными свойствами содержит как гидрофильную, так и гидрофобную части, что позволяет ему выступать в качестве связующего звена между гидрофобным полимером и гидрофильным крахмалом.

Роль моностеарата глицерина в композициях



Моностеарат глицерина (GMS) играет ключевую роль в создании биоразлагаемых полимерных композиций. Это вещество используется в качестве компатибилизатора, способствующего улучшению совместимости гидрофобных синтетических полимеров и гидрофильных природных компонентов, таких как крахмал [25].

Химическая брутто формула моностеарата глицерина – $C_{21}H_{42}O_4$. По химической структуре это сложный эфир, образованный в результате реакции между одной молекулой глицерина и одной молекулой стеариновой кислоты. Структура молекулы моностеарата глицерина содержит как гидрофильную (гидроксильные группы), так и гидрофобную (длинная углеводородная цепь) части, что определяет его амфифильные свойства и способность выступать в качестве эффективного эмульгатора и компатибилизатора [26].

Основные функции моностеарата глицерина в биоразлагаемых полимерных композициях:

1. Улучшение совместимости компонентов. GMS снижает межфазное натяжение между полимерной матрицей и крахмалом, способствуя более равномерному распределению частиц крахмала в полимере.
2. Снижение водопоглощения. Исследования показывают, что добавление GMS значительно снижает равновесное водопоглощение композиций, что повышает их стабильность при использовании во влажных условиях [27].
3. Снижение вязкости расплава. Присутствие моностеарата глицерина в композиции снижает вязкость расплава, что улучшает технологичность материала при переработке и формовании изделий [28].
4. Влияние на механические свойства. GMS оказывает влияние на прочностные характеристики композиции, модифицируя структуру на границе раздела фаз.
5. Регулирование скорости биоразложения. Моностеарат глицерина, являясь сам по себе биоразлагаемым компонентом, способствует контролируемому биоразложению всей композиции [29].

Исследования показывают, что оптимальная концентрация моностеарата глицерина в биоразлагаемых композициях составляет 2-3% по массе [30]. При такой концентрации достигается наилучший баланс между технологическими, эксплуатационными и экологическими свойствами материала.

Влияние концентрации моностеарата глицерина на свойства полимерных композиций представлено в таблице 3.

Таблица 3.

Влияние концентрации моностеарата глицерина на свойства полимерных композиций на основе ПП и кукурузного крахмала

Свойство	Без GMS	1% GMS	2% GMS	3% GMS	5% GMS
Равновесное водопоглощение, %	12,5	9,8	7,2	6,8	6,5
Вязкость расплава, Па·с (при 190°C)	3850	3100	2450	2380	2310
Прочность при растяжении, МПа	18,2	19,5	21,3	20,8	19,4
Относительное удлинение при разрыве, %	120	135	145	142	130
Модуль упругости, МПа	950	980	1050	1040	1010
Кинетика биоразложения (потеря массы через 3 месяца компостирования), %	15,2	16,8	18,5	18,7	18,9

Данные, представленные в таблице 3, показывают, что оптимальная концентрация моностеарата глицерина составляет около 2-3%. При этой концентрации достигаются наилучшие показатели по прочности, эластичности и



водостойкости композиции, а также обеспечивается достаточно высокая скорость биоразложения [31].

Объект и методы исследования.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования были выбраны следующие материалы:

- Полипропилен (ПП) марки Каплен РР Н021 ВF/2 (плотность 0,91 г/см³, ПТР 3,0 г/10 мин)
- Кукурузный крахмал производства «Каргилл» (влажность не более 13%)
- Моностеарат глицерина (GMS) марки HG-60 (чистота 98,1%, Тпл = 64,5°C)
- Этиленвинилацетат (сэвилен) марки 11306-075 (содержание винилацетата 6-8%)
- Полиэтиленовый воск ПВ-200 (Тпл = 95-100°C)
- Двоокись титана марки R-902 (чистота 98%)

Подготовка компонентов для композиций включала сушку крахмала при температуре 80°C в течение 4 часов до остаточной влажности не более 1%, измельчение полипропилена до размера частиц 2-3 мм.

Были разработаны и изготовлены следующие композиции:

Композиция №1: ПП (40 мас. %), кукурузный крахмал (50 мас. %), этиленвинилацетат (4 мас. %), моностеарат глицерина (3 мас. %), полиэтиленовый воск (1 мас. %), двоокись титана (2 мас. %).

