

**ВСЕРОССИЙСКИЙ КОНКУРС НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ,
ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКИХ И ТВОРЧЕСКИХ РАБОТ ОБУЧАЮЩИХСЯ
«НАУКА, ТВОРЧЕСТВО, ДУХОВНОСТЬ»**

Направление: Химия

**Тема: ИССЛЕДОВАНИЕ БИОРАЗЛАГАЕМОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Соискатель: Зверев Радомир Алексеевич,
ученик 10 класса, Частное общеобразовательное
учреждение школа «Лексис»

Научный руководитель: Минаков Григорий Игоревич,
аспирант НИИ ФХП БГУ, аспирант БГУ,
учитель химии ЧОУ «Лексис»

Место выполнения работы: ЧОУ «Лексис»

Содержание

Введение	3
1. История открытия биоразлагаемости полимеров	4
2. Основные свойства полимерных материалов	7
2.1. Классификация полимерных материалов	7
2.2. Разновидности полимерных материалов: традиционные и биоразлагаемые	8
2.3. Механизмы и факторы биоразложения полимеров.	9
2.4. Химические и физические параметры биоразлагаемых материалов	11
2.5. Экологические последствия	12
3. Практическая часть исследовательского проекта.....	13
3.1. Методика эксперимента.....	13
3.1.1. Биопластик на основе апельсиновой кожуры.....	13
3.1.2. Биопластик на основе банановой кожуры	14
3.1.3. Биопластик на основе кофейной гущи	15
3.2. Результаты эксперимента	16
Заключение	20
Список литературы	21

Введение

В условиях современного экологического кризиса и роста объемов отходов пластмассового характера проблема поиска и использования биоразлагаемых материалов приобретает особую актуальность. Традиционные синтетические полимеры, широко применяемые в быту и промышленности, отличаются стойкостью к разложению, что приводит к длительному загрязнению окружающей среды, нарушению баланса экосистем и существенным экономическим потерям. В связи с этим особое значение приобретают биополимеры – экологически безопасные материалы, способные разрушаться под воздействием микроорганизмов и природных факторов.

Объектом исследования являются биоразлагаемые полимеры, создаваемые из альтернативных, доступных и недорогих сырьевых ресурсов, таких как пищевые отходы и вторичные продукты. В рамках данного научного проекта поставлена цель – разработка новых образцов биоразлагаемых полимеров из доступных и экономически оправданных материалов, что должно способствовать снижению экологической нагрузки и расширению возможностей экологичного производства.

Гипотеза исследования предполагает, что использование дешевых и доступных вторичных сырьевых компонентов, таких как апельсиновая кожура, банановая кожура, кофейная гуща, позволяет синтезировать биоразлагаемые полимеры с характеристиками, сопоставимыми или превосходящими свойства традиционных полимерных материалов, при этом обеспечивая стимулирование устойчивых технологий и снижение негативного воздействия на окружающую среду.

В рамках проекта была подготовлена научная статья на тему "Molecular properties and chemical factors determining the biodegradability of polymer materials", которая получила положительную оценку на Всероссийском конкурсе научных работ с присвоением дипломов первой степени. Статья опубликована в международном сборнике (под номером DOI: 10.46916/26122025-1-978-5-00215-959-8).

Научно-практическая значимость исследования заключается в создании экологически безопасных, недорогих и эффективных биополимерных материалов, что позволяет рассматривать данную работу как важный вклад в развитие альтернативных решений для утилизации вторичных ресурсов и борьбы с экологическими проблемами. Реализованные подходы и полученные знания могут быть использованы в производстве упаковочных, бытовых, декоративных и строительных материалов, способствуя формированию экологически ответственного производства.

1. История открытия биоразлагаемости полимеров

История открытия и развития биоразлагаемых полимеров начинается в середине XX века, с растущих экологических проблем, связанных с накоплением неразлагаемых пластиковых отходов. В этот период ученым стало очевидно, что традиционный пластик обладает стойкостью, которая негативно сказывается на окружающей среде, вызывая необходимость поиска альтернативных материалов с биоразлагаемыми свойствами.

Биоразлагаемые полимеры – это материалы, которые после выполнения своей функции могут быть разложены микроорганизмами (бактериями, грибами) или ферментами до простых конечных продуктов: воды, углекислого газа, биомассы и неорганических солей [1].

До открытия пластика на основе нефти все используемые пластмассы имели природное происхождение. Майя и ацтеки использовали такие материалы, как натуральный латекс и резина, уже в 1500 году до нашей эры [2].

В 1855 году из целлюлозы был получен первый в истории искусственный пластик, то есть, по сути, это был биопластик. Открытие сделал Александр Паркс, назвав его паркезином. В настоящее время этот материал известен как целлулоид [3].

Первоначальные исследования сосредоточились на использовании природных полимеров, таких как крахмал, целлюлоза и белковые соединения, обладающих способностью к биологическому разложению [1].

В 1907 году бельгийско-американский химик Лео Бакеланд (рис.1.1) создал первый полностью синтетический пластик – бакелит (оксихлорид фенолглицинов) [4].

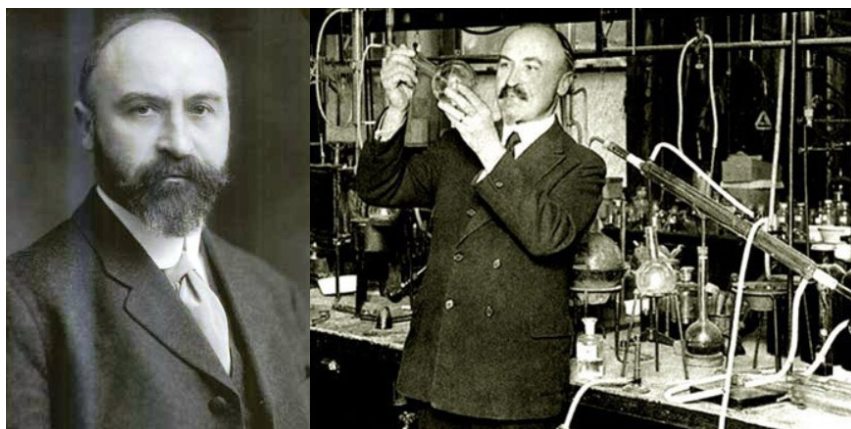


Рисунок 1.1 – Документальное фото Лео Бакеланда

Этот материал стал важной вехой в истории полимерных материалов, поскольку стал первым пластиком, который можно было производить серийно и использовать в промышленности. Бакелит представлял собой термоотверждаемый пластик, полученный путём поликонденсации фенолглицидина с ортофосфорной кислотой, обладающий высокой прочностью, термостойкостью и изоляционными свойствами.

