

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт Машиностроения

(наименование института)

Кафедра «Управление промышленной и экологической безопасностью»

(наименование кафедры)

20.04.01 «Техносферная безопасность»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

«Экологическая безопасность процессов и производств»

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Исследование и разработка инновационных методов применения и утилизации биоразлагаемого пластика полилактида, используемого при технологических процессах печати на 3D-принтере (на примере ООО «Прототип» г.о. Тольятти)

Студент(ка)

А.В. Сударкина

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

Н.Г. Шерышева

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Консультанты

Т.А. Варенцова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы к.т.н., доцент М.И. Фесина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« _____ » _____ 2018 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.п.н., профессор Л.Н. Горина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« _____ » _____ 2018 г.

Тольятти 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ОПРЕДЕЛЕНИЯ	8
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	12
1 Теоретические основы исследования биоразлагаемого пластика полилактида	13
1.1 Подбор научных публикаций, нормативных документов по теме диссертационного исследования	13
1.2 Сравнительные анализы биоразлагаемого пластика полилактида (PLA) и акрилонитрилбутадиенстирола (ABS)	15
2 Особенности технологии 3D-печати	28
2.1 3D-печать	28
2.2 Общая структура работы 3D-принтера	29
2.3 Технологический процесс печати изделий на 3D принтере	33
2.3.1 Создание цифровой модели	35
2.3.2 Экспорт 3D-модели в STL-формат	36
2.3.3 Генерирование G-кода	36
2.3.4 Финишная обработка объекта	38
2.4 Риски при работе с 3D-принтером	39
3 Проведение теоретических и экспериментальных исследований использования биоразлагаемого пластика полилактида	42
3.1 Описание организации ООО «Прототип»	42
3.2 Результат экспериментального исследования – расход электроэнергии при печати разными видами пластика	43
3.3 Исследование на наличие выделяемых вредных веществ при печати разными видами пластика	50
3.4 Исследование на прочность изделий, напечатанных на 3D-принтере разными видами пластика	56
3.4.1 Испытание пластиков на изгиб	57
3.4.2 Испытание пластиков на растяжение	58

3.4.3 Испытание пластиков на сжатие	60
3.5 Экспериментальное исследование при воздействии температур на PLA-пластик	61
3.6 Прототипирование изделий, напечатанных на 3D-принтере разными видами пластика	63
3.7 Исследование и разработка методов утилизации биоразлагаемого пластика	67
3.8 Обоснованность применения биоразлагаемого пластика в ООО «Прототип»	73
3.9 Основные выводы по проведенным теоретическим и экспериментальным исследованиям биоразлагаемого пластика полилактида	80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	83
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	86

ВВЕДЕНИЕ

Около 95% полимерных материалов производятся из ограниченных и невозобновляемых природных ресурсов, а именно, нефти, в качестве сырья и ресурсов в виде энергии. Долгое время альтернативные источники сырья для производства полимерных материалов не оправдывали ожидания разработчиков, у них была высокая себестоимость, а также ограниченные функциональные и эксплуатационные возможности [1]. Обострение экологических проблем в мире, выбросы в окружающую среду вредных веществ при производстве и утилизации полимеров на основе нефти, накопление полимеров, которые не утилизировались, дало толчок к развитию и увеличению производства биологически разлагаемых полимеров, которые уменьшают воздействие на окружающую среду. Одним из таких биоразлагаемых полимеров является полилактид, который получается из возобновляемых природных ресурсов и сырья (кукуруза, сахарный тростник и т.д.) [2].

Актуальность темы исследования. Процесс 3D-печати последнее время получил огромную популярность, как среди любителей, так и при производстве различных изделий в промышленности. В большинстве случаев используются полимерные нити для печати, изготовленные на основе нефти, типа акрилонитрилбутадиенстирола.

Акрилонитрилбутадиенстирол при нагревании, при технологических процессах 3D-печати выделяет вредные вещества, а именно, акрилонитрил, который при длительном вдыхании может вызвать отравление и раздражение слизистых оболочек человека. Такой вид пластика категорически запрещается использовать маленькими детьми в качестве игрушек, а также в качестве контейнеров и посуды для хранения пищевых продуктов (в особенности горячих). ABS-пластик может быть вторично переработан, в качестве основных способов переработки используется метод измельчения и термическая обработка, что является довольно дорогостоящим и сложным процессом. Разлагается такой пластик только при температуре свыше 300°C, углеводороды

являются основными продуктами распада. При температуре более 340°C акрилонитрилбутадиенстирол дает выход аммиаку (NH_3), цианистому водороду (HCN) и в небольших количествах стирола (C_8H_8). Все это приносит непоправимый вред для окружающей и природной среды.

Актуальность данной магистерской диссертации заключается в исследовании и разработки внедрения нитей биоразлагаемого пластика полилактида для 3D-печати, которые имеют экологически чистые качества при использовании, как человеком, так и для окружающей природной среды. В природной среде биоразлагаемый пластик полилактид разлагается до биогенных элементов, которые включаются в естественный природный круговорот веществ.

Целью исследования является разработка и внедрение экологически чистой технологии применения биоразлагаемого пластика полилактида в процессе 3D-печати.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Провести исследования свойств, структуры и применения биоразлагаемого пластика полилактида, в том числе при печати им изделий на 3D-принтере.
2. Провести сравнительный анализ характеристик биоразлагаемого пластика полилактида с акрилонитрилбутадиенстиролом.
3. Выявить особенности технологии и рисков при 3D-печати.
4. Провести экспериментальные и теоретические исследования использования биоразлагаемого пластика полилактида по следующим параметрам: расход электроэнергии при печати; наличие выделения вредных веществ при печати; прочность, изгиб, растяжение, сжатие изделий из пластика; воздействие повышенных температур; прототипирование изделий больших размеров.
5. Выявить этапы биоразложения пластика полилактида.
6. Разработать рекомендации по утилизации биоразлагаемого пластика полилактида.

Объект исследования. Процесс 3D-печати с использованием полилактида.

Теоретическая и методологическая база исследования. Теоретической и методологической базой исследования является литературный поиск, математические методы, тестирование возможных методов разработки применения и утилизации данного пластика, сравнительный анализ с пластиками, не имеющих биоразлагаемых свойств, а также исследование его использования при печати изделий на 3D-принтере.

Биоразлагаемый пластик полилактид был внедрен в технологический процесс печати на 3D-принтере на примере ООО «Прототип» г.о.Тольятти.

Научная новизна исследования заключается в разработке теоретических и практических положений использования биоразлагаемого пластика полилактида по определенным параметрам, что позволит сделать вывод о необходимости внедрения его в процесс 3D-печати.

Установлены сравнительные характеристики двух видов пластика, а именно, полилактида и акрилонитрилбутадиенстирола. Разработаны технология 3D-печати и технологический процесс 3D-печати, определены риски при печати на 3D-принтере. Разработаны методы подсчета затрачиваемой электроэнергии при печати разными видами пластика. Выявлены основные недостатки использования полилактида и акрилонитрилбутадиенстирола при 3D-печати. Спроектированы методы утилизации биоразлагаемого пластика полилактида.

Теоретическая и практическая значимость магистерской диссертации заключается в том, что на основе теоретических и экспериментальных исследований качественных характеристик пластиков выявлены основные недостатки и преимущества полилактида и акрилонитрилбутадиенстирола, разработаны методы утилизации полилактида и определена экономическая целесообразность внедрения полилактида в ООО «Прототип».

Положения, выносимые на защиту. В результате проведенного экспериментального исследования печати одинаковых изделий при помощи PLA-пластика и ABS-пластика на 3D-принтере установлено, что печать изделий на принтере с использованием биоразлагаемого пластика полилактида значительно экономит расход электроэнергии, печать данными видами пластика безопасна и безвредна, пластик PLA проявил себя прочным при изгибе, при растяжении и самым прочным при испытании на сжатие. Образцы изделий пластика совсем не деформируются, но изделия из полилактида невозможно эксплуатировать при высоких температурах (от 50°C). Также данный пластик возможно применять для печати больших прототипов изделий, макетов, образцов и т.д. в отличие от ABS-пластика.

Основным рекомендуемым способом утилизации биоразлагаемого пластика полилактида является метод компостирования. Выкидывать использованные изделия из полилактида вместе с остальным бытовым мусором не рекомендуется.

Увеличение объемов печати пластиком полилактидом в ООО «Прототип» до 20% существенно сэкономит затраты предприятия.

Степень достоверности и апробация результатов изложена в части 3 магистерской диссертации, а именно, приведены данные по расходу электроэнергии при печати на принтере двумя видами пластика, полилактидом (PLA) и ABS-пластиком; исследовано наличие выделяемых вредных веществ при печати PLA-пластиком и ABS-пластиком; проведены исследования на прочность изделий, напечатанных на 3Д-принтере разными видами пластика; описаны экспериментальные исследования при воздействии температур на PLA-пластик; рассмотрен вопрос прототипирования изделий, напечатанных на 3Д-принтере разными видами пластика; а также рассмотрены и предложены методы утилизации биоразлагаемого пластика.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка используемых источников, состоящего из 39 источников. Основная часть исследования изложена на 41 странице, текст иллюстрирован 13 таблицами, 30 рисунками.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В данной магистерской диссертации применяют следующие термины с соответствующими определениями:

«Полилактид (ПЛА) — производится из молочной кислоты, полученной синтезом или посредством ферментации (в этом способе используется сырье, состоящее преимущественно из гексоз или соединений, легко расщепляющихся на гексозы, например, сахара, мелассы, сока сахарной свеклы, сульфитных щелоков, сыворотки или крахмалов)» [3] согласно «Пояснения к единой Товарной номенклатуре внешнеэкономической деятельности Евразийского экономического союза (ТН ВЭД ЕАЭС)» (Том II. Разделы VI – VII. Группы 29-43), а также «биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный, алифатический полиэфир, мономером которого является молочная кислота. Сырьем для производства служат ежегодно возобновляемые ресурсы, такие как кукуруза и сахарный тростник. Используется для производства изделий с коротким сроком службы (пищевая упаковка, одноразовая посуда, пакеты, различная тара), в медицине, для производства хирургических нитей и штифтов» [4] согласно Свободной энциклопедии «Википедия».

«АБС-пластик (акрилонитрилбутадиенстирол, химическая формула $(C_8H_8)_x \cdot (C_4H_6)_y \cdot (C_3H_3N)_z$) — ударопрочная техническая термопластическая смола на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом (название пластика образовано из начальных букв наименований мономеров). Пропорции могут варьироваться в пределах: 15—35 % акрилонитрила, 5—30 % бутадиена и 40—60 % стирола. Производство одного килограмма ABS требует эквивалента примерно 2 кг нефти в виде материалов и энергии. Может быть повторно переработан» [5] согласно Свободной энциклопедии «Википедия».

«Пластиковое загрязнение - процесс накопления продуктов из пластмасс в окружающей среде, отрицательно сказывающийся на дикой

природе, среде обитания диких животных и людей» [6] согласно Свободной энциклопедии «Википедия».

«Биополимеры — класс полимеров, встречающихся в природе в естественном виде, входящие в состав живых организмов: белки, нуклеиновые кислоты, полисахариды, лигнин. Биополимеры состоят из одинаковых (или схожих) звеньев — мономеров. Мономеры белков — аминокислоты, нуклеиновых кислот — нуклеотиды, в полисахаридах — моносахариды. Выделяют два типа биополимеров — регулярные (некоторые полисахариды) и нерегулярные (белки, нуклеиновые кислоты, некоторые полисахариды)» [7] согласно Свободной энциклопедии «Википедия».

Полилактат (ПЛ) - полимер молочной кислоты, биоразлагаемый полиэфир.

«3D-принтер - это периферийное устройство, использующее метод послойного создания физического объекта по цифровой 3D-модели» [8] согласно Свободной энциклопедии «Википедия».

«Экструзия - застывание материала при охлаждении — раздаточная головка выдавливает на охлаждаемую платформу-основу капли разогретого термопластика. Капли быстро застывают и слипаются друг с другом, формируя слои будущего объекта» [8] согласно Свободной энциклопедии «Википедия».

«Ламинирование - деталь создаётся из большого количества слоёв рабочего материала, которые постепенно накладываются друг на друга и склеиваются, при этом лазер (или режущий инструмент) вырезает в каждом контуре сечения будущей детали» [8] согласно Свободной энциклопедии «Википедия».

«Фотополимеризация – ультрафиолетовый лазер засвечивает жидкий фотополимер (через фотошаблон, или постепенно, пиксель за пикселем)» [8] согласно Свободной энциклопедии «Википедия».

Прототип – понятие создания дубликатов моделей, которые используются на первом этапе перед запуском в производство.

3D прототипирование – построение 3D модели изделия, печать модели на 3D-принтере, тестирование модели, запуск модели в серийное производство.

Экструдер - раздаточная головка (иногда называют сопло), которая выдавливает на стол для печати капли разогретого размягченного пластика, которые быстро застывают и методом слипания друг с другом образуют слои будущей детали (образца).

Усадка – сжатие предметов, напечатанных на 3D-принтере, при охлаждении (примерно на 6-10%).

Предельно допустимая концентрация (ПДК) - максимальная концентрация химических элементов и их соединений в окружающей среде, которая при повседневном влиянии в течение длительного времени на организм человека не вызывает патологических изменений или заболеваний, устанавливаемых современными методами исследований в любые сроки жизни настоящего и последующего поколений.

Запыленность – санитарный показатель загрязненности воздуха рабочей или жилой зоны (отношение веса пыли к объему воздуха, мг/м³).

«Изгиб — вид деформации, при котором происходит искривление осей прямых брусков или изменение кривизны осей кривых брусков, изменение кривизны/искривление срединной поверхности пластины или оболочки» [9] согласно Информационному порталу «Лекции. Нет».

«Растяжение/сжатие — вид продольной деформации стержня или бруса, возникающий в том случае, если нагрузка к нему прикладывается по его продольной оси (равнодействующая сил, действующих на него, нормальна поперечному сечению стержня и проходит через его центр масс)» [9] согласно Информационному порталу «Лекции. Нет».

Прочность — свойство материала сопротивляться разрушению под действием внутренних напряжений, возникающих под воздействием внешних сил. Другими словами, это свойство конструкции выполнять назначение, не разрушаясь в течение заданного времени.

Модуль упругости — общее название нескольких физических величин, характеризующих способность твёрдого тела упруго деформироваться при приложении к нему силы.

Максимальная нагрузка — определение максимальной силы, которая приложена к испытательному образцу (физическая величина, иными словами мера воздействия на тело другими телами). Приложенная к массивному телу сила является причиной возникновения в нём деформаций и напряжений.

«Предел прочности на сжатие/растяжение — пороговая величина переменного механического напряжения, превышая который механическое напряжение в результате (за небольшой промежуток времени) сожмет/разорвет тело из конкретного материала — тело разрушится или сильно деформируется» [10] согласно Свободной энциклопедии «Википедия».

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Перечень обозначений и сокращений, применяемых в данной магистерской диссертации:

PLA - полилактид

ABS – акрилонитрилбутадиенстирол

ПЛ – полилактат

3D – что-либо, имеющее трехмерное пространство

ПДК - предельно допустимая концентрация

1 Теоретические основы исследования биоразлагаемого пластика полилактида

1.1 Подбор научных публикаций, нормативных документов по теме диссертационного исследования

Темой магистерской диссертации было выбрано «Исследование и разработка инновационных методов применения и утилизации биоразлагаемого пластика полилактида, используемого при технологических процессах печати на 3D-принтере (на примере ООО «Прототип» г.о. Тольятти)».

Процесс теоретических исследований заключался в исследовании биоразлагаемого пластика полилактида, возможных методов разработки применения и утилизации данного пластика, сравнительный анализ с пластиками, не имеющими биоразлагаемых свойств, а также исследование его использования при печати изделий на 3D-принтере.

Проведенное изучение отечественных и зарубежных научных материалов, публикаций (а именно, статей в научных изданиях, различных статей, тезисов докладов конференций, монографий и другой учебной литературы, а также справочников и информационных ресурсов), заявок и описаний патентов на изобретения и полезных моделей, законодательных, нормативно-правовых документов по теме диссертационного магистерского исследования определило цели, задачи исследования и решаемую проблему.

Было проведено изучение отечественных и зарубежных научных публикаций, а именно, был произведен поиск патентных документов по названиям «полилактид», «биоразлагаемый пластик» на сайте <http://www1.fips.ru> в информационно-поисковом источнике, был найден 281 документ (патенты и заявки на изобретения).