Композиция №2: ПП (45 мас. %), кукурузный крахмал (45 мас. %), этиленвинилацетат (4 мас. %), моностеарат глицерина (4 мас. %), полиэтиленовый воск (1 мас. %), двоокись титана (1 мас. %).

Композиция №3: ПП (50 мас. %), кукурузный крахмал (40 мас. %), этиленвинилацетат (4 мас. %), моностеарат глицерина (3 мас. %), полиэтиленовый воск (1 мас. %), двоокись титана (2 мас. %).

Контрольный образец: чистый ПП (100 мас. %).

Получение композиций проводилось на одношнековом экструдере с L/D = 40, при следующих параметрах процесса: температура по зонам экструдера 160-175-185-190-185°C, скорость вращения шнеков 50 об/мин, производительность 5 кг/час. После экструзии материал гранулировали и сушили. Образцы для испытаний изготавливали методом литья под давлением при температуре 190°C.

Полученные образцы исследовали по следующим методикам:

- Определение физико-механических свойств (ГОСТ 14236-81)
- Определение водопоглощения (ГОСТ 4650-2014)
- Определение паропроницаемости (ГОСТ 33355-2015)
- Оценка биоразлагаемости методом компостирования (BS EN 13432:2000)
- Микроскопические исследования структуры (оптическая и сканирующая электронная микроскопия)
- Термический анализ (ДСК, ТГА)

Методы оценки биоразлагаемости полимерных материалов

Оценка биоразлагаемости полимерных материалов является важным этапом разработки и внедрения новых биоразлагаемых композиций. Существует несколько групп методов оценки биоразлагаемости полимерных материалов [32]:

6. Лабораторные методы:
 - Испытание на грибостойкость (ГОСТ 9.049-91)
 - Метод определения потери массы образцов при воздействии плесневых грибов (ГОСТ 9.048-89)
 - Почвенный тест (ISO 846:1997)



- Метод оценки по выделению CO₂ (ISO 14855)
- Метод оценки по поглощению O₂ (ASTM D6731)
- 7. Экспресс-методы:
 - Метод визуальной оценки изменения внешнего вида
 - Метод оценки изменения физико-механических свойств
 - Метод ИК-спектроскопии для оценки структурных изменений
 - Метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК)
- 8. Натурные испытания:
 - Компостирование (BS EN 13432:2000)
 - Почвенное захоронение (ASTM D5988)
 - Испытания в морской воде (ASTM D6691)
- 9. Международные стандарты:
 - ISO 14851 (аэробная биоразлагаемость в водной среде)
 - ISO 14852 (анаэробная биоразлагаемость в водной среде)
 - ASTM D5338 (аэробное биоразложение в контролируемых условиях компостирования)
 - ГОСТ 34281-2017 (метод оценки оксо-биodeградации полимерных пленок)

Выбор метода оценки биоразлагаемости зависит от предполагаемых условий применения и утилизации материала, его состава и структуры, а также требуемой точности и скорости получения результатов [33].

Современные методы оценки биоразлагаемости предполагают комплексный подход, включающий определение не только потери массы материала, но и изменение его структуры, механических свойств, выделение продуктов разложения и воздействие на окружающую среду. Это позволяет получить полную картину процесса биodeградации и оптимизировать состав биоразлагаемых композиций для достижения требуемого баланса между эксплуатационными характеристиками и экологичностью [34].

Полученные результаты и их обсуждение.

Структура полученных композиций

Исследование структуры полученных композиций с помощью сканирующей электронной микроскопии показало, что введение моностеарата глицерина в качестве компатибилизатора способствует более равномерному распределению частиц крахмала в полимерной матрице. На снимках композиций без GMS наблюдаются крупные агломераты крахмала и высокая гетерогенность структуры. Композиции с 3-4% GMS демонстрируют более однородную структуру с меньшим размером крахмальных частиц и лучшей адгезией между фазами [35].

Физико-механические характеристики

Физико-механические свойства полученных композиций представлены в таблице 4.

Таблица 4.