Создание бакелита ознаменовало начало массового производства синтетических пластиков, что открыло новые возможности в различных отраслях – от электроники и автомобильной промышленности до производства бытовых изделий. Однако широкое распространение таких материалов стало возможным лишь после 1930-х годов, когда технологии их синтеза и обработки были значительно усовершенствованы.

После Второй мировой войны роль пластмасс в экономике и быту значительно усилилась. В условиях послевоенного восстановления промышленности и необходимости быстрого расширения производства было предпринято активное внедрение и развитие пластиковых материалов на основе нефти.

Одним из первых заметных достижений в области биоразлагаемых полимеров считается выделение поли-β-гидроксibuтирата (PHB), природного полиэфира, осуществленное французским микробиологом Морис Лемуань (Maurice Lemoigne) в 1926 году [5]. В ходе своих исследований он обнаружил, что бактерия *Bacillus megaterium* способна синтезировать этот полимер в процессе метаболизма. PHB представляет собой натуральный полимер, который выполняет роль внутриклеточного энергонакопителя у микроорганизмов и обладает способностью биологического разложения в окружающей среде. Данный открытый пример биоразлагаемого пластика стал важной вехой в истории развития экологически безопасных материалов.

В 1930 году Генри Форд [6] начал использовать биопластик из соевого масла для производства некоторых автомобильных деталей. Однако после Второй мировой войны он прекратил его использование, поскольку синтетические пластики стали широкодоступными и дешёвыми.

В 1970-х годах начались работы по модификации этих природных материалов для получения полимеров, способных разлагаться под воздействием микроорганизмов, связанных с бактериями и грибами. В результате были разработаны первые биоразлагаемые пластики на основе полимолочной кислоты (PLA), а также полиаксида, полученные из возобновляемых источников [7].

Дальнейшие исследования включали оптимизацию полимерных структур для повышения эффективности биоразложения и устранения негативных эффектов при использовании. В 1980-х и 1990-х годах активизировались инженерные разработки, обеспечившие коммерческое внедрение биоразлагаемых пластиков в сферы упаковки, сельского хозяйства и медицины.

Исследователи из Калифорнийского университета и компания Algenesis создали биоразлагаемый на 97% пластик на основе водорослей [8]. Новый материал TPU-FC1 способен полностью разлагаться с помощью микроорганизмов. Это подтверждено экспериментами: через 200 дней количество биоразлагаемых полимерных частиц сократилось на 97%. Также новый биополимер тестировали на устойчивость к воде. Обычные полимеры в воде не растворяются, а только распадаются на более мелкие частицы – микропластик и нанопластик. Новый пластик из водорослей вел себя совсем иначе: через 90 дней извлекли только 32% микрочастиц TPU-FC1, а через 200 дней - 3%, то есть 97% подверглись биологическому разложению. На рисунке 1.2 показана сравнительная характеристика устойчивых EVA и временных TPU-FC1 микропластиковых частиц [8]. Под буквой (а) – изображения фильтров для извлечения микропластика. Микропластиковые частицы окрашены Nile Red и освещены синим светом для получения изображений. Частицы выглядят яркими на фоне более тёмного фильтра. (b) – количество микропластиковых частиц различных материалов на различных временных интервалах в компосте и в фоновом образце компоста на День 0, 90 и 200. Значения представлены как средние показатели не менее трёх независимых процедур извлечения микропластика. В статистическом анализе применялся двухфакторный анализ дисперсии [8].

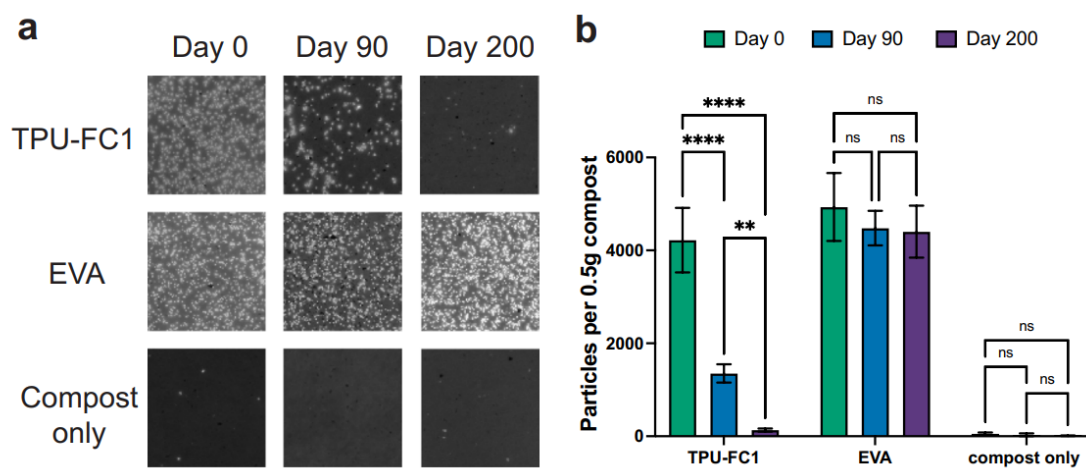


Рисунок 1.2 – Сравнение устойчивых EVA и временных TPU-FC1 микропластиковых частиц [8].

Современные биоразлагаемые полимеры представляют собой перспективное направление в области материаловедения, которое отвечает вызовам экологической устойчивости и сокращения пластиковых отходов.

2. Основные свойства полимерных материалов

Полимерные материалы занимают важное место в современной промышленности и повседневной жизни благодаря своим уникальным свойствам и широкому спектру применения. Они представляют собой полимеры – высокомолекулярные соединения, состоящие из повторяющихся структурных единиц, что обуславливает их особенности и отличия от других классов материалов.

2.1. Классификация полимерных материалов

По своему происхождению и структуре полимерные материалы подразделяют на несколько основных групп, что позволяет учитывать их особенности, свойства и области применения.

По происхождению полимерные материалы делятся на две основные категории: натуральные и синтетические. Натуральные полимеры образуются в природных условиях и включают такие материалы, как целлюлоза, каучук, шелк, шерсть, белковые соединения. Их используют в текстильной промышленности, производстве бумаги, резиновых изделий и медицине. Синтетические полимеры создаются искусственно посредством химической синтеза и занимают ведущую роль в промышленности благодаря высоким эксплуатационным характеристикам. В эту группу входят такие известные материалы, как полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид (ПВХ), полистирол, полиамиды, полиуретаны и другие [9].