Выбранные поисковые базы (количество найденных документов):

- Рефераты на российские изобретения (42);
- Заявки на российские изобретения (208);
- Полные тексты российских изобретений из трех последних бюллетеней (22);
- Формулы российских полезных моделей (7);
- Формулы российских полезных моделей из трех последних бюллетеней (0);
- Перспективные российские изобретения (2).

При поиске патентных документов было обращено внимание на Заявку на изобретение №2014143799, 30.10.2014 «Биологически разлагаемый пластик и его применение».

Также были применены для поиска учебной и научной литературы следующие электронно-библиотечные системы:

1. Электронно-библиотечная система «Лань» по ссылке <https://e.lanbook.com>:

Результаты поиска: биоразлагаемый пластик.

Найдено в текстах книг: 25.

Найдено в текстах статей: 22.

2. Электронно-библиотечная система «znanium.com» по ссылке <http://znanium.com>

Поиск книг по условию: биоразлагаемый пластик

Всего найдено: 50.

Поиск нормативно-правовой литературы проводился на сайте <http://www.consultant.ru>:

Поиск по сайту: биоразлагаемый пластик

Найдено источников информации: 12

Поиск по сайту: полилактид

Найдено источников информации: 8

Анализ литературных источников показал, что последние годы активно развивалось производство биоразлагаемых полимеров, в том числе на основе

молочной кислоты. Было выяснено, что данный вид биоразлагаемых полимеров еще в начале прошлого столетия являлся благоприятной средой для питания и хранения различных микроорганизмов. Под воздействием микроорганизмов биоразлагаемые полимеры разлагаются на CO_2 и H_2O .

На основании изученной литературы были сформулированы основные выводы:

1. Биополимеры по своим экологическим свойствам значительно превосходят традиционные полимеры (пластмассы). С использованием утилизации методом компостирования биополимеры практически полностью разлагаются на не приносящие вред окружающей природной среде компоненты, как вода, углекислый газ, гумус, которые участвуют в природном цикле [11].

2. Самым востребованным биополимером является полилактид, представляющий собой продукт полимеризации молочной кислоты.

3. Все биоразлагаемые полимеры производятся из растительного сырья, что является их основным преимуществом (растительным сырьем может служить картофель, кукуруза, свекла, древесина). Такое сырье является воспроизводимым, в отличие от нефтяных ресурсов, которые ограничены в природе. Культивирование растительного сырья в больших объемах может открыть новые возможности, для одной из важнейших, сельскохозяйственной отрасли. Целлофан, различная одноразовая тара и посуда, которые были произведены из материалов на основе крахмала, кукурузы, свеклы или древесины, нашли свое широкое применение среди людей [12].

1.2 Сравнительные анализы биоразлагаемого пластика полилактида (PLA) и акрилонитрилбутадиенстирола (ABS)

Данный этап работы заключался в разработке необходимого технического решения, направленного на улучшение экологической

безопасности, а также определение методов и разработка программы научных исследований.

Было описано обоснование направления исследования и приведены сравнительные оценки биоразлагаемого пластика полилактида (PLA) и акрилонитрилбутадиенстирола (ABS-пластика).

Были рассмотрены состав и основные сферы применения биоразлагаемого пластика полилактида.

«Полилактид — биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный, алифатический полиэфир, мономером которого является молочная кислота. Сырьем для производства служат ежегодно возобновляемые природные ресурсы, такие как кукуруза и сахарный тростник. Используется для производства изделий с коротким сроком службы (пищевая упаковка, одноразовая посуда, пакеты, различная тара), в медицине, для производства хирургических нитей и штифтов и т.д. Существует два способа синтеза полилактида: поликонденсация молочной кислоты и полимеризация лактида. В промышленности используется их комбинация. Поликонденсацией молочной кислоты можно получать только низкомолекулярный полилактид, так как в процессе выделяется побочный продукт — вода, отвести которую из реакции сложно, и поэтому растущая полимерная цепь разрушается. Получившийся низкомолекулярный полилактид деполимеризуют до димера молочной кислоты, лактида. Полученный лактид полимеризуют при высокой температуре с добавлением катализатора октаноата олова, получая высокомолекулярный полилактид.

Химическая формула полилактида: $(C_3H_4O_2)_n$

Молярная масса: $(72)_n$

Плотность: 1,290/1,248 г/см³ (кристаллический/аморфный)

Термические свойства:

Температура плавления: 170—180 С⁰

Температура стеклования: 54—58/50—53 С⁰

Удельная теплота плавления: 93 Дж/г» [4] согласно Свободной энциклопедии «Википедия».

Обоснованность направления исследования заключается в том, что биоразлагаемый пластик полилактид применяется для производства экологически чистой продукции, которая безопасна при использовании взрослым человеком, а также при использовании ребенком, не выделяет токсических веществ и не имеет неприятного запаха. Биоразлагаемые пакеты из полилактида используются в таких крупных торговых сетях как Wal-Mart Stores и Kmart (США) [13]. Ввиду своей биосовместимости, полилактид широко применяется в медицине, для производства хирургических нитей и штифтов, а также в системах доставки лекарств.

«Полилактид отвечает концепции устойчивого развития, так как для его синтеза используются ежегодно возобновляемые природные ресурсы. Упаковочные изделия из полилактида - экологически чистая альтернатива традиционной бионеразлагаемой упаковки на основе нефти» [4] согласно Свободной энциклопедии «Википедия».

В то же время, экологичность полилактида обуславливает его недолговечность. Пластик легко впитывает воду и относительно мягок при воздействии повышенных температур. Как правило, модели из PLA не предназначаются для длительного функционального использования, а служат в качестве дизайнерских моделей, сувениров и игрушек. Среди немногих практических промышленных применений можно отметить также использование в подшипниках, не несущих высокой механической нагрузки (например, в моделировании), что возможно благодаря отличному коэффициенту скольжения материала [14].

Одним из наиболее важных факторов для применения в 3D-печати служит низкая температура плавления – всего 170-180°C, что способствует относительно низкому расходу электроэнергии и использованию недорогих сопел из латуни и алюминия. Как правило, экструзия производится при 160-170°C. В то же время, PLA достаточно медленно застывает (температура

стеклования составляет порядка 50°C), что следует учитывать при выборе 3D-принтера. Оптимальным вариантом является устройство с корпусом открытого типа, подогреваемой рабочей платформой (во избежание деформаций моделей большого размера) и, желательно, дополнительными вентиляторами для охлаждения свежих слоев модели [15].

PLA обладает низкой усадкой (потеря объема при охлаждении пластика), что способствует предотвращению деформаций.

Стоимость PLA относительно невелика, что добавляет популярности этому материалу.

«Самый крупный производитель PLA-пластика - американская компания Nature Works (140 000 тонн/год). Также PLA-пластик производится компанией Toyota (Япония), Hitachi (Япония), DuPont (США), Galactic (Бельгия), Hisun Biomaterials (Китай), а также компания PURAC (Нидерланды)» [2] согласно Свободной энциклопедии «Википедия».

В Российской Федерации начались появляться небольшие подобные производства в 2016 году, например, компания «НПП Спецавиа», однако, биоразлагаемая посуда и упаковка импортируется из разных стран различными компаниями, что существенно экономит затраты на производство данной био- продукции [16].

Полилактид также применяется в 3D-принтерах в качестве исходного материала для печати (нити для печати).

Ниже рассмотрен состав и сферы применения ABS-пластика.

«ABS-пластик (акрилонитрилбутадиенстирол) — ударопрочная техническая термопластическая смола на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом. Пропорции могут варьироваться в пределах: 15-35 % акрилонитрила, 5-30 % бутадиена и 40-60 % стирола. Производство одного килограмма ABS требует эквивалента примерно 2 кг нефти в виде материалов и энергии.

Химическая формула: $(C_8H_8)_x \cdot (C_4H_6)_y \cdot (C_3H_3N)_z$.

Свойства:

- Непрозрачный материал желтоватого оттенка (возможно окрашивание в различные цвета);
- Нетоксичность в нормальных условиях;
- Долговечность в отсутствие прямых солнечных лучей и ультрафиолета;
- Стойкость к щелочам и моющим средствам;
- Влагостойкость;
- Маслостойкость;
- Кислотостойкость;
- Теплостойкость 103°C (до 113°C у модифицированных марок);
- Широкий диапазон эксплуатационных температур (от –40°C до +90°C);
- Растворяется в сложных эфирах, кетонах, 1, 2-дихлорэтаноле, ацетоне, этилацетате;
- Плотность 1.02-1.06 г/см³.

Используется для изготовления:

- деталей автомобилей (приборных щитков, элементов ручного управления, радиаторной решётки);
- корпусов бытовой техники, радио- и телеаппаратуры, деталей различных электроприборов, пылесосов, кофеварок, пультов управления, телефонов, факсовых аппаратов, различной компьютерной техники и аксессуаров к ней, калькуляторов и другой различной бытовой и оргтехники;
- корпусов промышленных аккумуляторов;
- спортивного инвентаря, деталей оружия;
- лодок;
- мебели;
- изделий сантехники;
- выключателей, переключателей;
- канцелярских изделий;
- музыкальных инструментов;
- настольных принадлежностей;

- чемоданов, контейнеров;
- смарт-карт;
- как добавка, повышающая теплостойкость и/или улучшающая перерабатываемость композиций на основе ПВХ, ударопрочность полистирола, снижающая цену поликарбонатов» [5] согласно Свободной энциклопедии «Википедия».

ABS-пластик является довольно часто используемым материалом (нити полимера) для экструзионных 3D-принтеров для печати различных прототипов изделий. Арилонитрилбутадиенстирол имеет свойство высокой температуры стеклования для обеспечения отсутствия деформаций изделия при значительно небольшом нагреве в бытовых условиях, но имеет достаточно низкой температуре для экструзии путем обычных условий.

Основное производство ABS-пластиков было сконцентрировано в США (до восьмидесятых годов прошлого столетия). После восьмидесятых годов произошло мировое смещение производства пластиков в страны Восточной Азии (в основном, Китай).

По состоянию на 2015 год основные потребители пластиков вида арилонитрилбутадиенстирола являются: страны Юго-Восточной Азии (около 58%), в том числе Китай (10%), Западные Европейские страны (9%), США и Канада (9%).

В странах Юго-Восточной Азии ABS-пластики во многих областях вытесняет ударопрочный полистирол.

В 2015 году производилось около 10 млн. тонн ABS-пластиков странами Юго-Восточной Азии. Международная торговля пластиком превышала около 10,5 млрд. долларов [17].

Проанализировав данные характеристики и свойства двух видов пластиков, основные данные приведены в сравнительной таблице 1 и сформулированы основные выводы.

Таблица 1 - Основные сравнительные характеристики полилактида и ABS-пластика

Характеристика	PLA-пластик (биоразлагаемый пластик полилактид)	ABS-пластик (акрилонитрилбутадиен стирол)
1	2	3
Химическая формула	$(C_3H_4O_2)_n$	$(C_8H_8)_x \cdot (C_4H_6)_y \cdot (C_3H_3N)_z$
Метод получения	Ежегодно возобновляемые ресурсы (кукуруза, сахарный тростник и др.)	Из нефти в виде материалов и энергии, при этом на 35% сокращается использование ископаемых ресурсов
Выбросы в атмосферу	При производстве PLA-пластика в атмосферу выбрасывается вдвое меньше вредных веществ, углекислого газа по сравнению с производством полимеров на нефтяной основе	Выбросов в атмосферу вдвое больше
Использование	Используется для производства изделий с коротким сроком службы – экологически чистой продукции (пищевая упаковка, одноразовая посуда, пакеты, различная тара), в медицине, для производства хирургических нитей и штифтов и т.д.	Используется для изготовления деталей автомобилей, радио- и телеаппаратуры, электроприборов, различной компьютерной и бытовой техники, корпусов аккумуляторов, спортивного инвентаря, деталей оружия, лодок, мебели, изделий сантехники, переключателей, канцелярских изделий, музыкальных инструментов, настольных принадлежностей, чемоданов, контейнеров, смарт-карт и пр.

Продолжение таблицы 1

1	2	3
Плотность	1,290/1,248 г/см ³ (кристаллический/ аморфный)	1,02 – 1,06 г/см ³
Термические свойства	Температура плавления: 170-180 ⁰ С Температура стеклования: 54-58/50—530С Удельная теплота плавления: 93 Дж/г	Температура плавления: 220 ⁰ С Температура стеклования: 80 ⁰ С
Основной производитель	Самый крупный производитель -американская компания Nature Works (140 тыс. тонн/год).	Страны Азии, 9,5 млн. тонн/год
Производство в России	Есть небольшие компании (с 2016 года)	Есть
Использование на 3D принтерах	Низкое	Высокое
Степень усадки	Отсутствует	Высокая степень усадки при охлаждении – материал может потерять до 8% объема
Экологические характеристики	Экологичен, служит для производства упаковки для пищевых продуктов, контейнеров, для лекарственных препаратов и хирургических нитей, игрушек для детей, сувениров и др. продукции	При нагревании пластика выделяются пары акрилонитрила – ядовитого соединения, способного вызвать раздражение слизистых оболочек и отравление. Не рекомендуется использовать для производства пищевых контейнеров и посуды (особенно, для хранения горячей пищи или алкогольных напитков) или игрушек для маленьких детей

Продолжение таблицы 1

1	2	3
Разложение	Разлагаются в окружающей среде под действием физических факторов и микроорганизмов – бактерий или грибков (вся его масса разлагается в почве или воде за период в шесть месяцев, что позволяет решать проблему отходов)	Разложение происходит при температурах свыше 310°C, основными летучими продуктами являются углеводороды. Выше 350°C акрилонитриловый компонент дает выход аммиака и синеродистого водорода. Образуется некоторое количество стирола
Вторичная переработка	Не требуется	Основными способами вторичной переработки ABS-пластика служат термическая обработка и измельчение, что представляет довольно трудоемкий и сложный процесс

Примеры изделий, напечатанных разными видами пластика представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 - Слева изделие из пластика PLA и справа из пластика ABS

Основные выводы:

1. Биополимеры по своим экологическим свойствам значительно превосходят традиционные полимеры (пластмассы).
2. С использованием утилизации методом компостирования биополимеры практически полностью разлагаются на не приносящие вред окружающей природной среде компоненты, как вода, углекислый газ, гумус, которые участвуют в природном цикле (рисунок 2).
3. Самым востребованным биополимером является полилактид, представляющий собой продукт полимеризации молочной кислоты.
4. Полилактиды помимо других биоразлагаемых пластиков являются самыми востребованными и перспективными в отличие от традиционных пластмасс, что говорит об их высоких физико-механических свойствах, а также они не изменяют своих усадочных характеристик, при использовании в технологических процессах при печати изделий на 3D-принтере.



Рисунок 2 - Разложение изделия из биопластика полилактида в природе

В таблице 2 приведены основные сравнительные характеристики изделия, напечатанного разными образцами пластика.

Таблица 2 - Сравнительные характеристики изделия, напечатанного разными образцами пластика (полилактид и ABS-пластик)

Характеристика	Изделие из биоразлагаемого пластика полилактида	Изделие из ABS-пластика
1	2	3
Выделение ядовитых веществ при печати изделия	Не выделяет, не токсичное. Не токсичность материала позволяет проводить процесс печати даже в слабопрветриваемых помещениях.	Требует обязательного проветривания помещения. При нагревании пластика выделяются пары акрилонитрила – ядовитого соединения, способного вызвать раздражение слизистых оболочек и отравление.

Продолжение таблицы 2

1	2	3
Использование для пищевых продуктов	Экологичен, служит для производства упаковки для пищевых продуктов и контейнеров	Не рекомендуется использовать ABS-пластик для производства пищевых контейнеров и посуды (особенно для хранения горячей пищи или алкогольных напитков).
Использование в медицине	Используется для лекарственных препаратов и хирургических нитей, штифтов, протезов, упаковки и др.	Используется частично для некоторых изделий
Использование детьми	Рекомендуется использование изделий детьми	Не рекомендуется использование изделий из данного пластика детьми маленького возраста
Долговечность	Модели не долговечны – под воздействием солнечного света и влаги они полностью разлагаются в период от месяца до двух-трех лет. Биоразлагаемость PLA-пластика является и основным недостатком этого материала	Долговечны
Скольжение и блеск	Детали из PLA пластика имеют хорошее скольжение, из него можно делать подшипники скольжения. Изделия из PLA выглядят более гладко, с глянцевым отблеском.	Не изготавливаются подшипники скольжения. Изделия выглядят более матовыми, имеют приглушенный блеск.