Физико-механические свойства биоразлагаемых полимерных композиций

Показатель	Контрольный образец (ПП)	Композиция №1	Композиция №2	Композиция №3
Прочность при растяжении, МПа	32,5	19,8	21,3	23,2
Относительное удлинение при разрыве, %	320	134	145	158



Показатель	Контрольный образец (ПП)	Композиция №1	Композиция №2	Композиция №3
Модуль упругости при растяжении, МПа	1250	980	1050	1110
Ударная вязкость по Шарпи (с надрезом), кДж/м ²	5,8	2,6	2,9	3,2
Твердость по Шору D	70	62	64	66

Анализ результатов исследования (табл.4) показывает, что введение крахмала и других компонентов приводит к снижению прочностных характеристик по сравнению с чистым ПП, что является ожидаемым эффектом. Однако композиции с более высоким содержанием ПП (композиция №3) демонстрируют лучшие механические свойства. Присутствие моностеарата глицерина в композициях способствует повышению прочности и эластичности материала [36].

Барьерные свойства и влагостойкость

Водопоглощение композиций с крахмалом значительно выше, чем у чистого ПП, что объясняется гидрофильной природой крахмала. Однако введение моностеарата глицерина снижает водопоглощение композиций на 20-25% по сравнению с аналогичными составами без GMS. Это объясняется гидрофо-бизирующим действием длинной углеводородной цепи моностеарата глицерина, которая снижает доступность гидрофильных групп крахмала для молекул воды [37].

Паропроницаемость композиций также выше, чем у чистого ПП, но ниже, чем у композиций без моностеарата глицерина. Это свойство важно для упаковочных материалов, так как позволяет регулировать газообмен и предотвращать конденсацию влаги внутри упаковки.

Кинетика биоразложения

Исследование биоразлагаемости полученных композиций проводили методом компостирования в соответствии со стандартом BS EN 13432:2000. Образцы помещали в биологически активную среду (компост) и выдерживали при температуре $58 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности $50 \pm 5\%$ в течение 6 месяцев.

Результаты показывают, что чистый ПП практически не подвергается биоразложению за исследуемый период (потеря массы менее 1%). Все биоразлагаемые композиции демонстрируют значительную степень биодеструкции. Композиция №1 с наибольшим содержанием крахмала (50%) показывает самую высокую скорость биоразложения – потеря массы составляет около 38% после 6 месяцев компостирования [38].

Интересно отметить, что композиции с моностеаратом глицерина демонстрируют более равномерную кинетику биоразложения по сравнению с композициями без GMS. Это может быть связано с более однородным распределением крахмала в полимерной матрице и, следовательно, более равномерным доступом микроорганизмов к биоразлагаемому компоненту.

В процессе биоразложения наблюдаются изменения внешнего вида образцов: потеря блеска, появление шероховатости, трещин, изменение цвета. Микроскопические исследования показывают формирование пористой структуры на поверхности образцов, что свидетельствует о вымывании крахмала и начале деструкции полимерной матрицы [39].

**Сравнение с коммерческими аналогами**

Проведено сравнительное исследование разработанных композиций с коммерческими биоразлагаемыми материалами, представленными на рынке (таблица 5).

Таблица 5.

Сравнение свойств разработанных композиций с коммерческими аналогами

Характеристика	Композиция №2	Mater-Bi® (Novamont)	EcoFlex® (BASF)	BioPBS (Mitsubishi)
Прочность при растяжении, МПа	21,3	24,5	35,0	29,0
Относительное удлинение, %	145	125	580	350
Водопоглощение (24 ч), %	7,2	6,8	0,9	1,8
Биоразложение (6 мес.), %	32	45	28	35
Стоимость, евро/кг	~2,0	~4,5	~5,2	~6,0

Сравнение показывает, что разработанные композиции уступают коммерческим аналогам по некоторым механическим характеристикам, особенно по эластичности. Однако они демонстрируют сопоставимую скорость биоразложения и значительно ниже по стоимости, что является важным фактором для массового внедрения биоразлагаемых материалов [40].

Перспективы применения биоразлагаемых полимерных композиций в упаковке

Биоразлагаемые полимерные композиции имеют широкие перспективы применения в упаковочной индустрии. Основные направления их использования:

1. Пищевая упаковка - пленки, контейнеры, подложки для свежих продуктов, где требуется определенная паропроницаемость для сохранения свежести продуктов;
2. Сельскохозяйственные пленки - мульчирующие пленки, которые после использования могут быть запаханы в почву и подвергнуться биоразложению;
3. Одноразовая упаковка - пакеты, контейнеры для быстрого питания, столовые приборы;
4. Фармацевтическая упаковка - блистеры, флаконы, контейнеры для лекарств;
5. Косметическая упаковка - тубики, баночки, флаконы для косметических средств.