Кроме происхождения, полимерные материалы классифицируют по структурной организации цепочек. В зависимости от уровня кристалличности различают кристаллические, аморфные и криоскристаллические полимеры. Кристаллические полимеры характеризуются высокой степенью упорядоченности цепочек, что обеспечивает превосходные механические свойства и термостойкость. Аморфные полимеры, напротив, обладают случайной структурой, что делает их более гибкими и прозрачными, однако менее термостойкими. Криоскристаллические материалы сочетают свойства обеих групп – они состоят из кристаллических и аморфных областей, что придает им уникальные эксплуатационные характеристики.

Еще одним важным аспектом классификации является разделение по морфологической структуре на однородные полимеры и композиционные, включающие наполненные и армированные материалы. В зависимости от типа связей в цепи полимеры делят на полимеры с простыми ковалентными связями (например, полиэтилен, полипропилен) и полимеры, содержащие специальные связи или вставки, такие как сложные эфиры, амиды, полиуретаны [10].

Также значимый аспект классификации – разделение по тепловым свойствам: термопласты, терморективные и эластомеры. Термопласты, при нагревании легко пластичны и поддаются переработке, к ним относятся полиэтилен, полистирол, ПВХ. Терморективы вступают в необратимую вулканизацию при нагревании и создают жесткую, термостойкую структуру, пример – терморективный пластмассы на основе фенолформальдегидных смол [10]. Эластомеры – материалы с высокой степенью растяжимости и возврата в исходную форму, такие как натуральный и синтетический каучук.

Дополнительно большую важность приобретает классификация по биодegradации и экологическим аспектам. Современное развитие технологий вызывает необходимость оценки экологических характеристик полимерных материалов. В рамках этой классификации выделяют биодegradуемые и наименее экологически воздействующие материалы. Биодegradуемые (биоразлагаемые) полимеры – это такие материалы, которые под воздействием микроорганизмов,

ультрафиолетового излучения или влаги могут полностью разлагаться на природные компоненты (углекислый газ, вода, минералы) за относительно краткое время. Эти материалы используют в медицинской сфере (например, шовные нити, имплантанты), упаковке, сельском хозяйстве и других областях, где важна экологическая безопасность [9]. В противоположность им, классические полимеры (традиционные), такие как полиэтилен и поливинилхлорид, разлагаются очень медленно и могут накапливаться в окружающей среде, создавая экологические проблемы.

Таким образом, классификация полимерных материалов осуществляется по различным признакам, что позволяет систематизировать их свойства и области применения. Каждая из групп обладает определенными характеристиками, которые делают их незаменимыми в разных сферах науки и техники, от производства упаковочных материалов и строительных конструкций до электроники, медицины и авиационной промышленности.

2.2. Разновидности полимерных материалов: традиционные и биоразлагаемые

Можно выделить два основных типа полимерных материалов, которые отличаются по происхождению, структурным особенностям и экологической совместимости: это традиционные (неразлагаемые) и биоразлагаемые полимеры.

Традиционные полимеры [11] представляют собой материалы на основе синтетических высокомолекулярных соединений, процессы получения которых были разработаны в XX веке и с тех пор широко используются во многих сферах. К ним относятся полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид (ПВХ), полистирол, а также полиамиды и полиуретаны. Эти материалы обладают высокими эксплуатационными характеристиками – механической прочностью, устойчивостью к химическим воздействиям, термостойкостью. Традиционные полимеры имеют явный недостаток – низкую скорость разложения в окружающей среде. Большинство традиционных полимеров разлагаются сотни или тысячи лет, что вызывает серьезные экологические проблемы, связанные с накоплением отходов.

В связи с этим интерес вызывают биоразлагаемые полимеры [11], которые способны входить в естественный биологический цикл разложения под воздействием микроорганизмов, ультрафиолетового излучения или влаги. Они создаются преимущественно на основе природных полимеров (рис. 2.1), таких как целлюлоза, крахмал, хитин, а также синтетических, специально модифицированных для быстрой разлагаемости в природе. Среди биоразлагаемых полимеров выделяют такие материалы, как полимолочная кислота (PLA), полигликолидам (PGA), поликапролактон, а также поликапролактон-лактитовые сополимеры. Они нашли широкое применение в упаковке, медицинской области – например, для изготовления шовных нитей, имплантатов и временных фиксаторов – а также в сельском хозяйстве. Их значительное преимущество заключается в экологической безопасности: после использования биоразлагаемые материалы распадаются на недопустимо малые компоненты, не загрязняя окружающую среду.

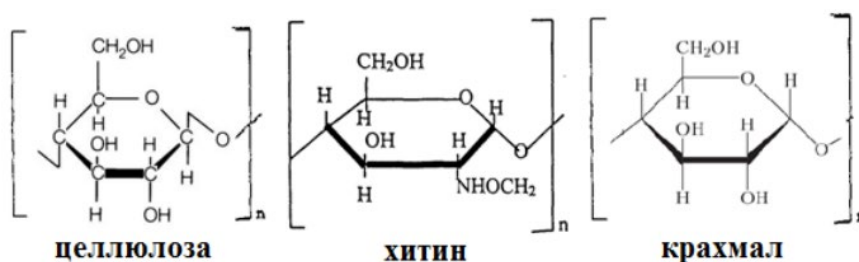


Рисунок 2.1 – Природные биоразлагаемые полимеры

Однако, биоразлагаемые полимеры обладают и определёнными недостатками – меньшей механической прочностью, выше стоимостью и более требовательными условиями разложения (например, необходимость влажности, определённой температуры). Тем не менее, развитие технологий производства и модификации таких материалов способствует их повсеместному внедрению и сокращению экологического следа.

В целом, сравнительный анализ показывает, что традиционные полимеры вследствие своей долговечности и высокой технологичности остаются находящими применение материалами, несмотря на негативное воздействие на окружающую среду. В то время как биоразлагаемые полимеры представляют собой прогрессивное решение проблем экологии, хотя на сегодняшний день требуют дальнейшего совершенствования в плане стоимости, производственных методов и эксплуатационных характеристик. В будущем наиболее перспективным будет развитие гибридных систем [11], комбинирующих преимущества обоих типов, а также поиск новых, экологически безопасных материалов с оптимальными свойствами для конкретных областей применения.

2.3. Механизмы и факторы биоразложения полимеров

Биоразложение полимерных материалов – это сложный биохимический процесс, при котором органические вещества распадаются под действием микроорганизмов, их ферментов и других биологических факторов. В современном экологическом контексте биоразложение рассматривается как важный механизм уменьшения негативного воздействия отходов на окружающую среду, особенно для развития биоразлагаемых полимеров. В зависимости от условий среды и активности организмов различают две основные формы биоразложения: аэробное и анаэробное.