Продолжение таблицы 2

1	2	3
Энергоэффективность при печати изделия	Низкая температура плавления (170-180 °С) обеспечивает энергоэффективность 3D-печати	Температура более высокая (220 °С), энергоэффективность не обеспечивается
Стоимость затрат при печати изделия	Возможно использовать для печати недорогими алюминиевыми или латунными соплами	Не используется замена сопла алюминиевым или латунным
Усадка изделия	Отсутствует усадка, что позволяет проводить печать с высоким разрешением, создавать геометрически сложные модели	Большой коэффициент усадки
Удаление поддержек и дополнительная обработка изделия	Изделия из полилактида практически не нуждаются в дополнительной обработке, они сразу готовы к эксплуатации. Минусом PLA пластика является его повышенная хрупкость и жесткость, поэтому в отличие от ABS, удаление поддержек из PLA при печати на однокструдерных 3D-принтерах является крайне трудоемкой процедурой.	Изделия из ABS-пластика легче поддаются дополнительной обработке, например, удалению поддержек
Разложение изделия в природе	Разлагаются в окружающей среде под действием физических факторов и микроорганизмов – бактерий или грибов. (его масса разлагается в почве или воде за период в шесть месяцев, что позволяет решать проблему отходов)	ABS-пластик не поддается биологическому разложению. 3D изделие возможно не разложится и через 300-500 лет

2 Особенности технологии 3D-печати

2.1 3D-печать

«3D-печать может осуществляться разными способами и с использованием различных материалов, но в основе любого из них лежит принцип послойного создания (выращивания) твёрдого объекта» [6] согласно Свободной энциклопедии «Википедия».

Технологии, применяемые для создания слоев: экструзия, фотополимеризация, формирование слоя на выровненном слое порошка, подача проволочного материала, ламинирование, точечная подача порошка, струйная печать:

1) «Экструзия - застывание материала при охлаждении, а именно, раздаточная головка выдавливает на охлаждаемую платформу-основу капли разогретого термопластика. Капли быстро застывают и слипаются друг с другом, формируя слои будущего объекта» [8] согласно Свободной энциклопедии «Википедия».

2) «Фотополимеризация – ультрафиолетовый лазер засвечивает жидкий фотополимер (через фотошаблон, или постепенно, пиксель за пикселем)» [8] согласно Свободной энциклопедии «Википедия».

3) Формирование слоя на выровненном слое порошка.

4) «Подача проволочного материала - плавление подаваемого проволочного материала под действием электронного излучения» [8] согласно Свободной энциклопедии «Википедия».

5) «Ламинирование - деталь создаётся из большого количества слоёв рабочего материала, которые постепенно накладываются друг на друга и склеиваются, при этом лазер (или режущий инструмент) вырезает в каждом контуре сечения будущей детали» [8] согласно Свободной энциклопедии «Википедия».

б) «Точечная подача порошка - подаваемый порошок плавится под действием лазерного или электронного луча» [8] согласно Свободной энциклопедии «Википедия».

7) Струйная печать - рабочий материал наносится с помощью струйной печати.

Самая распространенная технология, применяемая на большинстве 3D-принтеров это экструзия, которая позволяет осуществлять печать несколькими материалами одновременно (в зависимости от качеств и характеристик принтера), а также осуществление цветовой печати при использовании различных образцов цветного пластика.

2.2 Общая структура работы 3D-принтера

Был рассмотрен принцип работы 3D-принтера более подробно (рисунок 3). Практически все персональные 3D-принтеры используют один и тот же подход к процессу 3D-печати. Детали могут различаться, но в основном, строение и принцип работы принтера один и тот же (рисунок 3).

3D-принтер это устройство, которое может двигаться линейно в трех измерениях – по осям X, Y и Z. Все 3D-принтеры оснащены шаговыми двигателями для того, чтобы устройство могло перемещаться по осям с особой точностью и плавными переходами, обычно это происходит на 1,8 градуса за один шаг. Данный процесс управляется автоматизированной системой, а именно, контроллером, с помощью которого перемещается сопло (печатающая головка), которая создает послойно заданный объект.

По большей части различных моделей 3D-принтеров используется газораспределительные механизмы и ролики, которые скользят по осям X и Y для оптимально быстрого и точного перемещения. Для оси Z некоторые принтеры могут иметь стержни с резьбой и особые винты для еще более оптимального и четкого перемещения.

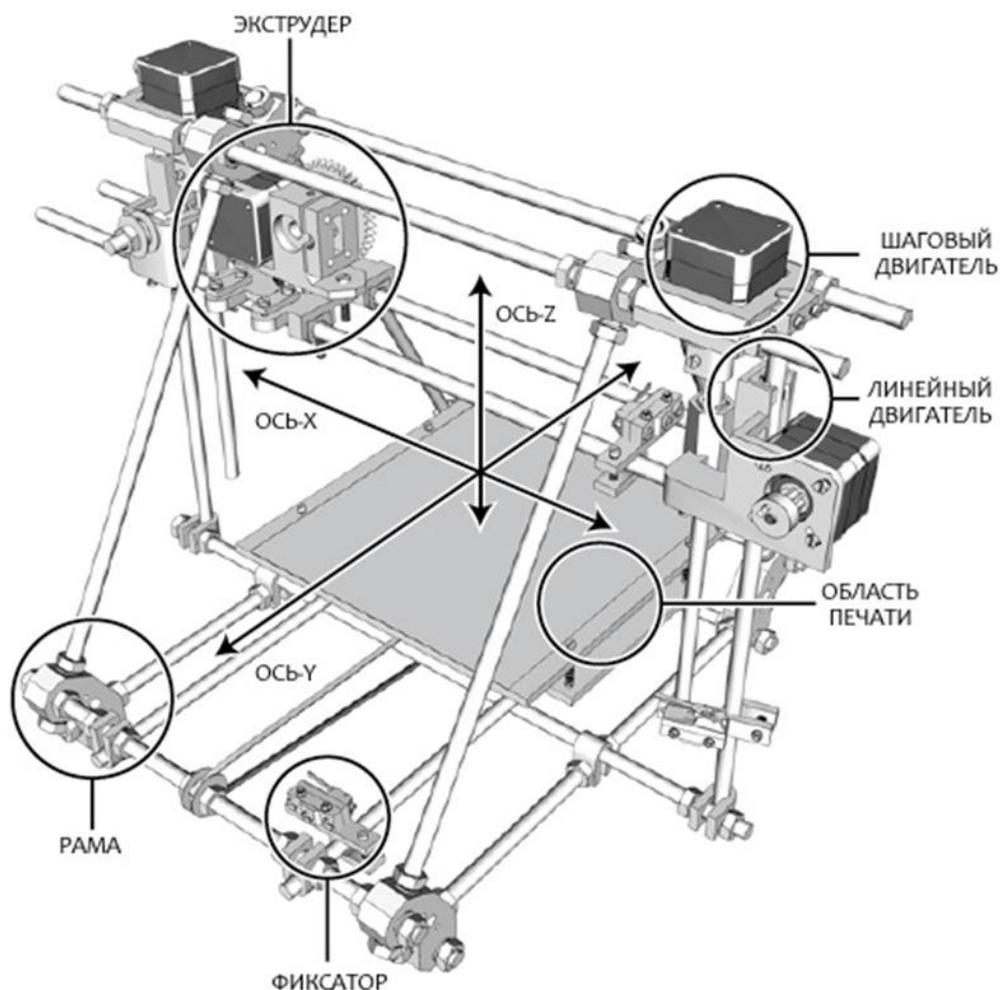


Рисунок 3 - Общий вид 3D-принтера

Экструдер выдавливает расплавленные и размягченные нити пластика (материала) слой за слоем, образуя необходимый заданный объект.

Для улучшения экструзионных качеств печати экструдер может улучшиться путем замены головки (сопла) из более качественных материалов, что может исключить частые поломки и засорение.

Экструдер состоит из привода нити пластика и термальной головки (сопла).

Привод нити пластика выталкивает саму нить с помощью редуктора. Нить пластика может иметь диаметр 1,75 или 3 мм. В любительских экструзионных принтерах чаще используется пластиковая нить диаметром 1,75 мм.

«Нить после подачи приводом в экструдер дальше переходит в термальную камеру. Головка обычно термально изолирована от остальных частей экструдера и изготавливается из куска алюминия со встроенным нагревателем или каким-то другим источником тепла. Обязательно имеется датчик температуры для контроля нагрева. Когда пластик достигает термальной головки, он уже разогрет до температуры 170-220 градусов Цельсия в зависимости от типа пластика. Уже находясь в полужидком состоянии, пластик выдавливается из печатающей головки, диаметр отверстия которой обычно находится в диапазоне от 0,35 до 0,5 мм.

Поверхность печати – это рабочая поверхность, на которой изготавливаются 3D-детали. Размер рабочей поверхности варьируется в зависимости от модели принтера, и обычно находится в диапазоне от 100 до 200 квадратных миллиметров. Практически большая часть производителей 3D-принтеров предлагает использовать подогреваемую платформу, в комплекте, либо как дополнительную опцию. Задача платформы – не допустить разрывов или трещин модели, а также обеспечить надежное сцепление между первыми слоями печатаемой детали и рабочей поверхностью.

Поверхность платформы обычно производится из стекла или алюминия для лучшего распределения тепла по рабочей платформе для обеспечения гладкой и ровной поверхности. Стекло дает более ровную поверхность, в то время как алюминий лучше распределяет тепло в случае подогреваемой платформы. Чтобы предотвратить случаи, когда печатаемая модель слетает во время процесса создания, поверхность часто покрывается какой-либо клейкой поверхностью или пленкой, и создается поверхность, которую будет недорого менять в случае необходимости. Такие материалы часто полиамидной ленты или полиэстерной кремниевой ленты, в зависимости от типа пластика.

Тип линейного двигателя (привода), который используется на конкретном 3D-принтере, во многом определяет то, насколько точно будет печатать устройство, насколько быстро, а также насколько часто и много надо

будет обслуживать 3D-принтер. Многие 3D-принтеры используют гладкие, точные стержни для каждой оси, а также пластиковые или бронзовые шариковые подшипники для движения по каждому стержню. Линейные шариковые подшипники рекомендуется использовать в связи с долговечностью и более качественной работой, однако, они более шумные, чем бронзовые, которые, однако, сложнее откалибровать на момент сборки.

Можно использовать втулки, напечатанные на 3D-принтере, как это показано на рисунке 1, но они не будут долговечны в использовании. Изготовленные стандартным способом пластиковые втулки очень хорошо и гладко работают, но имеют тенденцию к деформации после длительного объема работы. С другой стороны, качество напечатанного изделия, также зависит от качества и гладкости рельса, по которым передвигаются все механизмы.

Диапазон движения линейных приводов обычно ограничен механическим или оптическим фиксатором. Фиксаторы, это ограничители, которые подают принтеру сигнал, что он подошел к краю рабочей поверхности, чтобы предотвратить выход за рамки платформы.

Хотя наличие фиксаторов и не является обязательным в работе 3D-принтеров, наличие его позволит делать принтеру калибровку положения перед началом каждого процесса печати, что позволит сделать печать более аккуратной и точной.

Рама держит все выше описанные элементы вместе. Форма рам, а также материал, из которого она изготовлена, очень сильно влияют на точность и качество печати. Во многих 3D-принтерах используются резьбовые стержни и другие материалы в конструкции рамы. Также бывают принтеры, которые имеют корпус, созданный лазерной резкой фанерных листов. Еще один из видов корпуса принтера – деревянный, но используется намного реже.

Такая система базируется на принципе слотов, когда одна часть имеет слот для соединения с другой частью, и вместе они соединяются болтами и гайками. Такую раму обычно проще собрать, и она является более точной для

калибровки принтера, однако обычно такая конструкция более шумная, а также со временем крепежные элементы подкручиваются. В общем, резьбовые стержни делают аппарат более тихим, однако усложняют процесс сборки и калибровки» [18].

Выше даны описания основной структуры и принципа работы самых простых 3D-принтеров. Компании производители используют более сложные и современные разработки, многие из которых носят конфиденциальный характер.

2.3 Технологический процесс печати изделий на 3D принтере

Был рассмотрен краткий технологический процесс при печати изделий на 3D принтере из ABS-пластика и биоразлагаемого пластика полилактида PLA, который представлен на рисунке 4.

Краткий технологический процесс печати изделий на принтере включает в себя следующие этапы:

1. Подготовка принтера к работе:

Операция 1 - Установить нити пластика в подающее сопло

Операция 2 - Подготовить зеркальный стол, включить принтер и нагрев

2. Создание цифровой модели изделия:

Операция 3 - Создать или выбрать необходимую цифровую модель, скорректировать размеры

Операция 4 - Экспорт 3D модели в STL-формат

Операция 5 - Генерирование G-кода

3. Операция 6 - Процесс печати детали

4. Финишная обработка изделия:

Операция 7 - Завершение печати, процесс вентиляции

Операция 8 - Проверка изделия на качество, удаление поддержек

Операция 9 - Выключение и очищение принтера

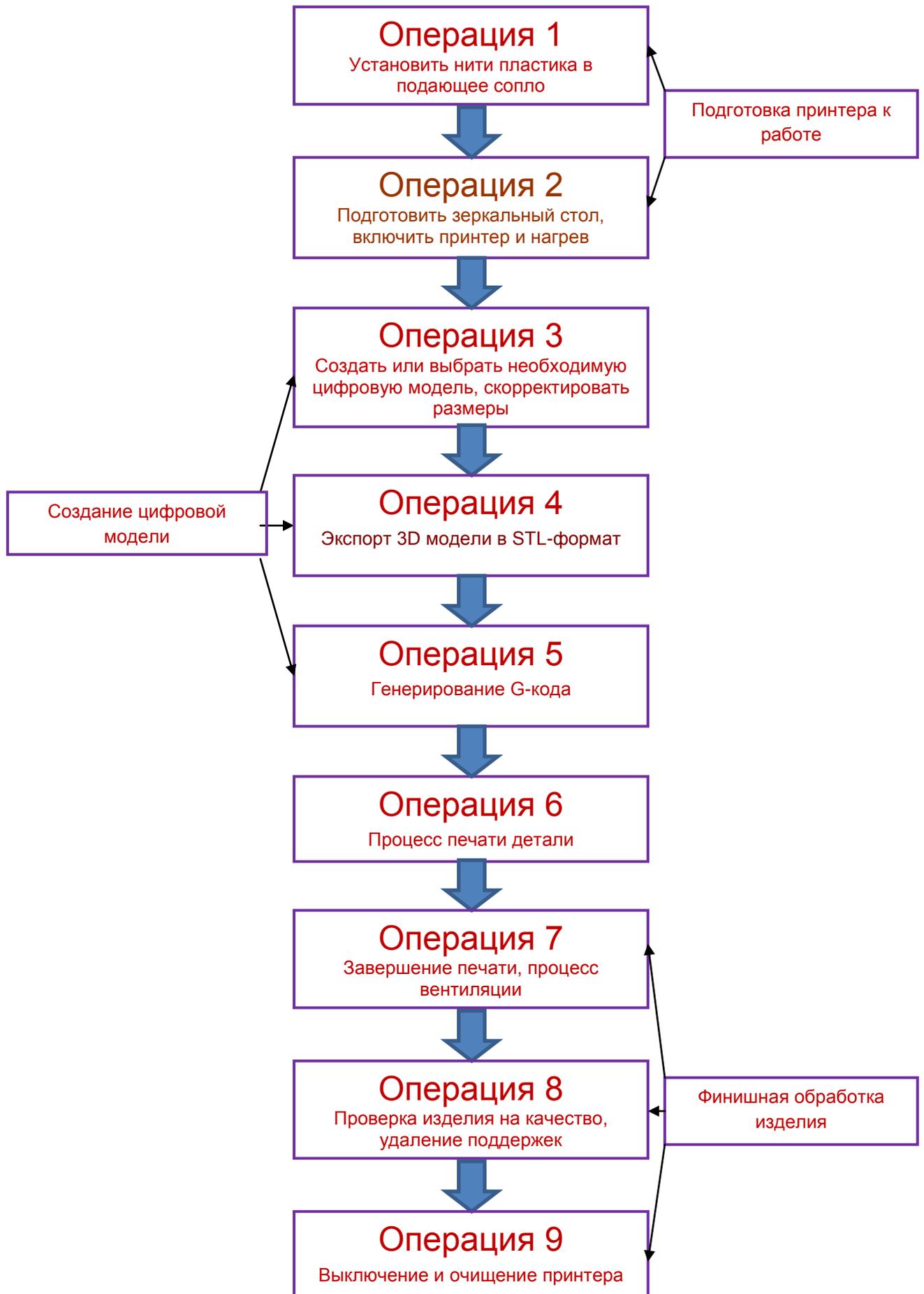


Рисунок 4 - Краткий технологический процесс печати изделий на 3D-принтере

2.3.1 Создание цифровой модели

На данном этапе была рассмотрена более подробно операция 3. Процесс 3D-печати начинается с разработки виртуального образа будущего объекта в 3D-редакторе или CAD-программе, представлено на рисунке 5 (например, в «3D Studio Max», «AutoCAD», «Компас», «SolidWorks» и др.). Простую модель может создать любой пользователь, который имеет навыки работы с персональным компьютером и стандартными пакетами прикладных программ. Для создания сложных моделей потребуется пакет профессиональных программ и услуги специалиста в области 3D-моделирования.