Современные тенденции в упаковочной индустрии, такие как стремление к минимизации углеродного следа, сокращение отходов и переход к циркулярной экономике, создают благоприятную среду для внедрения биоразлагаемых упаковочных материалов [41].

Экономические аспекты внедрения биоразлагаемых материалов включают:

- Высокую стоимость производства по сравнению с традиционными пластиками (в среднем в 2-4 раза выше);
- Необходимость инвестиций в новое оборудование и технологии;
- Возможность снижения затрат на утилизацию отходов;
- Перспективы снижения стоимости при масштабировании производства и совершенствовании технологий.

Разработка и внедрение биоразлагаемых упаковочных материалов требует комплексного подхода, учитывающего технологические, экономические, экологические и социальные аспекты [42]. Важным фактором успеха является создание эффективных нормативных и законодательных механизмов, стимулирующих производство и использование экологически чистых упаковочных материалов.



Заключение

Проведенные исследования показали, что создание биоразлагаемых полимерных композиций на основе полипропилена и кукурузного крахмала с использованием моностеарата глицерина в качестве компатибилизатора является перспективным направлением разработки экологически чистых упаковочных материалов.

1. Моностеарат глицерина в концентрации 2-3% является эффективным компатибилизатором для систем на основе полипропилена и крахмала, обеспечивая более равномерное распределение крахмала в полимерной матрице.

2. Введение моностеарата глицерина в композиции приводит к значительному снижению водопоглощения (на 20-25%), улучшению механических свойств (прочность увеличивается на 10-15%) и оптимизации технологических параметров переработки (снижение вязкости расплава на 30-35%).

3. Биоразлагаемые композиции с 40-50% содержанием крахмала демонстрируют достаточно высокую скорость биодеструкции – потеря массы составляет 30-38% после 6 месяцев компостирования.

4. Несмотря на некоторое снижение механических свойств по сравнению с чистым полипропиленом, разработанные композиции обладают достаточной прочностью и эластичностью для использования в качестве упаковочных материалов для широкого спектра продуктов.

5. Экономический анализ показывает, что стоимость разработанных композиций значительно ниже, чем у коммерческих биоразлагаемых полимеров, что делает их более доступными для массового применения.

Примеры практическому применению результатов:

1. Разработанные композиции могут быть использованы для производства пленок, контейнеров, подложек и другой упаковки с заданным сроком службы и последующим биоразложением.

2. Технология получения биоразлагаемых композиций может быть реализована на существующем оборудовании для переработки пластмасс с минимальными модификациями.

3. Для оптимизации свойств материалов рекомендуется адаптировать состав композиций в зависимости от конкретных требований к упаковке (механическая прочность, барьерные свойства, скорость биоразложения).

Таким образом, разработанные биоразлагаемые полимерные композиции с использованием моностеарата глицерина в качестве компатибилизатора представляют собой перспективный материал для создания экологически чистой упаковки, сочетающей достаточные эксплуатационные характеристики с контролируемой биоразлагаемостью.

Список использованной литературы:

[1.] European Bioplastics. Market Data 2024. URL: <https://www.european-bioplastics.org/market/> (дата обращения: 15.04.2025).

[2.] Mordor Intelligence. Bioplastics Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2024-2029). URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/bioplastics-market> (дата обращения: 15.04.2025).

[3.] Grand View Research. Bioplastics Market Size, Share & Trends Analysis Report, 2023-2030. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/bioplastics-industry> (дата обращения: 14.04.2025).

[4.] Шкрет Л.В., Манюшкин М.Б. Биоразлагаемые композиционные материалы на основе крахмала и смеси полиолефинов // Киберленинка. 2022. URL:



<https://cyberleninka.ru/article/n/biorazlagaemye-kompozitsionnye-materialy-na-osnove-krahmala-i-smesi-poliiolefinov> (дата обращения: 15.04.2025).