Аэробное [12] биоразложение происходит в присутствии кислорода и является наиболее интенсивным и эффективным механизмом разложения органических веществ. Оно включает несколько этапов: сначала микроорганизмы, такие как бактерии и грибы, используют кислород для окисления органических молекул, превращая их в углекислый газ, воду, минимальное количество биомассы и минералы. Этот процесс сопровождается выделением тепла и энергии, что способствует быстрому распаду полимерных цепочек. Например, при разложении биоразлагаемых полимеров, таких как полигликолиды или полимолочная кислота, происходит цепная полимеризация, разрывающая макромолекулы и приводящая к их исчезновению. Важным фактором, регулирующим скорость аэробного биоразложения, является наличие кислорода, температура (оптимально – около 50-60°C для промышленных методов компостирования), влажность, pH и содержание микроорганизмов.

Анаэробное [12] биоразложение происходит в условиях отсутствия кислорода и характеризуется более медленным процессом разложения. В таких условиях микроорганизмы используют вместо кислорода другие вещества – например, нитраты, сульфаты или карбонаты – для окисления органических веществ. В результате эффекта анаэробного разложения образуются метан, диоксид углерода, водород, малые органические кислоты и биогаз, состоящий из метана и углекислого газа. Этот процесс протекает значительно медленнее, однако он также широко применяется, например, в технологиях утилизации отходов через анаэробные биореакторы или биогазовые установки. Одним из факторов, влияющих на скорость анаэробного разложения, является состав исходных материалов, температура (оптимально – 35-55°C), влажность, наличие подходящих микроорганизмов, а также уровень насыщенности кислородом или его отсутствием.

В зависимости от условий окружающей среды и характера воздействия выделяют пять основных способов деградации синтетических полимеров (рис.2.2): бактериальная деструкция, химическая деструкция, фотодеградация в результате воздействия солнечного света, термическая деградация и механическая деградация.

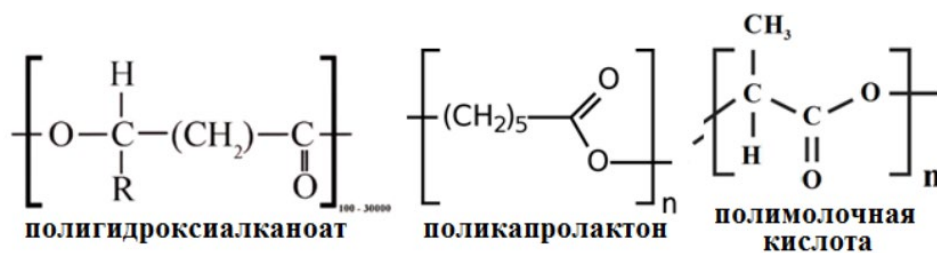


Рисунок 2.2 – Синтетические биоразлагаемые полимеры

Бактериальная деструкция – это биологический способ распада полимеров под действием микроорганизмов, таких как бактерии и грибы [12]. Этот процесс обусловлен способностью микроорганизмов продуцировать ферменты, способные расщеплять сложные высокомолекулярные соединения полимеров на более простые молекулы, которые могут быть использованы как источник энергии. Бактериальная деструкция существенно зависит от таких факторов, как структура и химический состав полимера, наличие функциональных групп, гидрофильность, а также окружающая среда – влажность, температура и наличие микроорганизмов. Наиболее широко изучены биоразлагаемые полимеры, такие как полиэтиленолатат или полимолочная кислота, которые легко подвергаются микробиологическому разложению. В случае с традиционными синтетическими полимерами, такими как полиэтилен и полипропилен, бактериальное разложение происходит очень медленно и редко приводит к полной деградации без предварительной обработки или модификации.

Химическая деструкция предполагает разрыв полимерных цепочек под действием химических веществ или реакций [12]. Эта форма деградации включает окисление, гидролиз, а также взаимодействие с другими активными агентами – например, кислотами, щелочами, ионными радиациями или реагентами. В результате происходит разрывание длинных цепей, снижение молекулярной массы, разрушение структурных элементов и утрата механических свойств. Химическая деструкция особенно важна для управления отходами в промышленных условиях, где используются специальные реагенты для ускорения разложения полимеров, например, в технологии переработки. Этот процесс в значительной мере зависит от химического состава полимера, наличия функциональных групп, условий реакции и концентрации реагентов.

Фотодеградация – это разложение полимеров под воздействием ультрафиолетового или видимого спектра солнечного света [12]. В процессе фотодеградации происходит фотохимический разрыв цепей, образование свободных радикалов и последующее образование низкомолекулярных продуктов. Эффективность этого механизма существенно зависит от спектра и интенсивности ультрафиолетового излучения, свойств полимера, его устойчивости к ультрафиолету, наличия стабилизаторов и добавок, а также условий эксплуатации. Полимеры, содержащие урановые или боратные добавки, демонстрируют повышенную устойчивость к фотодеградации, тогда как чистые пластиковые материалы зачастую разлагаются под действием солнечного света за относительно короткое время. Фотодеградация является важным механизмом естественного разрушения пластиковых отходов в окружающей среде.

Термическая деградация включает разрыв цепочек под воздействием высоких температур [12]. При нагревании до определенных значений происходит декомпозиция молекул, разрушение связей и потеря первоначальных свойств материала. Этот процесс может проходить как в условиях плавки или термообработки, так и на стадии высокотемпературной утилизации. В основном, термическая деградация зависит от температуры, времени воздействия и химического состава полимера. Например, полиэтилен начинает разлагаться при температурах свыше 300°C с образованием низкомолекулярных веществ и газов. Термическая деградация широко используется в технологиях утилизации и переработки отходов, а также при исследовании стабильности материалов.

Наконец, механическая деградация связана с физическими воздействиями, вызывающими разрушение структурных элементов без химического разложения [12]. В этом механизме разрывы происходят под действием сил, трения, растяжения или сжатия, приводя к уменьшению размерности частиц, появлению микротрещин, сколов и ухудшению физических характеристик. Этот аспект деградации особенно важен при использовании пластиков в условиях механического износа, трения или эксплуатации на открытом воздухе. Механическая деградация способствует постепенному разрушению материала в процессе его использования или хранения, что в целом ускоряет его конечное разрушение.