Также готовые виртуальные модели можно найти в Интернет, на специализированных сайтах, посвящённых 3D-печати.

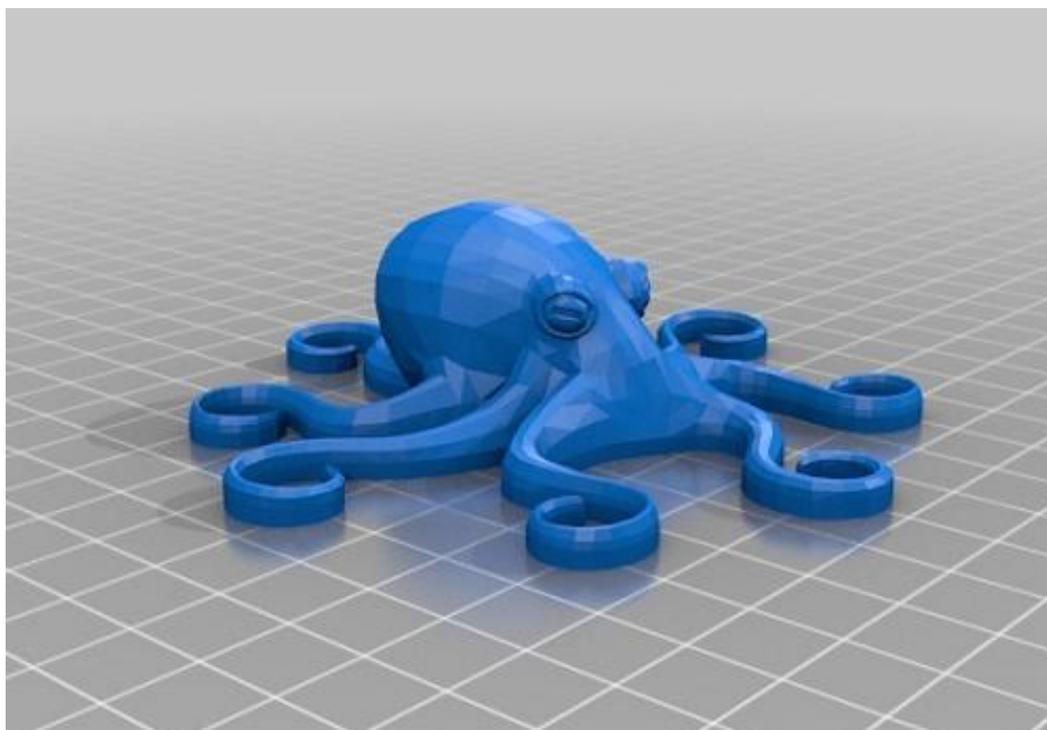


Рисунок 5 - Виртуальная модель в среде 3D-редактора

2.3.2 Экспорт 3D-модели в STL-формат

На данном этапе была рассмотрена операция 4 и что представляет собой STL-формат.

Когда моделирование окончено, следует перевести полученный файл в STL-формат, который распознаёт большинство современных 3D-принтеров. Для этого нужно выбрать в меню пункт «Сохранить как» или «Import/Export», в зависимости от используемой программы.

Перед экспортом файла следует указать степень детализации модели или степень её разбиения на треугольники. Если выбрать параметр «Точно», то разбиение получится плотным, готовый файл займёт довольно много места на жёстком диске компьютера, и будет дольше обрабатываться специальным программным обеспечением, но зато на выходе пользователь получит объект с высококачественной поверхностью. Если выбрать параметр «Грубо», то разбиение получится менее плотным или совсем неплотным, готовый файл займёт на жёстком диске меньше места и будет быстрее обрабатываться в специальной программе, но и качество внешних поверхностей будет значительно ниже, чем при точном разбиении (шероховатости, неточная детализация).

При выборе способа разбиения объекта необходимо учитывать требования к качеству его внешней поверхности, а также мощность персонального компьютера и его способность справиться с обработкой модели перед отправкой на печать.

2.3.3 Генерирование G-кода

На данном этапе рассмотрим операцию 5. STL-файл с будущим объектом обрабатывается специальной программой-слайсером (нарезка изделия на части), которая переводит его в управляющий G-код для 3D-принтера. Если модель не подвергнуть слайсингу, то 3D-принтер не

распознает её. Программа-слайсер указывает последовательность нанесения материала во время 3D-печати.

Среди наиболее популярных слайсинговых программ можно отметить Kisslacer, Skineforge, Slic3r и др. (рисунок 6).

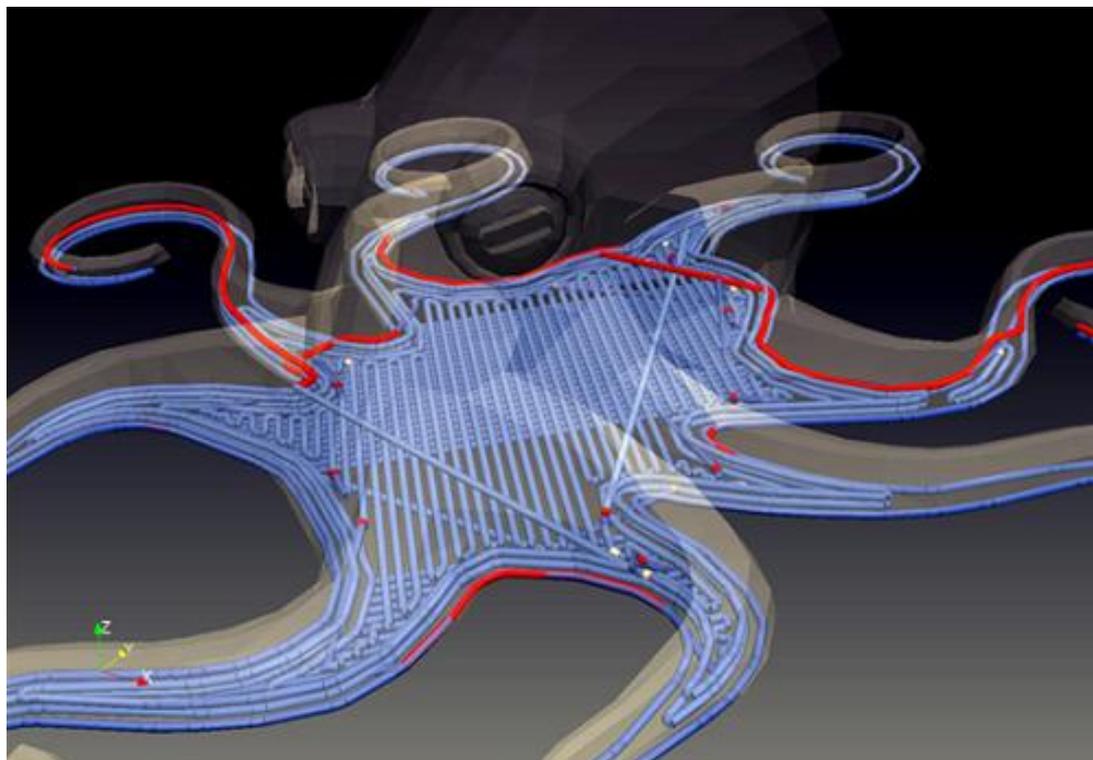


Рисунок 6 - Последовательность нанесения материала во время 3D-печати программой-слайсером

Программы-слайсеры разрезают модель на тонкие горизонтальные пластины и преобразуют в цифровой G-код, понятный трёхмерному принтеру.

Программа-слайсер как бы задаёт траекторию движения печатающей головки 3D-принтера при нанесении расходного материала.

Итак, модель подготовлена, переведена в STL-формат и сгенерирован её G-код. Теперь объект отправляется на печать.

2.3.4 Финишная обработка объекта

Более подробно технологическая операция 8 описана ниже.

Если объект имеет нависающие элементы, выступы, консоли, то 3D-принтер во время печати использует поддерживающие конструкции (они же – конструкции поддержки, структуры поддержки). Чтобы иметь представление, что представляет собой поддержка, обратимся к рисунку 7.



Рисунок 7 - Цифровая модель лошади без поддерживающих конструкций

На рисунке 7 представлена цифровая модель лошади. Печать объекта начинается снизу, с задних копыт, которые принтер напечатает первыми слоями пластика, поскольку копыта касаются поверхности рабочей платформы. Непонятна ситуация с деталями, которые висят в воздухе и не соприкасаются с рабочей платформой. Для наложения слоёв расплавленного пластика принтеру нужна какая-то основа, будь то рабочая платформа или предыдущие слои материала, поскольку он не может печатать в пустоте. Чтобы напечатать такие нависающие детали, 3D-принтер использует поддерживающие конструкции, которые показаны на рисунке 8.

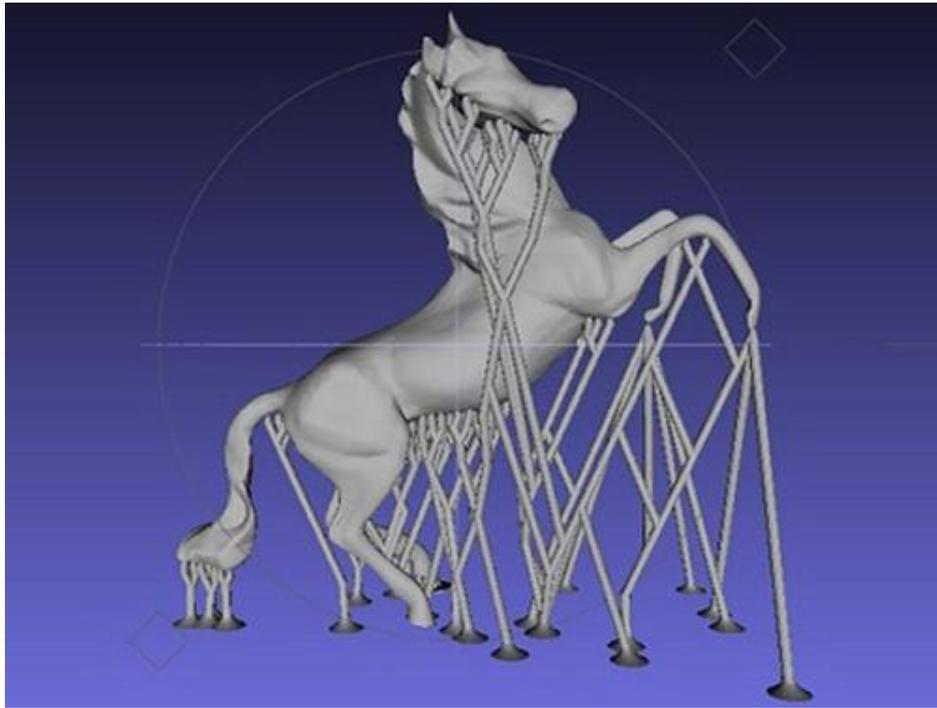


Рисунок 8 - Цифровая модель с поддерживающими конструкциями

За счёт добавленных конструкций (поддержек) детали не висят в воздухе, а опираются на рабочую платформу, что позволяет принтеру их напечатать.

После окончания печати, поддерживающие конструкции удаляются. Если поддержки напечатаны из того же материала, что и основная модель, то удалить их довольно сложно. Отрезание или отламывание таких конструкций портит и без того не идеальную поверхность объекта. Поэтому в большинстве современных принтеров используются дополнительные восковые материалы, которые легко удаляются при финишной обработке и не оставляют следов на поверхности объекта.

2.4 Риски при работе с 3D-принтером

В данном разделе описаны основные риски и поломки, связанные с печатью изделий на 3D-принтере.

При составлении диаграммы Исикавы были определены потенциальные и существующие проблемы при работе с 3D-принтером,

которые требуют разрешения. Формулировка главной проблемы размещается в прямоугольнике с правой стороны диаграммы. Ключевые категории причин, влияющие на исследование проблем это, материалы, механизмы, человек, метод и контроль [19].

От каждой ключевой категории к центральной линии проводятся соединяющие линии, которые будут являться основными ветвями диаграммы Исикавы. Причины проблем, которые были выявлены в ходе исследований при работе с принтером, распределились по существующим категориям и соединяются с основными ветвями.

На рисунке 9 представлена диаграмма Исикавы работы 3D-принтера.

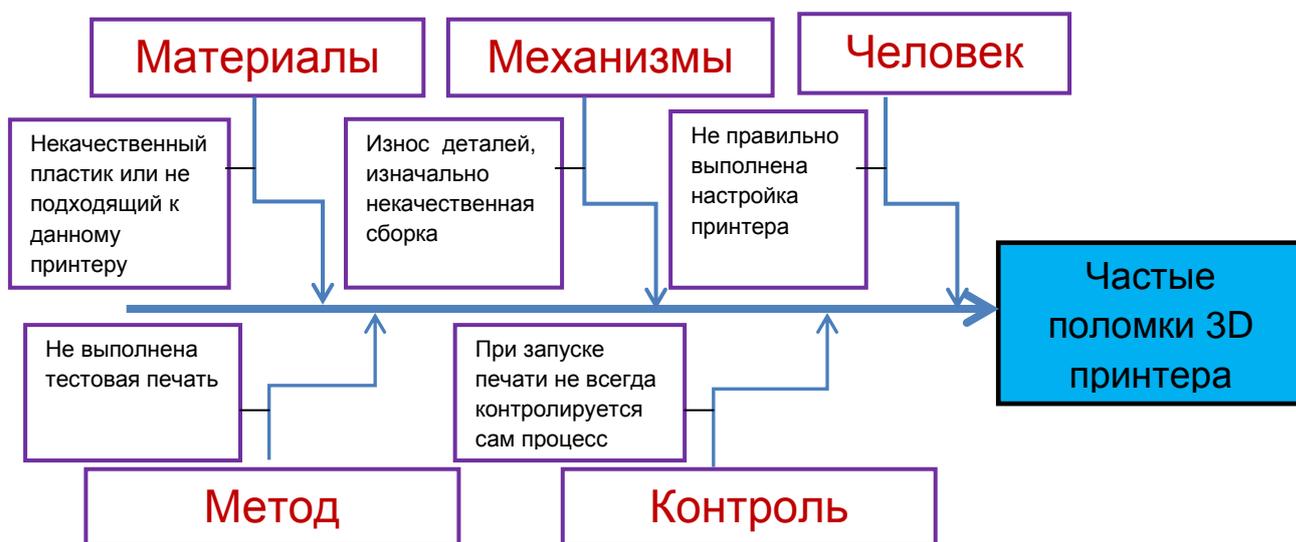


Рисунок 9 – Диаграмма Исикавы работы 3D-принтера

Далее была построена диаграмма принятия решений изготовления детали на 3D принтере, а именно технологический процесс печати изделия.

На каждом этапе технологического процесса были выявлены потенциальные проблемы (риски). Для каждого риска по технологической операции были определены предупреждающие или корректирующие действия, а именно, методы устранения проблемы или снижения риска.

В результате получилась Диаграмма принятия решений изготовления детали на 3D-принтере, совмещенная с планом работ (рисунок 10).