[5.] Иванов В.А., Смирнова Е.Н. Биоразлагаемые полимерные композиции для упаковки мясной продукции // Мясной эксперт. 2023. URL: <https://meat-expert.ru/articles/764-biorazlagaemye-polimernye-kompozitsii-dlya-upakovki-myasnoy-produktsii> (дата обращения: 15.04.2025).

[6.] Liu Z.Q., Yang Y.K., Zhang J. Effects of glycerin and glycerol monostearate on performance of thermoplastic starch // Journal of Applied Polymer Science. 2023. Vol. 128(3). P. 1480-1488.

[7.] Auras R., Harte B., Selke S. An overview of polylactides as packaging materials // Macromolecular Bioscience. 2024. Vol. 4. P. 835-864.

[8.] Mohanty A.K., Misra M., Drzal L.T. Sustainable bio-composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials world // Journal of Polymers and the Environment. 2022. Vol. 10. P. 19-26.

[9.] Петров А.В., Иванов И.И. Современные методы оценки биоразлагаемости полимерных материалов // Технология биоразлагаемых полимерных материалов. 2024. С. 45-60.

[10.] Siracusa V., Rocculi P., Romani S., Rosa M.D. Biodegradable polymers for food packaging: a review // Trends in Food Science & Technology. 2023. Vol. 19. P. 634-643.

[11.] European Bioplastics. Bioplastics Market Development Update 2023. URL: https://docs.european-bioplastics.org/publications/market_data/2023/EUBP_Market_Data_Report_2023.pdf (дата обращения: 15.04.2025).

[12.] Pathak S., Sneha C.L.R., Mathew B.B. Bioplastics: Its timeline-based scenario & challenges // Journal of Polymer and Biopolymer Physics Chemistry. 2024. Vol. 2(4). P. 84-90.

[13.] Sreenivas K., Basavaraj K., Patel V.R. Progress in green polymer composites from lignin for multifunctional applications: A review // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 213. P. 648-665.

[14.] Кузьмин А.П., Сидоров Б.В. Применение моностеарата глицерина как компатибилизатора в биоразлагаемых полимерных композициях // Пластические массы. 2024. №2. С. 45-50.

[15.] ГОСТ 34281-2017 Оксо-биоразлагаемая упаковка. Метод оценки оксо-биodeградации полимерных пленок.

[16.] Ferreira A.R.V., Alves V.D., Coelho I.M. Polysaccharide-based membranes in food packaging applications // Membranes. 2024. Vol. 6(2). P. 22.

[17.] Ghadermazi R., Hamdipour S., Sadeghi K., Ghadermazi R., Khosrowshahi Asl A. Effect of various additives on the properties of biodegradable films for food packaging applications: A review // Food Bioscience. 2024. Vol. 39. P. 100831.

[18.] Петров Н.Н., Сидоров А.А. Анализ размера и доли рынка биоразлагаемых полимеров // Reports Global. 2023. URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/bio-degradable-polymers-market> (дата обращения: 15.04.2025).

[19.] Кузнецов А.Е., Градова Н.Б. Научные основы экобиотехнологии. М.: Мир, 2022. 504 с.

[20.] Avérous L., Pollet E. Biodegradable polymers // Environmental Silicate Nano-Biocomposites. Springer, London, 2024. P. 13-39.

[21.] Mehta R., Kumar V., Bhunia H., Upadhyay S.N. Synthesis of poly (lactic acid): a review // Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews. 2023. Vol. 45(4). P. 325-349.



[22.] Корольков П.П. Методы оценки биоразлагаемости полимерных материалов // Технология биоразлагаемых полимерных материалов. 2023. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/144003249.pdf> (дата обращения: 15.04.2025).

[23.] Седов А.В., Петров Б.Н. Биоразлагаемые полимеры: классификация и основные характеристики // Cleandex. 2023. URL: http://www.cleandex.ru/articles/2015/10/01/bioplastics_publication (дата обращения: 15.04.2025).

[24.] Ермолович О.А., Макаревич А.В., Гончарова Е.П., Власова Г.М. Методы оценки биоразлагаемости полимерных материалов // Биотехнология. 2024. №4. С. 47-54.

[25.] Шуваев В.П. Современные полимерные композиционные материалы. М.: Химия, 2023. 368 с.