Таким образом, каждая из приведенных форм деградации синтетических полимеров зависит от внешних факторов, таких как температура, наличие кислорода, ультрафиолетовое или другое излучение, химические реагенты и механические воздействия. Эти механизмы могут действовать как отдельно, так и в совокупности, определяя сроки разложения и экологическую судьбу пластиковых отходов. Понимание факторов и механизмов деградации позволяет разрабатывать новые материалы с желаемой стойкостью, а также способы утилизации и переработки существующих полимеров для минимизации их негативного воздействия на окружающую среду.

2.4. Химические и физические параметры биоразлагаемых материалов

Химические параметры биоразлагаемых материалов главным образом связаны с их составом, структурой и наличием функциональных групп, которые могут участвовать в биохимических или химических реакциях разложения. Одним из ключевых аспектов является содержание легко распадаемых связей, таких как эфирная, карбоксильная или амидная группы. Например, биоразлагаемые полимеры, такие как полимолочная кислота или полиэтиленгликоль, содержат гидроксильные и карбоксильные группы, обеспечивающие их склонность к гидролизу – процессу, при котором вода расщепляет полимерные цепи на более простые вещества. Химический состав материала также включает наличие мономеров и добавок, которые могут усиливать или замедлять процесс разложения. Важным параметром является молекулярная масса и распределение молекул по размерам, поскольку более короткие цепи склонны к быстрому разложению, тогда как высокомолекулярные соединения более стабильны [13].

Физические параметры биоразлагаемых материалов включают их структуру, плотность, пористость, гидрофильность и механические свойства. Структура материала, например, наличие пор или микротрещин, существенно влияет на скорость проникновения воды, кислорода и микроорганизмов, что усиливает или замедляет процессы разложения. Гидрофильность – способность связывать воду – напрямую связана с разложением гидролитически чувствительных полимеров, поскольку вода играет ключевую роль в иницировании гидролитических реакций [13]. Также важной характеристикой являются механические свойства: прочность, эластичность и

ударная вязкость, которые определяют пригодность материала к использованию в той или иной области и его устойчивость к механическим воздействиям до момента полного разложения.

Кроме того, физические свойства, такие как температура плавления, тепловая стабильность и коэффициент расширения, влияют на поведение биоразлагаемых материалов при эксплуатации и утилизации. Например, материалы с низкими температурами плавления могут быстрее разрушаться при воздействии тепла, что способствует их разложению, в то время как высокотемпературные свойства обеспечивают стабильность на этапе использования, но требуют специальных условий для утилизации.

Общая характеристика биоразлагаемых материалов заключается в их склонности к разложению под воздействием внешних факторов – влаги, ультрафиолетового излучения, микробиологической активности и температуры. В совокупности, химические и физические параметры определяют не только их поведение в окружающей среде, но и возможности использования, утилизации и переработки [13].

В заключение, можно сказать, что химические и физические свойства биоразлагаемых материалов являются фундаментальными параметрами, которые обеспечивают их эффективность, безопасность и экологическую зрелость. Исследование и оптимизация этих характеристик в рамках разработки новых биоразлагаемых полимеров способствуют решению задач экологической устойчивости и эффективной переработки отходов.

2.5. Экологические последствия

Экологические последствия использования биоразлагаемых полимеров связаны с их способностью ускорять процессы разложения органического материала и уменьшать накопление пластиковых отходов в окружающей среде, что способствует снижению загрязнения почвы, воды и воздуха, а также уменьшает нагрузку на системы утилизации и переработки. В отличие от традиционных пластмасс, биоразлагаемые полимеры при правильных условиях разлагаются под действием микроорганизмов, превращаясь в воду, углекислый газ и биомассу, что минимизирует их долговременное влияние на экологию и способствует восстановлению природных экосистем. Однако реализация их экологического потенциала зависит от условий разложения, таких как наличие влаги, температуры и микроорганизмов, что требует специально организованных промышленных или бытовых компостных систем для полного разложения данных материалов [14]. В то же время, некорректное использование или неправильная утилизация биоразлагаемых полимеров, например, выбрасывание их в природные среды без надлежащих условий, может привести к образованию микропластика, накоплению и потенциальной токсичности, что негативно сказывается на морской и наземной фауне.

3. Практическая часть исследовательского проекта

3.1. Методика эксперимента

Целью данного исследования является разработка метода получения биополимеров из пищевых отходов, таких как апельсиновая кожура, банановая кожура, кофейная гуща, которые содержат значительное количество крахмала и целлюлозы. В рамках эксперимента сырье предварительно подвергалось сушке при температуре 60°C до постоянной массы для удаления влагосодержащих веществ, а затем измельчалось до состояния однородной питты с помощью ступки и пестика, растирание пестиком проводилось круговыми и давящими движениями. Полученные образцы после подготовительной обработки использовались для извлечения крахмала и целлюлозы посредством гидролитического разложения. Для этого сырье помещалось в раствор соляной кислоты или натриевой щёлочи, доводился рН до 2 (кислая среда) и 10 (щелочная среда), после чего проводилась термообработка при температуре около 80°C в течение 1-2 часов с постоянным перемешиванием. После гидролиза раствор охлаждали и нейтрализовали, затем осуществлялась фильтрация для отделения твердых веществ. Осадки промывались водой для удаления излишков реактивов, после чего высушивались при температуре 50-60°C до достижения постоянной массы, что позволяло получить порошкообразную основу для дальнейшего синтеза. Для получения предполагаемого биополимера обработанный порошок подвергался термодинамической полимеризации при определённых условиях (нагреве с добавлением катализаторов), что способствовало образованию высокомолекулярных соединений. Итоговый продукт характеризовали с помощью аналитических методов, таких как определение содержания крахмала и целлюлозы, а также проведением тестов на прочность, растворимость и биосовместимость, что позволило оценить эффективность метода и качество синтезируемого биополимера.

3.1.1. Биопластик на основе апельсиновой кожуры

Для получения биопластика из апельсиновой кожуры использовались исходные материалы и реактивы, а именно: свежая апельсиновая кожура, пестик и ступка, 0,1 М раствор соляной кислоты (HCl) объемом 10 мл, глицерин в объеме 5–5,5 мл, дистиллированная вода и чашки Петри. Вначале апельсиновая кожура измельчалась в пестике и ступке до получения однородной порошкообразной пасты. Затем полученный измельченный материал сушился и выдерживался при температуре 120°C в течение 15 минут для удаления влаги и проведения термической обработки. После этого 100 г высушенной апельсиновой кожуры добавлялись в 10 мл раствора 0,1 М HCl, после чего смесь тщательно перемешивалась стеклянной палочкой для равномерного гидролиза и активации полимерных соединений. Далее в полученную смесь добавляли 5–5,5 мл глицерина для повышения эластичности готового материала и продолжали перемешивать для однородности. После этого компонент смешивался с дистиллированной водой до получения однородной суспензии.