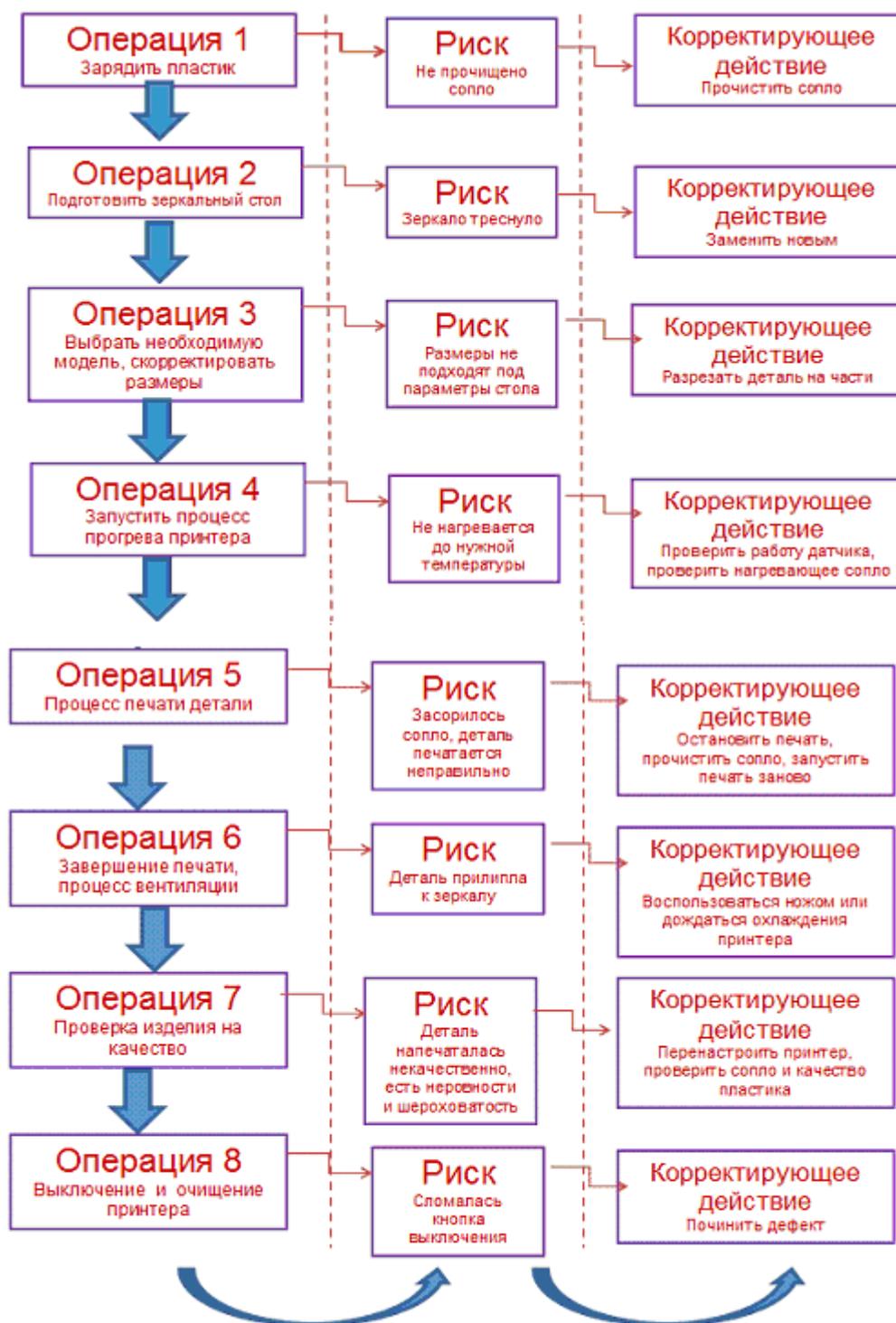


Рисунок 10 - Диаграмма принятия решений изготовления детали на 3D принтере

3 Проведение теоретических и экспериментальных исследований использования биоразлагаемого пластика полилактида

3.1 Описание организации ООО «Прототип»

В данном разделе были проведены теоретические и экспериментальные исследования, связанные с использованием биоразлагаемого пластика полилактида, а также анализ результатов исследований, формулирование выводов и рекомендаций.

Совместно с предприятием ООО «Прототип» были проведены экспериментальные исследования по некоторым параметрам, а именно, анализ по затратам электроэнергии при печати на принтере двумя видами пластика, полилактидом (PLA) и более распространенным и чаще используемым ABS-пластиком, выделение вредных веществ при печати PLA-пластиком и ABS-пластиком, исследование на прочность изделий, напечатанных на 3Д-принтере разными видами пластика, экспериментальное исследование при воздействии температур на PLA-пластик, прототипирование изделий, напечатанных на 3Д-принтере разными видами пластика, исследование и разработка методов утилизации биоразлагаемого пластика, экономическая целесообразность применения биоразлагаемого пластика.

Организация ООО «Прототип» (г.о.Тольятти, ул. Базовая, 1В) является одним из ведущих производителей прототипов на предприятия г.о.Тольятти и Самарской области для различных отраслей производства, в основном автомобильной отрасли.

ООО «Прототип» использует технологию быстрого прототипирования в литье металлов при изготовлении оснастки и выплавляемых моделей.

Третье направление организации, это мелкосерийное производство изделий из пластмассы, силикона, полиуретана.

Все технологии прототипирования используются на оборудовании собственного производства, а именно 3D-принтерах различных характеристик, параметров и размеров. Используемые современные методы прототипирования изготовления оснастки позволяют снизить затраты на любых этапах производства от единичного до крупносерийного.

А также огромный интерес вызвал поступившие в продажу комплекты PLA-пластика для 3D-ручек из 10 цветов, который является абсолютно безопасным для использования при контакте с кожей, не выделяет запахов.

3.2 Результат экспериментального исследования – расход электроэнергии при печати разными видами пластика

Совместно с ООО «Прототип» было проведено исследование при печати одинаковых изделий при помощи PLA-пластика и ABS-пластика на 3D-принтере. Ниже описывается этот процесс.

За основу была взята ранее нарисованная разработанная 3D-модель вазы (рисунок 11).

На первом этапе будет исследована печать данного изделия при помощи ABS-пластика, на втором этапе запустим на печать изделие с точно такими же заданными параметрами, но при помощи PLA-пластика.

Было определены и выбраны следующие параметры печати:

Высота изделия – 200 мм, диаметр изделия – 90 мм, толщина слоя печати – 0,2 мм, толщина стенки вазы – 0,8 мм (4 слоя), вес изделия по заданным параметрам должен составить – 50 г в программе (Kisslicer PRO v.1.5 Beta 3.10 Win64), расчетное время печати в программе (Kisslicer PRO v.1.5 Beta 3.10 Win64) – 12 часов, скорость печати – 90 мм/с, скорость перемещения – 120 мм/с, заполняемость изделия пластиком – 100%, поддержка – не требуется.

Выбранный цвет пластика – синий для акрилонитрилбутадиенстирола, светло-зеленый для полилактида.

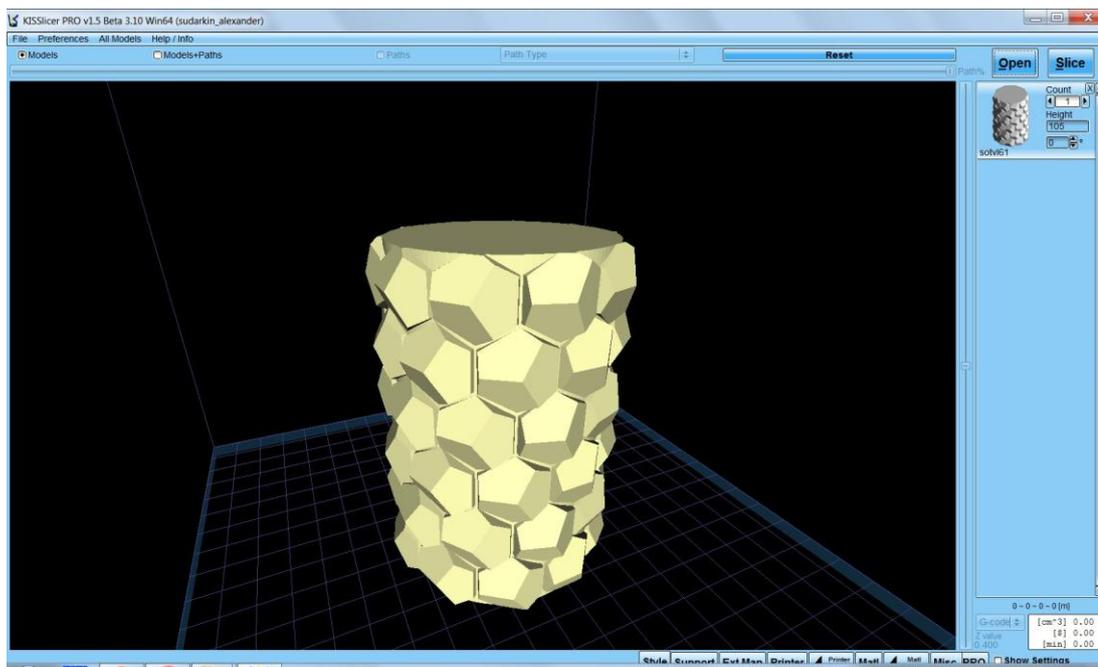


Рисунок 11 - 3D-модель вазы

Печать изделия проводилась согласно технологическому процессу, описанному ранее в разделе 2 с использованием ABS-пластика. Следует учесть, что при использовании данного пластика стол печати обязательно должен нагреться до заданной температуры, необходимой для печати изделия именно этим видом пластика, а именно до температуры 100-110° С, температура печатающей головки (сопла) 230-250° С.

Обратим внимание на очень важный параметр, это то, что стол при печати ABS-пластиком должен быть обязательно горячим, заранее на стол наносится специальный клей для прилипания первого слоя и самого изделия. Данный пластик характеризуется наличием усадки (сжатие предметов, напечатанных на 3D-принтере), при охлаждении изделия (примерно на 6-10%) и при остывании столика. ABS-пластиком не представится возможность напечатать изделие при использовании холодного стола. К холодному столу первый слой изделия не прилипнет даже при использовании специального клея, само изделие начнет двигаться, испортится, следовательно, печать придется остановить.

Отмечаем время начало печати: 18.00 час. По указанному расчетному времени 12 часов, печать изделия будет окончена в 6.00 час.

Для удобства подсчета потраченной электроэнергии за 12 часов, используем специальный встроенный в розетку счетчик (ваттметр Dadget измеритель мощности «Энергомер», рисунок 12), который включается непосредственно в розетку, куда подключен принтер. Примерная стоимость такого счетчика – 1450 руб.



Рисунок 12 - Ваттметр Dadget измеритель мощности «Энергомер»

Перед запуском печати ранее было подсчитано, сколько потребляет электроэнергии 3-D принтер. С помощью амперметра были получены следующие данные:

1. При режиме простоя принтера (включен, но бездействует) - 0,01 А, при напряжении 220 В, мощность равна 2,2 Вт.

Мощность была рассчитана по формуле:

$$P=I*U, \quad (1)$$

где P – мощность, Вт;

I – ток, А;

U – напряжение, В.

$$P=0,01 \text{ А} * 220 \text{ В}=2,2 \text{ Вт.}$$

2. При работе двигателя - 0,05 А, мощность равна 11 Вт

3. При подогреве столика для печати - 0,7 А, мощность равна 154 Вт

4. При работающем экструдере - 0,15 А, мощность равна 33 Вт

Сложим полученные результаты: $2,2+11+154+33=200,2$ Вт. (примерный результат, с условием загрузки по максимуму).

Следует также учитывать, что столик для печати, экструдер греется непостоянно.

При повторном измерении в режиме неполной загрузки, получили следующие данные:

$$2+11+100+35=148 \text{ Вт.}$$

148 Вт - мощность работы 3-D принтера за 1 час работы.

У нас расчетное время печати в программе – 12 часов, следовательно, умножаем 148 Вт на 12 часов, получается 1776 Вт, а если при полной максимальной загрузке, то 2402,4 Вт.

Выше описанные подсчеты – это теоретические расчетные данные.

Вернемся к практическим экспериментальным данным.

Изделие напечаталось с погрешностью в 30 минут, а именно в 5 час. 30 минут печать остановилась, что составляет время печати не 12 часов, а 11 часов 30 минут.

Показания на измерителе мощности Ваттметре Dadget «Энергомер» составили: 1892 Вт.

Напечатанное изделие 1 (ваза) из ABS-пластика представлена на рисунке 13.

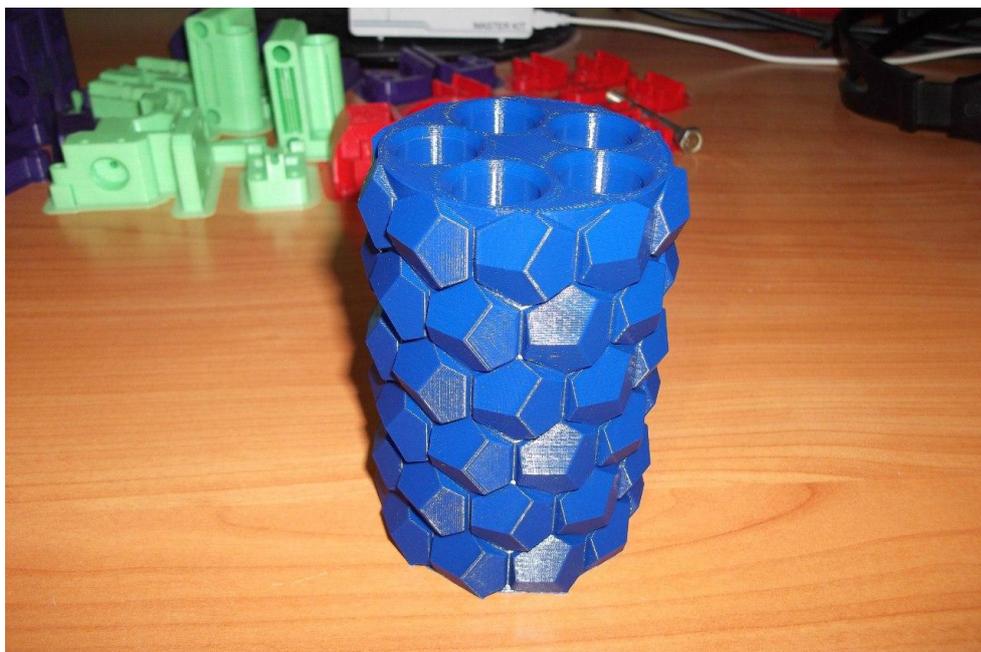


Рисунок 13 – Напечатанное изделие 1 (ваза) из ABS-пластика

На втором этапе исследования напечатаем изделие при помощи PLA-пластика с сохранением полностью всех приведенных выше параметров и характеристик печати.

Отличительным моментом будет только выбранный цвет пластика полилактида – светло-зеленый.

Запускаем печать также согласно технологическому процессу, описанному ранее в разделе 2 с использованием PLA-пластика.

Следует отметить, что второй вариант пластика - полилактид имеет свойство отсутствия усадки, а это значит, что напечатанное изделие полностью сохранит заданные ранее параметры и не произойдет сокращения в объеме.

Нагревания стола не требуется, что сохранит затраты электроэнергии, которые будут подсчитаны ниже. Требуется нагрева только печатающая головка (сопло) до 200-210° С.

Перед запуском печати требуется использовать специальный клей согласно технологическому процессу для лучшего прилипания первого слоя изделия к холодному столу при печати.

Отмечаем также время начало печати: 18.00 час. По указанному расчетному времени 12 часов, печать изделия будет окончена в 6.00 час.

Для удобства подсчета потраченной электроэнергии за 12 часов при практических экспериментальных данных также используем ваттметр Dadget измеритель мощности «Энергомер», который подключается в розетку принтера.

Перед запуском печати также как и на первом этапе было теоретически подсчитано, сколько потребляет электроэнергии 3-D принтер при использовании другого вида пластика – полилактида. С помощью амперметра были получены следующие данные:

1. При режиме простоя принтера (включен, но бездействует) - 0,01 А, при напряжении 220 В, мощность равна 2,2 Вт.
2. При работе двигателя - 0,05 А, мощность равна 11 Вт
3. При подогреве столика для печати - 0 Вт (подогрев столика не требуется).
4. При работающем экструдере - 0,14 А, мощность равна 30,8 Вт

Сложим полученные результаты: $2,2+11+0+30,8=44$ Вт (примерный результат, с условием загрузки по максимуму).

При повторном измерении в режиме неполной загрузки, получили следующие данные:

$$2,2+11+0+30=43,2 \text{ Вт.}$$

43,2 Вт - мощность 3-D принтера за 1 час работы.

У нас расчетное время печати в программе – 12 часов, следовательно, умножаем 43,2 Вт на 12 часов, получается 518,4 Вт, а если при полной максимальной загрузке, то 528 Вт.