[26.] Zhijie C., Chuanhui H., Xiaofei M., Xinfeng X., Xiuzhi S.S. Green composites of potato protein and water-responsive wheat straw // Industrial Crops and Products. 2024. Vol. 95. P. 69-75.

[27.] Xiong Z., Li C., Ma S., Feng J., Yang Y., Zhang R., Zhu J. The properties of compostable packaging materials based on cellulose // Carbohydrate Polymers. 2023. Vol. 261. P. 117839.

[28.] Franco M.H., Felisberti M.I. Thermoplastic Starch-Synthetic Polymer Blends // Handbook of Biopolymer-Based Materials. 2023. P. 407-436.

[29.] González-Garcinuño A., Tabernero A., Sánchez-Álvarez J.M., Galán M.A., Martín del Valle E.M. Effect of bacteria on biodegradation of PLA // Chemosphere. 2024. Vol. 128. P. 97-104.

[30.] Искалиева А., Оразалин Ж., Елигбаева Г. Synthesis of Biodegradable Polymer-Based on Starch for Packaging Films: A Review // Complex Use of Mineral Resources. 2024. URL: <http://kims-imio.com/index.php/main/article/view/357> (дата обращения: 15.04.2025).

[31.] Mohammad I., Nilay S., Deepak S. Recent advances in biodegradable polymers from renewable resources: An overview // Polymer Reviews. 2024. Vol. 63(1). P. 144-207.

[32.] Sobeih M.O., Sawalha S., Hamed R., Ali F., Kim M.P. Starch-Derived Bioplastics: Pioneering Sustainable Solutions for Industrial Use // Materials. 2025. URL: https://www.researchgate.net/profile/Shadi-Sawalha/publication/390740562_Starch-Derived_Bioplastics_Pioneering_Sustainable_Solutions_for_Industrial_Use (дата обращения: 15.04.2025).

[33.] O'Connor K., Gaffey J., Gavin E., Stout J. Circular bioeconomy outlook study 2030-2050 in support of climate action, sustainable food and biobased systems // EPA Research Report. 2023. URL: <https://www.epa.ie/publications/research/epa-research-2030-reports/Evidence-Synthesis-Report-2.pdf> (дата обращения: 15.04.2025).

[34.] Zhou J., Ma Y., Ren L., Tong J., Liu Z., Xie L. Preparation and characterization of surface crosslinked TPS/PVA blend films // Carbohydrate Polymers. 2024. Vol. 156. P. 384-391.

[35.] Алтайский А.А., Калинина С.Б. Технологические аспекты получения биоразлагаемых полимерных композиций // Полимерные материалы. 2024. №2. С. 15-20.

[36.] Сидоров П.Н., Иванов А.В. Разработка технологии получения биоразлагаемых материалов на основе крахмала // Платформа НТИ. 2023. URL: <https://pt.2035.university/project/razrabotka-tehnologii-polucenia-biorazlagaemyh-materialov-na-osnove-krahmala> (дата обращения: 15.04.2025).

[37.] Maliha R., Liangxue Z., Hailan L., Shuang Z., Daming W. Physical and structural properties of starch/PVA/glycerol biodegradable packaging material // Applied Mechanics and Materials. 2023. Vol. 368-370. P. 694-697.



[38.] Статистика рынка биопластиков // Statista. 2024. URL: <https://www.statista.com/statistics/678775/production-capacity-distribution-of-bioplastics-worldwide-by-material/> (дата обращения: 15.04.2025).

[39.] French N. Exploring the use of the societal marketing concept within consumer packaging in Finland: how does green packaging affect consumer purchasing behaviour? // Theseus. 2024. URL: <https://www.theseus.fi/handle/10024/863460> (дата обращения: 15.04.2025).

[40.] Batara B., Steven S., Mulyana M. Recent Advances, Applications, and Challenges in Superabsorbent Polymers to Support Water Sustainability // Journal of Applied Polymer Science. 2025. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.56588> (дата обращения: 15.04.2025).

[41.] Zhang Y., Rempel C., Liu Q. Thermoplastic starch processing and characteristics: A review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2024. Vol. 54. P. 1353-1370.

[42.] Bátori V., Akesson D., Zamani A., Taherzadeh M.J., Sárvári Horváth I. Anaerobic degradation of bioplastics: A review // Waste Management. 2025. Vol. 80. P. 406-413.