Рисунок 3.1 – Синтез биопластика на основе апельсиновой кожуры

Далее смесь снова измельчалась в пестике и ступке для достижения однородной текстуры. Полученную массу заливали в подготовленные чашки Петри и оставляли при комнатной температуре на 24 – 72 часов для затвердения и окончательного формирования биопластика (рис. 3.1). После этого образцы извлекались из форм, высушивались и использовались для дальнейших характеристик и оценки свойств полученного биопластика.

3.1.2. Биопластик на основе банановой кожуры

Для синтеза биопластика из банановой кожуры использовались следующие исходные материалы и реактивы: свежая банановая кожура, дистиллированная вода, раствор $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ (метабисульфита натрия), 0,5 М раствор гидрохлористоводородной кислоты (HCl), 0,5 М гидроксида натрия (NaOH), а также глицерин. Вначале банановая кожура нарезалась на мелкие кусочки для повышения эффективности дальнейшей обработки. Затем полученные кусочки помещались в емкость объемом 500 мл, куда добавлялся раствор $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ для предотвращения потемнения и окисления соединений, после чего оставляли на 1 минуту для воздействия. После этого кожура процеживалась, а оставшаяся масса заливается 375 мл дистиллированной воды, далее смесь подвергалась кипячению в течение 30 минут для разрушения клеточных структур и активации

полимерных компонентов. После охлаждения обратно процеживали кожуру и сушили её в духовке при температуре 120°C в течение 30 минут для полного удаления влаги. Высушенная кожура измельчалась в порошкообразную фракцию для облегчения дальнейших реакций. В полученную массу из 25 г кожуры добавляли 3 мл раствора HCl для проведения кислотного гидролиза, полученную смесь тщательно перемешивали стеклянной палочкой.



Рисунок 3.2 – Образцы биополимеров на основе апельсиновой и банановой кожуры

После этого добавляли 2 мл глицерина для повышения пластичности и повторно перемешивали. Далее в смесь вводился 3 мл раствора NaOH для нейтрализации гидролитического раствора и стабилизации получаемых соединений, после чего вновь осуществлялось перемешивание. Полученную массу выливали в подготовленные формочки и подвергали термообработке при температуре 130°C в течение не менее одного часа для завершения процесса полимеризации и формообразования. После охлаждения и извлечения из форм, биопластик высушивали и использовали для дальнейших характеристик и испытаний.

3.1.3. Биопластик на основе кофейной гущи

Для получения биопластика использовались кофейная гуща, агар-агар, кукурузный крахмал, вода, уксус и глицерин. На первом этапе 40 г кофейной гущи смешивали с 15 г агар-агара и 30 г крахмала. Затем в смесь добавляли 100 мл воды, 10 мл уксуса и 10 мл глицерина. Все компоненты тщательно перемешивали до получения однородной массы. Полученную смесь нагревали при постоянном перемешивании до загустевания, что указывало на формирование полимерной структуры. После этого горячую массу распределяли по формочкам и подвергали термической обработке в течение 30 минут при температуре 150 °C. В результате проведённого эксперимента были получены твёрдые образцы биопластика, сохраняющие форму после охлаждения. Добавление глицерина позволило снизить хрупкость материала, а кофейная гуща выполняла роль наполнителя, придавая материалу характерную текстуру и цвет. Использование агар-агара и кукурузного крахмала обеспечило формирование связующей матрицы, удерживающей частицы кофейной гущи в структуре материала. Поскольку все используемые компоненты имеют природное происхождение, полученный биопластик может рассматриваться как потенциально биоразлагаемый материал.



Рисунок 3.3 – Образцы биополимеров на основе кофейной гущи

3.2. Результаты эксперимента

В результате проведённого эксперимента было успешно разработано и реализовано несколько методов получения биополимеров из пищевых отходов, таких как апельсиновая, банановая кожура и кофейная гуща. В результате полученные биополимеры характеризовались определением содержания крахмала и целлюлозы, а также тестами на прочность, растворимость и биосовместимость, что позволило оценить эффективность предложенного метода и качество синтезируемых материалов (таблица 3.1).

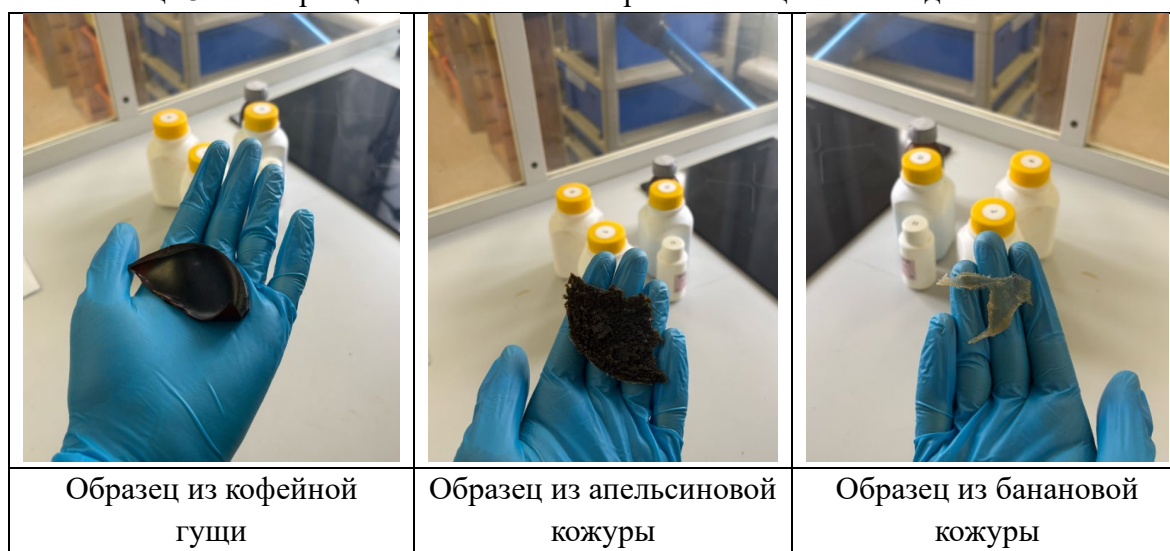
Таблица 3.1 – Результаты экспериментов по синтезу биопластиков