Практические экспериментальные данные при печати PLA-пластиком описаны ниже.

Изделие 2 напечаталось с погрешностью в 14 минут, а именно в 5 час. 46 минут, указанному времени на часах, что составляет время печати не 12 часов, а 11 часов 46 минут.

Показания на измерителе мощности Ваттметре Dadget «Энергомер» составили: 546 Вт.

Напечатанное изделие 2 (ваза) из PLA-пластика представлена на рисунке 14.

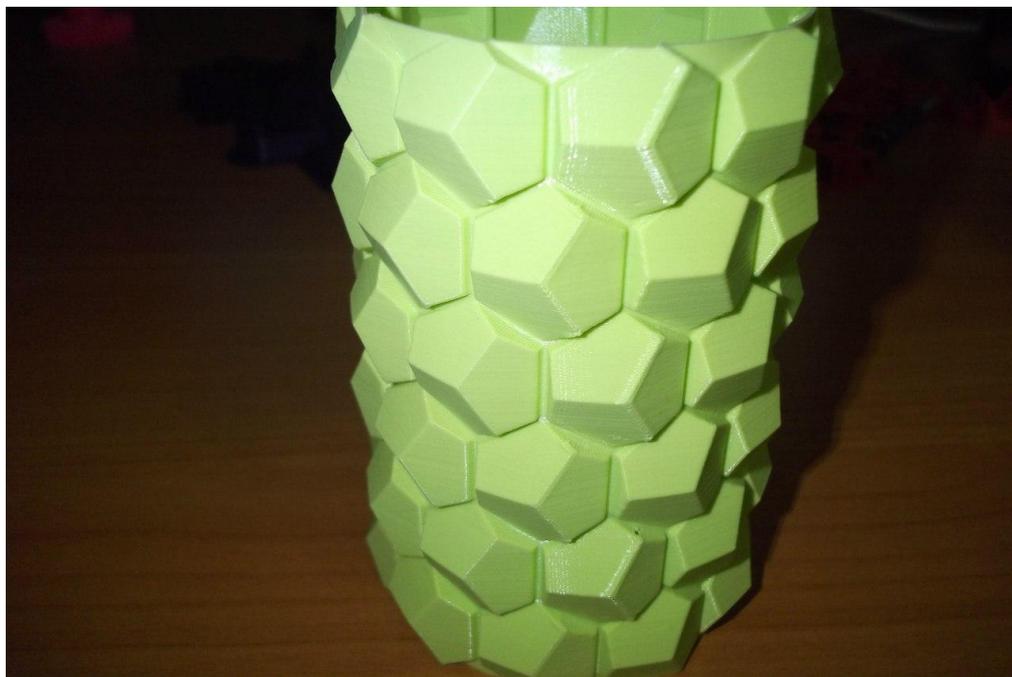


Рисунок 14 – Напечатанное изделие 2 (ваза) из PLA-пластика

Теоретические подсчитанные данные и экспериментальные при печати разными видами пластика занесем в таблицу 3

Таблица 3 - Сравнительная таблица затрат электроэнергии при печати разными видами пластика

Вид пластика	Теоретические данные		Практические экспериментальные данные
	При полной загрузке принтера	При неполной загрузке принтера	
ABS	2402,4 Вт	1776 Вт	1892 Вт
PLA	528 Вт	518,4 Вт	546 Вт

Выводы: печать изделий на принтере с использованием биоразлагаемого пластика полилактида значительно экономит затраты на электроэнергию, так как одно важное свойство пластика, это отсутствие усадки, что не требует подогрева столика печати.

3.3 Исследование на наличие выделяемых вредных веществ при печати разными видами пластика

В данном разделе было исследовано наличие вредных веществ при печати изделия разными видами пластика, а именно ABS-пластиком и PLA-пластиком.

Многие источники утверждают, что полилактид не выделяет вредных веществ, совсем не токсичен, процесс печати может проводиться в любых помещениях, даже в не проветриваемых или слабопроветриваемых. ABS-пластик, наоборот, требует обязательного проветривания помещения, так как при нагревании пластика при печати выделяются пары акрилонитрила – ядовитого соединения, способного вызвать раздражение слизистых оболочек, а также отравление [20].

А также при 3D-печати изделий ABS-пластиком многие замечали довольно неприятный запах, вдыхание паров которого возможно опасно и вредно для здоровья. При печати PLA не чувствуется неприятного запаха, чаще всего чувствуется сладковатый карамельный запах.

Многие компании по производству различных видов пластика уделяют огромное внимание безопасности материалов и исследуют наличие выделяемых веществ при 3D-печати.

Ознакомимся с одним из исследований. Известно, что при печати выделяются микрочастицы, которые выделяются из принтера во время экструзии (выдавливании пластика из нагретого сопла). Микрочастицы, как правило, медленно оседающие твердые взвешенные частицы, находящиеся в

воздухе. Размеры их совсем невелики, от десятков до долей микрон [21].

Были проведены тесты при печати разными видами пластика при помощи анализатора аэрозоля Kanomax, модель 3521, который представлен на рисунке 15.



Рисунок 15 – Анализатор аэрозоля Kanomax, модель 3521

В следующих нормативных документах отображены допустимые содержания пыли:

- Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 22.12.2017 N 165 "Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.1.6.3492-17 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений" (вместе с «ГН 2.1.6.3492-17. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений»)
(Зарегистрировано в Минюсте России 09.01.2018 N 49557).

- Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ (ред. от 31.12.2017) "Об охране окружающей среды".

Данные нормативные документы устанавливают предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющего вещества в атмосферном воздухе [22], [23].

Первый вариант теста включал в себя следующее: запускалась печать изделия первым видом пластика, разогретый экструдер выдавливал пластик, рядом с принтером брались пробы воздуха. Анализатор аэрозоля Kanomax определял концентрацию микрочастиц. Напомним, что печать ABS-пластиком должна быть при температуре не ниже 230 градусов, а PLA-пластиком не ниже 200 градусов. Результаты тестов во время экструзии пластиков PLA и ABS приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Результаты тестов во время экструзии пластиков PLA и ABS

Вид пластика	Запыленность, мг/м ³
PLA	0,07
ABS	0,05
Норматив ПДК	0,50

Норматив запыленности для офисного помещения составляет 0,50 мг/м³ согласно ГН 2.1.6.3492-17. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений» [23]. Данным образом было выяснено, что запыленность микрочастицами при печати на 3D-принтере представленными видами пластика абсолютно безопасна и безвредная для здоровья.

Еще один важный фактор связан с наночастицами. Наночастицы – такие частицы, диаметром меньше 1 микрона, которые проникают в альвеолы легких и эпидермис. В данном случае, риск, связанный с наночастицами, для ABS-пластика может быть до 30 раз выше, чем при использовании PLA-пластика. А также было выяснено, что только по

прошествию 10-30 минут воздух рабочей зоны после печати на принтере возвращается к обычному уровню.

Ниже описан второй вариант теста, который включал в себя исследование на химические вещества, выделяемые при печати разными видами пластика. Очень важно знать, насколько тот или иной материал отвечает экологическим требованиям. В особенности, это очень важно для тех, кто постоянно занимается печатью изделий в большом количестве.

Необходимая нормативно-правовая база:

- ГОСТ Р ИСО 16000-1-2007. Национальный стандарт Российской Федерации. Воздух замкнутых помещений. Часть 1. Отбор проб. Общие положения.

Исследование проводилось с помощью следующих приборов:

- Газовый хроматограф ФГХ-1;
- Спектрофотометр РV 1251С;
- Аспиратор ПУ-4Э;
- Пробоотборный компрессор ПК-1.

Сначала были измерены фоновые показатели воздуха в офисе, непосредственно рядом с рабочим местом, где находится 3D-принтер. Далее запускался процесс печати (экструзии). Условия окружающей среды в офисе: температура 22°C, влажность воздуха 44%, атмосферное давление 752 мм рт. ст.

Пробы воздуха забираются приборами Аспиратор ПУ-4Э и Пробоотборным компрессором ПК-1. Первый прибор с помощью колб с дистиллированной водой пропускает через них воздух рабочей зоны. На каждый вид выброса предусматривается отдельная колба с водой. Сначала используется колба для первого вида пластика, потом используется колба для второго вида пластика.

В рабочей зоне принтера отбираются пробы при использовании второго прибора Пробоотборного компрессора ПК-1. Пробы возможно

отобрать только при использовании специально обработанного и запечатанного полиэтиленового пакета.

При смене колб замеров окружающей среды были исследованы материалы (пластики) при экструзии при 3D-печати.

Выбранные температурные режимы для разных видов материалов:

- ABS: 235°C

- PLA: 210°C

При запуске печати изделия температура окружающей среды нагрелась на 3 градуса, а влажность наоборот снизилась на 5%, следовательно, стало 25°C, влажность воздуха 39%,

Проведенные исследования показали следующие результаты (фоновые значения и предельно-допустимые концентрации) [24]:

- фенол: $<0,2 \text{ мг/м}^3$, при ПДК $1,00 \text{ мг/м}^3$;
- формальдегид: $<0,2 \text{ мг/м}^3$, при ПДК $0,50 \text{ мг/м}^3$;
- метанол: $<0,1 \text{ мг/м}^3$, при ПДК $15,00 \text{ мг/м}^3$;
- уксусная кислота: $<3 \text{ мг/м}^3$, при ПДК 5 мг/м^3 ;
- стирол: $<0,1 \text{ мг/м}^3$, при ПДК $30,00 \text{ мг/м}^3$;
- хлористый винил: $<0,06 \text{ мг/м}^3$, при ПДК $5,00 \text{ мг/м}^3$;
- ацетон: $<1,940 \pm 0,450 \text{ мг/м}^3$, при ПДК $800,00 \text{ мг/м}^3$;
- ацетальдегид: $<0,5 \text{ мг/м}^3$, при ПДК $5,00 \text{ мг/м}^3$.

Результаты анализа пробы воздуха №1 при печати PLA-пластиком занесены в таблицу 5, пробы воздуха №2 при печати ABS-пластиком занесены в таблицу 6.

Таблица 5 - Анализы пробы воздуха №1 при печати PLA-пластиком

Определяемые компоненты	Результаты, мг/м ³	Фоновые значения, мг/м ³	ПДК, мг/м ³
Метанол	<0,1	<0,1	15,0
Уксусная кислота	<3	<3	5,0
Ацетон	1,290±0,420	<1,940±0,450	800.000

Таблица 6 - Анализы пробы воздуха №2 при печати ABS-пластиком

Определяемые компоненты	Результаты, мг/м ³	Фоновые значения, мг/м ³	ПДК, мг/м ³
Фенол	<0,2	<0,2	1,0
Ацетальдегид	<0,5	<0,5	5,0
Хлористый винил	0,202±0,052	<0,06	5,0
Стирол	<0,1	<0,1	30,00

Сформированные выводы по вышеприведенным таблицам: при печати PLA-пластиком основным продуктом распада является ацетон, но его выделение при экструзии согласно результатам исследования находится в пределах погрешности, а общее его содержание в воздухе помещения офиса в ходе исследования находится в 7,5 раз ниже, чем ПДК.

Основное выделение в воздух при печати ABS-пластиком это хлористый винил. По результатам исследования его фоновые показатели превышаются в 3,4 раза. Данное превышение в 24,8 раза меньше, чем предельно-допустимая концентрация.

Можно сформулировать вывод, что печать данными видами пластика безопасна и безвредна согласно Постановлению Главного государственного санитарного врача РФ от 22.12.2017 N 165 "Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.1.6.3492-17 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений" (вместе с «ГН 2.1.6.3492-17. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений»). В качестве рекомендаций - проветривать используемое помещение.

3.4 Исследование на прочность изделий, напечатанных на 3Д-принтере разными видами пластика

Перед печатью изделия на 3Д-принтере, всегда ставится вопрос, какой пластик выбрать для печати, какой лучше, качественнее, прочнее и долговечнее, чьи технические характеристики превосходят.

В данном разделе приведены результаты исследований на испытание пластиков PLA и ABS, а именно, на растяжение, изгиб и сжатие.

Испытания проводились на современном оборудовании грамотными сотрудниками [25]. Материалы пластиков испытывались на универсальной испытательной машине с электромеханическим приводом Tinius Olsen 300ST (рисунок 16), которая гарантирует точные физико-механические испытания [26].



Рисунок 16 - Tinius Olsen 300ST

3.4.1 Испытание пластиков на изгиб

Для испытаний были подготовлены образцы изделий из пластиков, толщина изделий – 3 мм, ширина – 15 мм, длина 60 мм. Результаты испытаний приведены в таблице 7 образцы испытаний на рисунках 17 и 18.

Таблица 7- Результаты испытаний пластиков PLA и ABS на изгиб

Материал	Прочность, МПа	Модуль упругости, ГПа	Максимальная нагрузка, Н
PLA	94,0	3,02	154
ABS	65,2	2,12	103



Рисунок 17 – Образцы пластика ABS

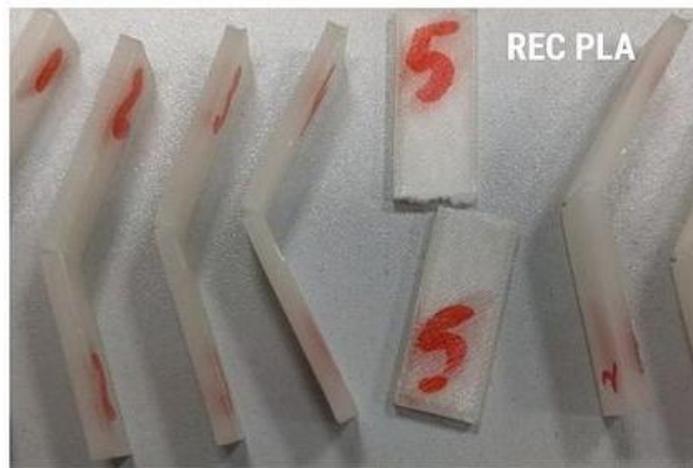


Рисунок 18 – Образцы пластика PLA

Вывод: самым прочным при изгибе в ходе испытаний оказался пластик PLA при максимальной нагрузке 154 Н.

3.4.2 Испытание пластиков на растяжение

Для испытаний были подготовлены образцы изделий из пластиков, толщина изделий – 3 мм, ширина – 15 мм, длина 160 мм.

Результаты испытаний приведены в таблице 8 образцы испытаний на рисунках 19 и 20.

Таблица 8- Результаты испытаний пластиков PLA и ABS на растяжение

Материал	Прочность, МПа	Модуль упругости, ГПа	Максимальная нагрузка, Н
PLA	34,9	1,34	1417
ABS	29,7	1,25	783

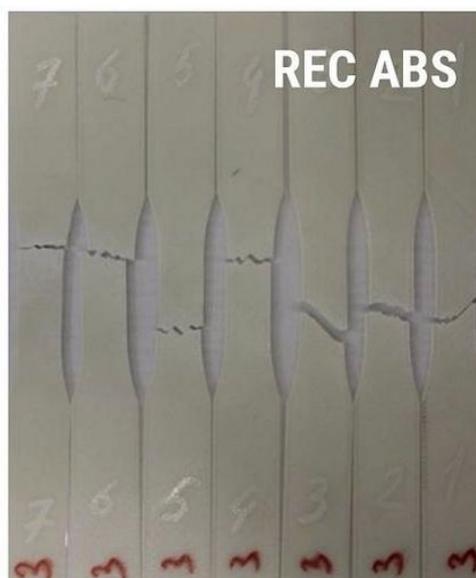


Рисунок 19 – Образцы пластика ABS



Рисунок 20 – Образцы пластика PLA

Вывод: более прочным при растяжении в ходе испытаний оказался пластик PLA.

3.4.3 Испытание пластиков на сжатие

Для испытаний необходимо было подготовить образцы пластиков в виде цилиндра, диаметром – 13 мм, высотой – 26 мм.

Результаты испытаний приведены в таблице 9 образцы испытаний пластиков на рисунках 21 и 22.