Параметр	Апельсиновая кожура	Банановая кожура	Кофейная гуща
Предварительная обработка	Сушка при 60°C, измельчение, кислотный гидролиз	Обработка Na ₂ S ₂ O ₅ , сушка, кислотный и щелочной гидролиз	Смешивание с агар-агаром и крахмалом, добавление уксуса
Температура термообработки	120°C, 15 мин	130°C, 1 час	150°C, термообработка до загустения
Используемые добавки	Глицерин (5–5,5 мл), дистиллированная вода	Глицерин, вода	Глицерин, уксус
Структура полученного биопластика	Твёрдый, пластичный, однородный	Пластичный, эластичный, прочный	Плотный, прочный, с характерным цветом
Механические свойства	Умеренная прочность и эластичность	Высокая прочность и устойчивость к деформациям	Хорошая прочность,

Параметр	Апельсиновая кожура	Банановая кожура	Кофейная гуща
			сниженная хрупкость
Биосовместимость и биоразлагаемость	Высокая биосовместимость, растворимость в воде	Биодеградация, экологичность	Биодеградация, натуральный состав
Возможные области применения	Упаковка, экодекор	Упаковка, биоразлагаемые изделия	Декоративные элементы, упаковка

Для оценки химической устойчивости полученных биополимеров каждый образец (таблица 3.2) помещали в растворы кислотной (HNO_3) и щелочной (NaOH) среды различной концентрации: 1М, 2М и 3М.

Таблица 3.2 – Образцы биопластиков из разных пищевых отходов



Контакт образцов с растворами длился 48 часов. Результаты испытаний по растворимости представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Растворимость образцов биополимеров в разных концентрациях HNO_3 и NaOH после 48 часов (Н – Нерастворим, М – Малорастворим)

Биополимер	HNO_3 1М	HNO_3 2М	HNO_3 3М	NaOH 1М	NaOH 2М	NaOH 3М
Банановая кожура	Н	Н	Н	Н	Н	Н
Апельсиновая кожура	Н	Н	Н	Н	Н	Н

Биополимер	HNO ₃ 1M	HNO ₃ 2M	HNO ₃ 3M	NaOH 1M	NaOH 2M	NaOH 3M
Кофейная гуща	М	М	М	М	М	М

Из таблицы видно, что образцы биополимеров на основе банановой и апельсиновой кожуры проявляют высокую устойчивость к агрессивным химическим средам – они не растворяются в кислотах (рисунок 3.4) и щелочах (рисунок 3.5) даже при высокой концентрации (рисунок 3.4). Образец из кофейной гущи показал частичное растворение, оставаясь в основном малорастворимым во всех средах.

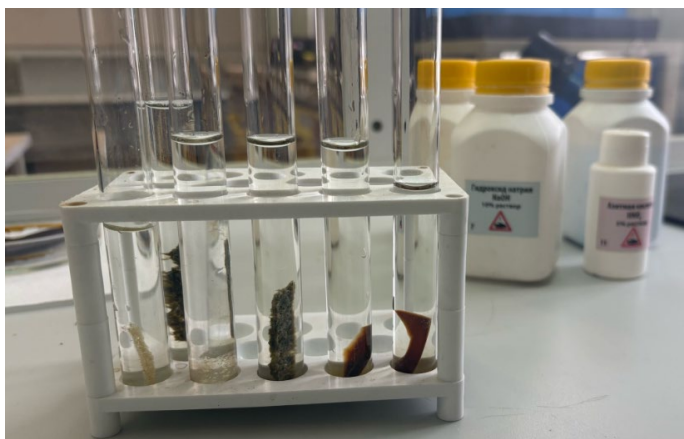


Рисунок 3.4 – Образцы биопластиков из разных пищевых отходов в растворах HNO₃

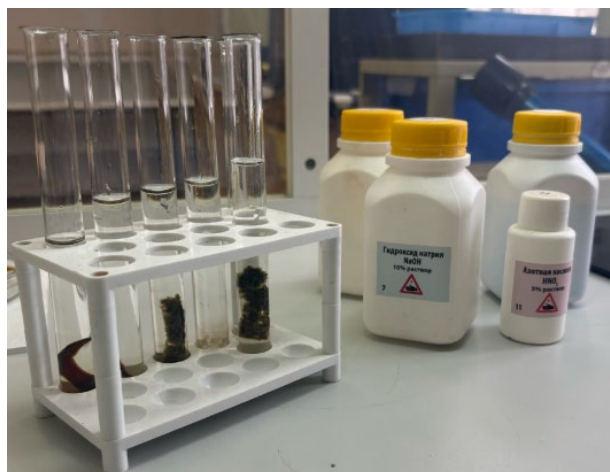


Рисунок 3.5 – Образцы биопластиков из разных пищевых отходов в растворах NaOH.

Для оценки биодegradации образцов был проведён тест методом закапывания в почву. Образцы массой 3 грамма помещали на глубину 5 сантиметров, с последующим ежемесячным очищением и взвешиванием (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Тест на биodeградацию биопластиков из разных пищевых отходов

Эксперимент длился 3 месяца. Средние изменения массы образцов представлены на графике биоразложения (рисунок 3.7). Данные последующих трёх месяцев построены на основе арифметической прогрессии деградации, что визуализировано на том же графике. Результаты показали, что все образцы подвергаются биodeградации в почве, однако скорость и степень разрушения различны. Образцы из банановой и апельсиновой кожуры демонстрируют наибольшую биodeградеability, теряя существенную долю массы уже после первого месяца. Кофейная гуща показывает умеренную способность к биоразложению. Таким образом, химическая устойчивость и степень биоразложения подтверждают перспективность использования данных биополимеров как экологически безопасных материалов с различными свойствами, что позволяет подобрать оптимальные варианты для конкретных приложений.

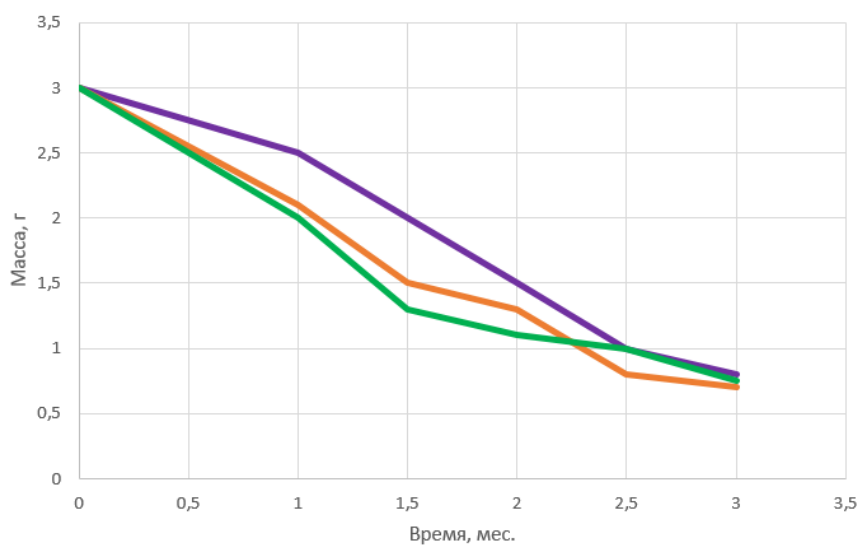


Рисунок 3.7 – Средние изменения массы образцов при биоразложении

(зеленый – банан; оранжевый – апельсин; фиолетовый – кофе)