Таблица 9- Результаты испытаний пластиков PLA и ABS на сжатие

Материал	Прочность, МПа	Модуль упругости, ГПа	Максимальная нагрузка, Н
PLA	77,5	2,95	9721
ABS	49,5	1,70	5996

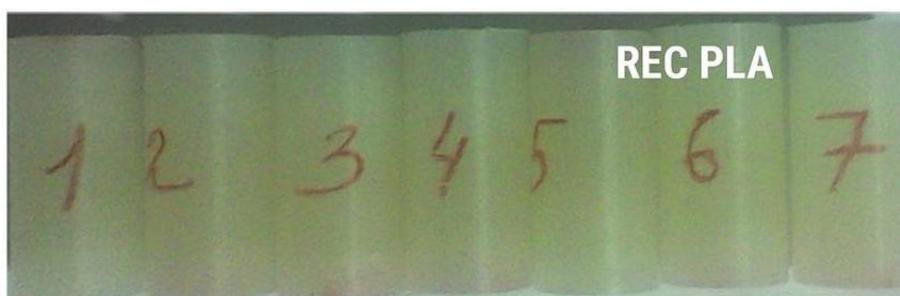


Рисунок 21 – Образцы пластика PLA



Рисунок 22 – Образцы пластика ABS

Вывод: самым прочным при испытании на сжатие оказался пластик PLA, образец совсем не деформировался.

Сформируем общие выводы:

1. самым прочным при изгибе в ходе испытаний оказался пластик PLA при максимальной нагрузке 154 Н, хоть образец в ходе испытания переломился.
2. Более прочным по сравнению с ABS-пластиком при растяжении в ходе испытаний оказался пластик PLA (оба образца надломились)
3. Самым прочным при испытании на сжатие оказался пластик PLA, образец совсем не деформировался.

3.5 Экспериментальное исследование при воздействии температур на PLA-пластик

При печати изделий на 3Д-принтере пластиком PLA многие сталкивались с его коротким сроком службы, небольшой долговечностью (в сравнении с долговечным ABS), потерей своих первоначальных качеств,

следовательно, он больше подходит для печати изделий с ограниченным сроком эксплуатации. Необходимо проверить, действительно ли это так.

На 3Д-принтере было напечатано изделие подстаканник для коляски из материала полилактида (рисунок 23). Размеры изделия: высота 70 мм, диаметр нижний 65 мм, верхний 95 мм, толщина стенки 3 мм. Изделие получилось качественное и на первый взгляд прочное.



Рисунок 23 – Подстаканник для коляски

Изделие выдерживало полную бутылку воды, зонт, пакет с продуктами около крепления. Средняя температура окружающей среды при ежедневной эксплуатации подстаканника от 20 до 32 градусов тепла, несколько часов день в разную погоду на открытом воздухе. Изделие оставалось прочным и не деформировалось. Далее подстаканник был оставлен в пустом багажнике автомобиля на 2 дня. Изделие полностью деформировалось, одна из перемычек отвалилась от небольшого нажатия. Вид деформированного изделия представлен на рисунке 24. Произошло воздействие температур,

превышающих норму для эксплуатации PLA-пластика. Напомним, что температура плавления для полилактида всего 170-180°C, температура размягчения всего 50°C.



Рис. 24 – Вид деформированного изделия

Основные выводы: напечатанные изделия из полилактида не предназначены для эксплуатации при высоких температурах (от 50°C), в ином случае они деформируются и размягчаются.

3.6 Прототипирование изделий, напечатанных на 3Д-принтере разными видами пластика

Одним из важнейших направлений печати изделий на 3Д-принтере, является прототипирование. Это создание абсолютно точных копий изделий, в том числе уменьшенных или увеличенных. Изначально технологию трехмерной печати планировалось использовать в промышленности, это позволяло наглядно и удобно работать с моделями, менять или улучшать их конструкцию и дизайн. Перед запуском какой-либо модели в серийное производство создавался прототип необходимой модели, корпуса, опытных

образцом изделий, тестировался, корректировался, только уже потом отлаживалась настройка новых устройств перед серийным выпуском, что достаточно экономило затраты предприятию [27].

В данном разделе было выяснено, какой именно вид пластика больше подходит для прототипирования изделий, в том числе для больших и очень больших размеров.

PLA-пластик, как было выяснено ранее, довольно мягкий материал, не терпит температур выше 50 градусов, но при этом обладает низкой степенью усадки, что критически важно при печати изделий больших размеров. Предел прочности на разрыв 34,9-40 МПа, что является самым низким показателем на существующем рынке пластиков для 3Д-печати.

ABS-пластик является самым распространенным материалом для печати, преимуществами которого является высокая температура стеклования, благодаря которой предметы не деформируются при небольшом нагреве. А также данный вид пластика быстро застывает, эластичен, прочен на изгиб. Минусами является то, что имеет высокую степень усадки, а именно, при охлаждении модели теряют до 8% объема, что может привести к нежелательным деформациям, возможность печати прототипов больших размеров не представится возможным, придется неоднократно корректировать размеры согласно степени усадки, перепечатывать необходимое изделие. Предел прочности на разрыв 29,7-36 МПа.

Совместно с предприятием ООО «Прототип» была проведена тестовая печать прототипов изделий разными видами пластика PLA и ABS.

Выбранная модель имела большие размеры, длина – 200 мм, ширина – 200 мм, глубина – 250 мм.

На рисунке 25 видно, что образец, который печатался пластиком ABS потрескался и деформировался при остывании, а также пришлось учесть погрешность при усадке в 8%. Образец слева из пластика PLA имеет хорошее качество и не потрескался.

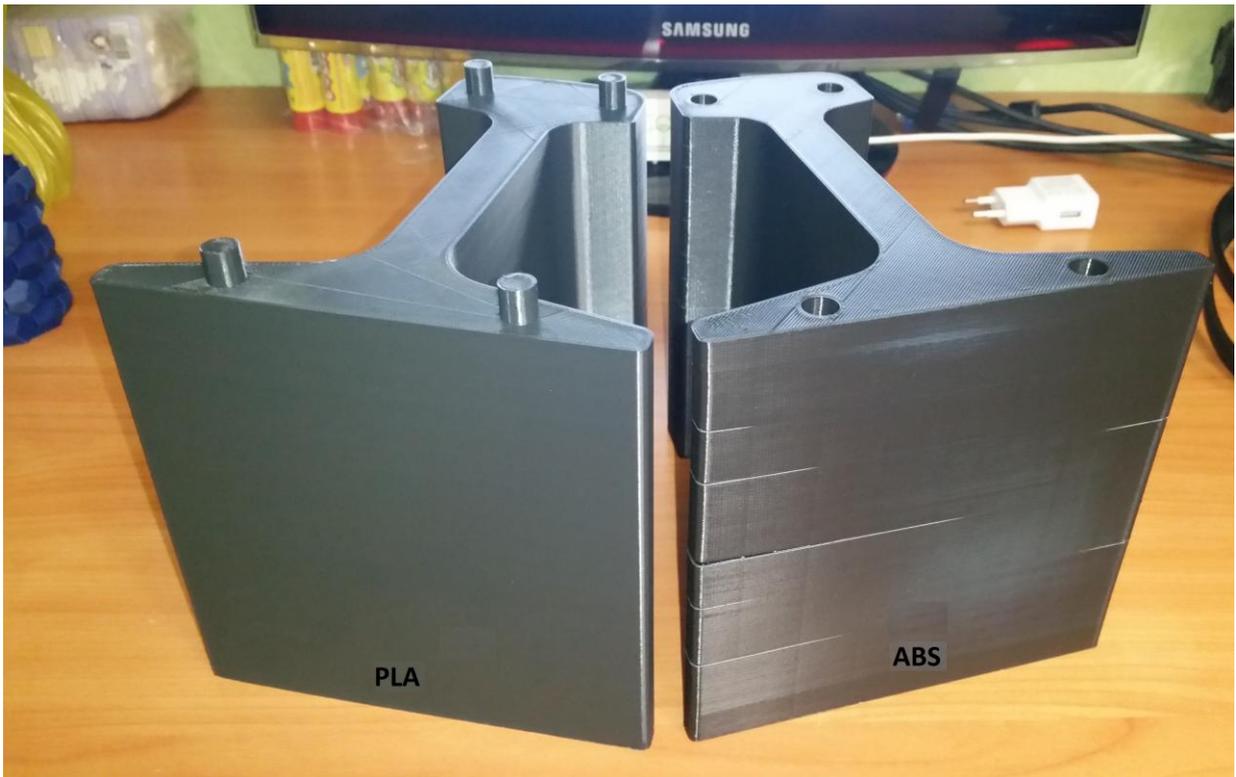


Рисунок 25 – Прототипирование больших изделий разными видами пластика

Можно сделать вывод, что ABS-пластик не пригоден для печати больших прототипов. Эта проблема решается путем поддетальной печатью объекта, с дальнейшим соединением деталей с помощью специального клея или ацетона методом «холодной сварки».

На рисунке 26 представлен образец склеенной детали корпуса воздушного фильтра для новых моделей автомобиля LADA, который печатался с помощью ABS-пластика. Данная деталь печаталась из 6 частей, далее склеивалась путем «холодной сварки» ацетоном, чтобы не произошла деформация и потрескивание деталей при остывании.



Рисунок 26 – Корпус воздушного фильтра

Учитывая вышесказанное, ABS-пластик является надежным для печати прототипов в том случае, если деталь не имеет больших размеров, а именно более 100-120 мм по трем измерениям.

Сформулируем выводы:

1. PLA-пластик больше подходит для печати больших прототипов изделий, макетов, образцов и т.д. Имея принтер больших размеров, можно напечатать изделие соответствующих больших размеров, деталь будет иметь более качественный и завершенный вид, а также более четкую детализацию.

2. PLA-пластик больше подходит для образцов, прототипов, которые не требуют длительной эксплуатации, предметы декоративного назначения с большей детализацией, выполняющие презентационную роль или роль прототипа для наладки производственных процессов.

3. ABS-пластик не пригоден для печати изделий больших размеров. Данная проблема решается путем поддетальной печати объекта, с дальнейшим склеиванием частей путем «холодной сварки».

4. ABS-пластик предназначен для изделий, предполагающих длительную эксплуатацию.

3.7 Исследование и разработка методов утилизации биоразлагаемого пластика

Согласно нормативным документам:

- Федеральный закон от 24.06.1998 N 89-ФЗ (ред. от 31.12.2017) "Об отходах производства и потребления"(с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2018),
- Приказ Минприроды России от 04.12.2014 N 536 "Об утверждении Критериев отнесения отходов к I – V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду" (Зарегистрировано в Минюсте России 29.12.2015 N 40330),
- Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 N 242 (ред. от 28.11.2017) "Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов" (Зарегистрировано в Минюсте России 08.06.2017 N 47008)

было выяснено, что АВС-пластики относятся к 3-4 классу опасности, отходы полимерные к 4 классу опасности [28], [29], [30], биоразлагаемый полимер полилактид не был классифицирован (таблица 10)

Таблица 10 - Классификация отходов согласно классу опасности

Код федеральный	Код региональный	Наименование отходов	Класс опасности
571013	05817	АВС-пластики	3-4
571174	05836	Отходы полимерные	4
-	-	Биоразлагаемые полимеры (полилактид)	Не классифицирован

Традиционные пластики изготавливаются из невозобновляемых природных ресурсов на основе нефти (искусственные синтетические полимеры), поэтому они не являются биоразлагаемыми. Разработанные новые материалы (биопластики) значительно уступают обычным пластикам по некоторым качествам, но зато являются биоразлагаемыми.

Еще одним из преимуществ биоразлагаемых пластиков является значительное уменьшение выбросов диоксида углерода в окружающую среду при их производстве. Такие пластики могут сэкономить от 0,8 до 3,2 тонн CO_2 на тонну продукции по сравнению с производством полиэтилена, который получается из нефти. При производстве полилактида в атмосферу выбрасывается вдвое меньше углекислого газа, чем при производстве полимеров на основе нефти [31].

Ниже будут исследованы основные принципы биоразложения, а также влияние на окружающую среду.

Биоразложение – процесс, при котором полимерный материал разлагается под воздействием живых организмов (бактерии, грибы, водоросли и т.д.). Живые микроорганизмы используют данный материал (полимеры) как источник органических соединений и источник энергии, необходимый для их жизнедеятельности («пищи»). Под воздействием ферментов данный полимер подвергается химическим реакциям, в результате которых распадается на воду, диоксид углерода, биомассу, другие биологические продукты, и высвобождает энергию. Такие продукты не являются токсическими и встречаются в природе и в организмах. Таким образом, искусственный материал, а именно, пластик, имеющий свойство биоразлагаемого, превращается в природные компоненты.

Процесс, в результате которого органическое вещество (например, биополимер), превращается в неорганическое вещество (CO_2) называется минерализация. Биоразложение начинается с фрагментации (влияние УФ-излучения, тепла, влаги, а также под воздействием микроорганизмов), в результате данного процесса происходит химическое расщепление,

расщепление полимера на фрагменты. Далее происходит процесс минерализации, в конечном итоге происходит процесс, представляющий собой биоразложение (рисунок 27).

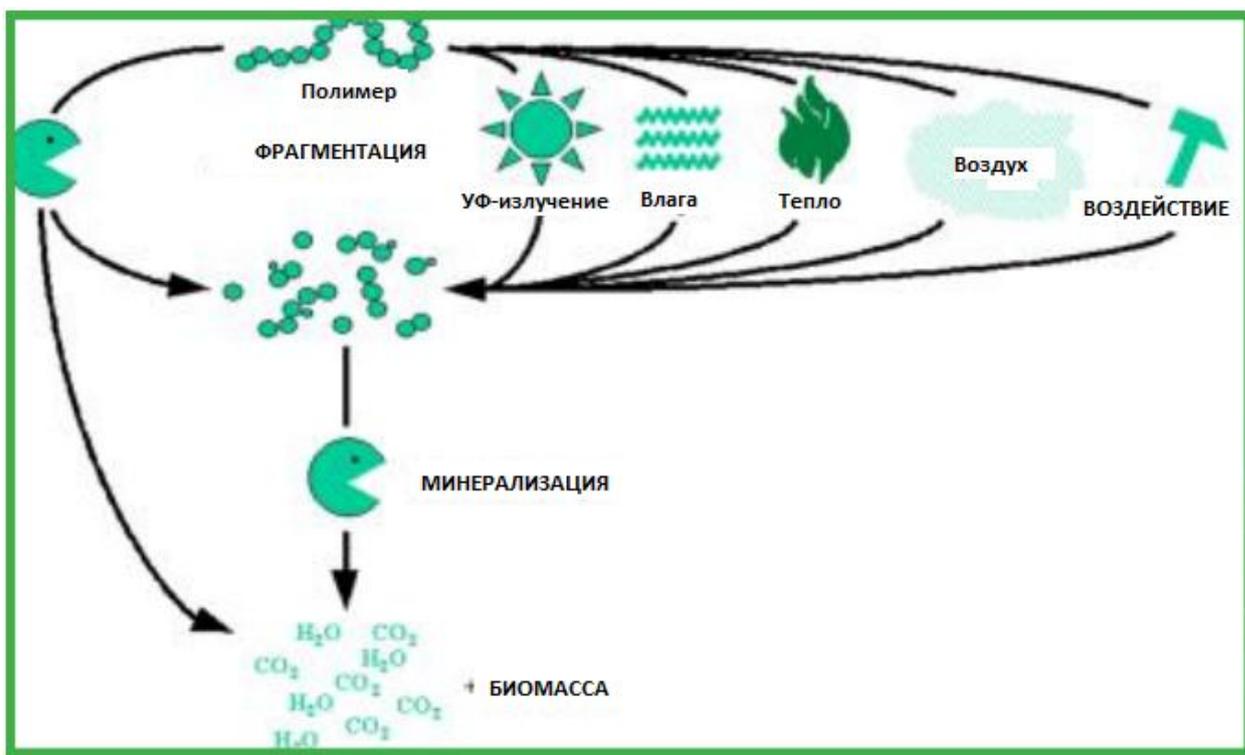


Рисунок 27 - Биоразложение

Существует утверждение, что любой органический материал, в том числе традиционно используемые пластики, разложатся механически или химически под воздействием факторов окружающей среды. В зависимости от состава пластика, на это потребуется длительный или довольно короткий период времени. Все компоненты пластика должны быть биоразлагаемыми.

Главное преимущество использования биоразлагаемых пластиков связано с экологическим фактором, которое проявляется при утилизации пластиковых отходов. При биоразложении таких видов пластиков образуются природные компоненты, которые не вызывают никакого отрицательного воздействия на окружающую среду. Традиционные, чаще используемые пластики, в большинстве случаев также не выделяют вредных

веществ в окружающую среду, но сохраняются в природе без каких-либо изменений в течении длительного времени, могут представлять опасность для насекомых и животных [32]. При использовании биоразлагаемых пластиков, которые разлагаются в более короткие сроки, негативное влияние на окружающую среду уменьшается или отсутствует совсем. Биоразлагаемый пластик не предназначен для того, чтобы его оставляли в природе. Если все-таки такие пластики были оставлены в природе, они принесут намного меньше вреда, чем традиционные [33].