Заключение

В условиях современного экологического кризиса и значительного роста объемов пластмассовых отходов проблема поиска и внедрения биоразлагаемых материалов приобретает особую актуальность. Традиционные синтетические полимеры характеризуются высокой стойкостью к разложению, что приводит к длительному загрязнению окружающей среды, нарушению экосистем и значительным экономическим потерям. В этом контексте биополимеры – экологически безопасные материалы, способные разрушаться под воздействием микроорганизмов и природных факторов, – представляют собой перспективное направление в развитии устойчивых технологий.

Объектом исследования данного проекта выступили биоразлагаемые полимеры, синтезируемые из альтернативных, доступных и недорогих ресурсов, в частности из пищевых отходов и вторичных продуктов (апельсиновая кожура, банановая кожура, кофейная гуща). Целью проекта было разработать новые образцы биополимеров с учетом экономичности сырья и технологий, что способствовало бы снижению экологической нагрузки и расширению возможностей экологичного производства.

В ходе работы был выполнен научный анализ отечественной и зарубежной литературы, а также проведен эксперимент по извлечению крахмала и целлюлозы из выбранного сырья с последующей термодинамической полимеризацией. Полученные биополимерные материалы характеризовались комплексом физико-химических свойств, таких как прочность, растворимость и биосовместимость, подтверждающих эффективность предложенного метода. Биопластики показали способность к биоразложению и механические характеристики, сопоставимые с традиционными полимерными материалами.

Гипотеза исследования подтвердилась: использование недорогих и доступных вторичных компонентов позволяет создавать биополимеры с высоким потенциалом для экологически безопасного применения. Научно-практическая значимость работы подтверждена публикацией научной статьи «Molecular properties and chemical factors determining the biodegradability of polymer materials», получившей диплом первой степени на Всероссийском конкурсе научных работ и опубликованной в международном сборнике (DOI: 10.46916/26122025-1-978-5-00215-959-8).

На основе теоретических и экспериментальных данных исследования было установлено, что биополимеры можно получить путём смешивания банановой и апельсиновой кожуры, кофейной гущи с глицерином и рядом других добавок. Образцы, изготовленные из банановой кожуры, по плотности и эластичности схожи с полиэтиленом. Благодаря этим свойствам их можно использовать для изготовления упаковочных материалов. Биополимеры, полученные из кофейной гущи и апельсиновой кожуры, оказались более плотными и эластичными. Период биодegradации образцов составлял 3 месяца. Лучшие результаты показал биополимер, синтезированный из банановой кожуры.

Реализованные подходы и достигнутые результаты представляют собой важный вклад в развитие технологий создания биоразлагаемых материалов из вторичных ресурсов и могут быть применены в промышленном производстве упаковочных, бытовых, декоративных и строительных изделий. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию технологических параметров и расширение области применения биополимеров для повышения устойчивости экологически ориентированных производств и рационального использования природных ресурсов.

Список литературы

1. В. А. Васнев (1997). Биоразлагаемые полимеры. Высокомолекулярные соединения. Серия Б, 39 (12), 2073-2086.
2. Kuluev, Vulat. (2015). Natural rubber, its sources and components / *Натуральный каучук, его источники и составные части*. 7. 224-283.
3. Н.Ф. Копейкин, А.И. Станкевич, З.А. Зареченская, Е.П. Попова (1997). О применении целлулоида для производства игрушек. *Гигиена и санитария*, (1), 31-32.
4. Бакелит. История, свойства и применение. Изобретение бакелита [Электронный ресурс] // URL: <https://c-a-m.narod.ru/wpc/bakelite-history.html> (дата обращения: 26.11.2025).
5. Vasylenko, O. A., Yastremskaya, L. S., Salata, A. M., Salata, O. S., & Fedun, N. O. (2011). Biotechnological aspects of poly- β -hydroxybutyrate biosynthesis. *Biotechnologia Acta*, 4 (3), 009-017.
6. Вильданов, Ф. Ш., Латыпова, Ф. Н., Красуцкий, П. А., & Чанышев, Р. Р. (2012). Биоразлагаемые полимеры современное состояние и перспективы использования. *Башкирский химический журнал*, 19 (1), 135-139.
7. Сырцова М.Ю., Максимова М.Г. (2019). Полилактид - как основа развития технологий в области биоразлагаемых полимеров. *Вестник магистратуры*, (2-2 (89)), 12-13.
8. Allemann, M.N., Tessman, M., Reindel, J. et al. Rapid biodegradation of microplastics generated from bio-based thermoplastic polyurethane. *Sci Rep* 14, 6036 (2024).
9. Vroman I, Tighzert L. Biodegradable Polymers. *Materials (Basel)*. 2009 Apr 1;2(2):307–44. doi: 10.3390/ma2020307. PMID: PMC5445709.
10. Ardra Nandakumar, Jo-Ann Chuah, Kumar Sudesh, *Bioplastics: A boon or bane? Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 147, 2021, 111237, ISSN 1364-0321.
11. Хасанова Г.Б. (2014). Биоразлагаемые полимеры - путь к устойчивому развитию природы и общества. *Вестник Казанского технологического университета*, 17 (18), 323-325.
12. Мазитова А.К., Аминова Г.К., Зарипов И.И., Вихарева И.Н. Биоразлагаемые полимерные материалы и модифицирующие добавки: современное состояние. Часть II // *Нанотехнологии в строительстве*. – 2021. – Том 13, № 1. – С. 32–38.
13. Stoica, M.; Bichescu, C.I.; Crețu, C.-M.; Dragomir, M.; Ivan, A.S.; Podaru, G.M.; Stoica, D.; Stuparu-Crețu, M. Review of Bio-Based Biodegradable Polymers: Smart Solutions for Sustainable Food Packaging. *Foods* 2024, 13, 3027.
14. Вохобов Р.А., Аминбоев А. (2021). Экология при производстве полимерных материалов проблемы и решения. *The Scientific Heritage*, (68-1), 31-34.