Еще одно из преимуществ биоразлагаемых пластиков является то, что такие пластики разлагаются на природные компоненты, не требуют отдельного сбора, сортировки, переработки для повторного использования или других утилизационных решений (сжигание, дробление и пр.). Такие биопластики рекомендуют собирать вместе с органическими отходами для максимального биоразложения, подвергаться компостированию в аэробных (разложение с помощью кислорода) или анаэробных (разложение без кислорода) условиях. Чаще используемый, это аэробный способ компостирования. Компостируемые пластики подвергаются биоразложению на специальных промышленных компостах, которые имеют более высокую температуру, что в свою очередь увеличивает скорость процесса разложения [34]. Если отсутствует метод сбора биопластиков вместе с органическими отходами, они подвергаются разложению в природных условиях, на что требуется намного больше времени. Если утилизировать биоразлагаемые полимеры на свалках, что является изолированной от природы системой, то исчезает главная способность к биоразложению в природной среде [35]. Таким образом, биоразлагаемому пластику не представится возможным участвовать в ходе природного цикла. Также не рекомендуется использовать при сборе вместе традиционные пластики, например, которые чаще используются для 3D-печати (ABS-пластики), с биоразлагаемыми пластиками. Таким образом, преимущества полилактидов, биоразлагаемых

пластиков, проявляются в том случае, если их правильно использовать и утилизировать.

При использовании процесса утилизации биополимеров методом сжигания не образуются вредные примеси и вещества, в отличие от полимеров, которые производятся на основе нефти [36], [37]. Но, как правило, этот метод почти не используется для биопластиков.

Важнейшая способность биополимеров к биоразложению в природной среде дает возможность производства возобновляемых источников сырья. Пластики, которые производятся из возобновляемого сырья, в конечном итоге возвращаются обратно в природу, что обеспечивает не только уменьшение отходов, но и достаточную экономию ресурсов.

Одно из радикальных решений пластикового загрязнения является освоение широкой гаммы полимеров, которые способны при определенных условиях биологически разлагаться на безвредные компоненты для природы, что в дальнейшем позволит исключить значительное число проблем, связанных с пластиковым мусором [38], [39].

Вышеописанные процессы представим в виде схемы утилизации биоразлагаемых пластиков (рисунок 28).

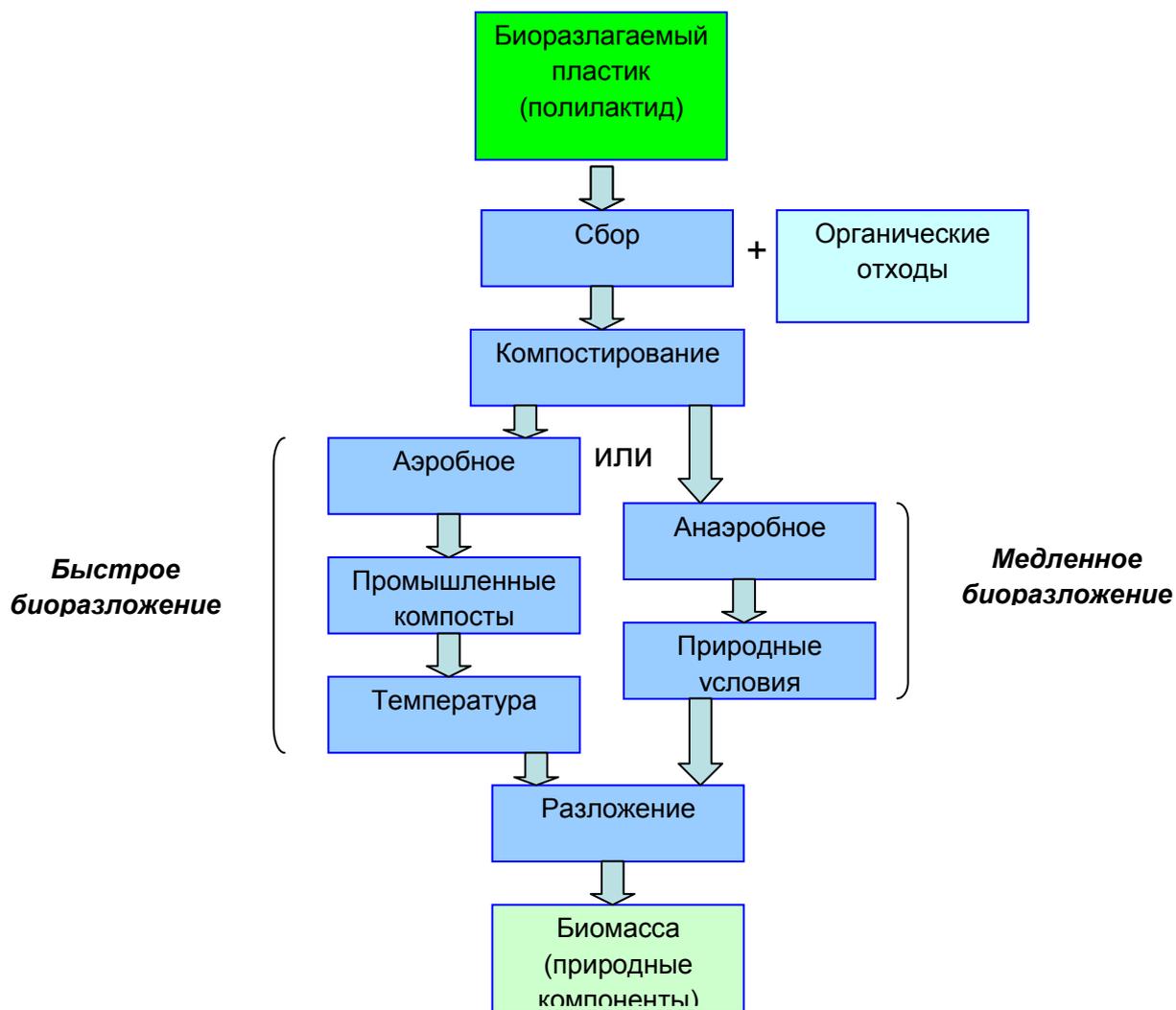


Рисунок 28 – Схема утилизации биоразлагаемого пластика

Сроки разложения биопластика (полилактида) от нескольких месяцев до нескольких лет (это максимум) при помещении в компостную яму. В таблице 11 приведено время разрушения PLA-пластика в зависимости от условий среды.

Таблица 11 - Время разрушения PLA-пластика в зависимости от условий среды

Температура, С ⁰	Влажность воздуха, %	Начальная стадия фрагментации, через	Полное разрушение, через
4	100	5,3 года	10,2 года
25	20	2,5 года	4,8 года
25	75	2,1 года	3,2 года
40	75	5,3 мес.	11 мес.
60	20	1 мес.	2,5 мес.
60	75	15 дней	2 мес.

Основные выводы:

1. Основным рекомендуемым способом утилизации биоразлагаемого пластика полилактида является метод компостирования, аэробный или анаэробный. Просто выкинуть использованное изделие из полилактида вместе с остальным бытовым мусором не рекомендуется. Полное биоразложение пластика при высокой температуре может произойти за 15 дней. Биоматериал, например, кукуруза, из которого производится полилактид, может быть выращен за 100 дней в отличие от нефти (из которой производятся небiorазлагаемые полимеры), состав которой формируется много миллионов лет и является невозобновляемым природным ресурсом.

2. При утилизации биоразлагаемых пластиков методом сжигания не выделяются вредные вещества, в отличие от пластиков на основе нефти.

3.8 Обоснованность применения биоразлагаемого пластика в ООО «Прототип»

Рассмотрим стоимостные характеристики ABS-пластика и PLA-пластика. В ООО «Прототип» в основном, для печати изделий на 3Д-

принтере используется ABS-пластик фирмы BESTFILAMENT (один из ведущих производителей пластика для 3Д-печати в России), его стоимость за 1 кг составляет 1390 рублей, толщина прутка 1,75 мм, оптовая стоимость при закупке от 5 кг составляет 850 рублей.

Пластик полилактид используется в ООО «ПРОТОТИП» для печати некоторых изделий, от общего числа примерно 5%. Стоимость за 1 кг PLA-пластика фирмы BESTFILAMENT составляет также 1390 рублей, толщина прутка 1,75 мм. Оптовая стоимость данного вида пластика при закупке от 5 кг составляет также 850 рублей.

Напечатанные изделия вне зависимости от используемого для печати пластика реализуются по цене 1300 рублей за 1 кг.

Ориентировочные расходы пластика в организации ООО «Прототип» 50-100 кг/месяц.

В разделе «Описание экспериментального исследования – расход электроэнергии при печати разными видами пластика» были приведены практические экспериментальные данные, что при использовании ABS-пластика расход электроэнергии составляет в 3,5 раза больше, чем при печати изделий PLA-пластиком.

Отходы при печати изделий ABS-пластиком и испорченные изделия согласно классификатору отходов относятся к 3-4 классу опасности, что требует обязательного составления паспорта отходов. Полилактид, а именно, отходы производства и непригодные к использованию изделия из PLA-пластика не были классифицированы. К сожалению, в Российской Федерации практически не уделяется внимание вопросам разработки и практическому применению биоразлагаемых пластиков, в том числе полилактидам. Но при описанном процессе биоразложения и его утилизации можно сделать соответствующий вывод, что данный вид полимера относится к 5 классу опасности и не требует составления паспорта отходов. А также не требует применения сложного процесса утилизации путем сжигания, измельчения и т.д., что значительно сэкономит затраты предприятию.

Путем внедрения PLA-пластика для печати прототипов больших размеров изделий и для изделий, у которых ограничен срок эксплуатации, путем соотношения к основному используемому пластику ABS до 20% существенно экономит затраты предприятия, что является экономически целесообразным.

В таблице 12 приведены основные экономические основания для внедрения PLA-пластика в ООО «Прототип».

Таблица 12 - Экономические основания для внедрения PLA-пластика в ООО «Прототип»

Наименование показателя	Экономия при использовании PLA-пластик	Примечание
1	2	3
Затраты на электроэнергию	В 3,5 раза меньше затрат на электроэнергию, чем при печати ABS	PLA-пластик не требует подогрева столика печати
Параметры усадки	Экономит расход пластика на изделие до 50%	Изделие сразу печатается качественно, т.к. не требует усадки и корректировки чертежей
Прототипирование больших изделий	100%	ABS-пластик не пригоден для прототипирования больших изделий

Продолжение таблицы 12

1	2	3
Утилизация	50% на утилизацию путем компостирования	Не требует затрат на процессы утилизации (сжигание, измельчение)
Составление паспорта отхода	100%	Не требуется, класс опасности 5
Изделия с ограниченным сроком службы	5%	Печать PLA-пластиком изделий с ограниченным сроком службы

На примере печати изделия резонатор воздушного фильтра для автомобиля LADA XRAY верхняя часть которого представлена на рисунке 29 и была напечатана пластиком полилактидом, и нижняя часть фильтра, представленная на рисунке 30, которая печаталась пластиком акрилонитрилбутадиенстиролом в организации ООО «Прототип», были рассчитаны примерные затраты и экономия при технологических процессах печати на 3D-принтере.

Верхняя часть резонатора воздушного фильтра печаталась на 3D-принтере с использованием пластика полилактида фирмы BESTFILAMENT, вес изделия получился 2400 г. Нижняя часть с использованием прутка пластика ABS-пластика фирмы BESTFILAMENT, вес изделия – 2200 г.

При оптовой стоимости закупки пластика от 5 кг по цене 850 рублей, получается стоимость верхней части резонатора воздушного фильтра 2040 рублей, нижней части 1870 рублей.



Рисунок 29 - Верхняя часть резонатора воздушного фильтра из PLA-пластика



Рисунок 30 - Нижняя часть резонатора воздушного фильтра из ABS-пластика

Напечатанные изделия реализуются по цене 1300 рублей за 1 кг вне зависимости от используемого для печати пластика, итого получается стоимость реализованного изделия из полилактида – 3120 рублей, из акрилонитрилбутадиенстирола – 2860 рублей.

На первый взгляд изделие из акрилонитрилбутадиенстирола получилось дешевле, но без учета затрат на электроэнергию, параметров

усадки изделия, составления паспорта отходов и дальнейшей утилизации тестовых образцов и подложки изделий.

В данном случае прототипирование изделия с помощью технологического процесса печати на 3D-принтере использовалось посредством печати отдельных частей и их дальнейшей «холодной склейки» в связи с небольшими габаритами принтера.

Как было описано в разделе 3.2 «Результат экспериментального исследования – расход электроэнергии при печати разными видами пластика» примерный расход электроэнергии при печати ABS-пластиком изделия весом 50 г получился при полной загрузке принтера 1892 Вт, полилактидом 546 Вт (практические экспериментальные данные).

Опираясь на экспериментальные данные можно предположить, что расход электроэнергии при печати верхней части резонатора воздушного фильтра весом 2400 г примерно будет 26208 Вт или 26,2 кВт; нижней части воздушного фильтра весом 2200 г примерно будет 83,3 кВт.

Коэффициент оплаты электроэнергии составляет 3,5 рубля за 1 кВт, следовательно, 91,7 рублей и 292 рубля.

Нижняя часть резонатора воздушного фильтра, напечатанная из ABS-пластика подверглась усадке, следовательно, произошли изменения размеров, примерно на 10%, что привело к невозможности эксплуатации изделия и его непригодности. Путем корректировки размеров (увеличения их примерно на 10%), изделие печаталось во второй раз.

Составление паспорта на отходы тестовых образцов и подложки изделия из ABS-пластика составляет 2000 руб., класс опасности пластика III (IV). Для отходов пластика полилактида, который является V классом опасности, паспорт отходов разрабатывать не требуется, достаточно оформить бланк исходных сведений в организации.

Примерную стоимость затрат изделий нижней и верхней части резонатора воздушного фильтра, напечатанной разными видами пластика в ООО «Прототип» внесена в таблицу 13.

Таблица 13 – Примерная стоимость затрат при печати нижней и верхней части резонатора воздушного фильтра в ООО «Прототип».

Наименование показателя	Верхняя часть резонатора из PLA-пластика	Нижняя часть резонатора из ABS-пластика
2	3	4
Затраты на электроэнергию	97,1 руб.	292 руб.
Параметры усадки	-	2860 руб. (изделие изменило размеры при усадке, далее корректировались размеры, печать изделия второй раз)
Стоимость изделия	3120 руб.	2860 руб.
Прототипирование больших изделий	Не использовалось	Не использовалось
Составление паспорта отхода на тестовый образец и полложки	Не требуется	2000 руб.
Итого:	3211 руб.	8012 руб.

Вывод: увеличение объемов печати некоторых изделий пластиком полилактидом в ООО «Прототип» с 5% до 20% существенно сэкономит затраты предприятия.

3.9 Основные выводы по проведенным теоретическим и экспериментальным исследованиям биоразлагаемого пластика полилактида

Совместно с предприятием ООО «Прототип» были проведены теоретические и экспериментальные исследования по следующим параметрам:

- Затраты электроэнергии при печати на принтере двумя видами пластика, полилактидом (PLA) и ABS-пластиком;
- Выделение вредных веществ при печати PLA-пластиком и ABS-пластиком;
- Исследование на прочность изделий, напечатанных на 3Д-принтере разными видами пластика;
- Экспериментальное исследование при воздействии температур на PLA-пластик;
- Прототипирование изделий, напечатанных на 3Д-принтере разными видами пластика;
- Исследование и разработка методов утилизации биоразлагаемого пластика.

Печать изделий на принтере с использованием биоразлагаемого пластика полилактида значительно экономит затраты на электроэнергию, так как одно важное свойство пластика, это отсутствие усадки, что не требует подогрева столика печати.

Печать данным видом пластика безопасна и безвредна согласно Постановлению Главного государственного санитарного врача РФ от 22.12.2017 N 165 "Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.1.6.3492-17 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений" (вместе с «ГН 2.1.6.3492-17. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений»). Но в качестве рекомендаций проветривать используемое помещение.

Самым прочным при изгибе в ходе испытаний оказался пластик PLA при максимальной нагрузке 154 Н, более прочным при растяжении в ходе испытаний и самым прочным при испытании на сжатие оказался пластик PLA, образцы совсем не деформировались.

Напечатанные изделия из полилактида не предназначены для эксплуатации при высоких температурах (от 50°C), в ином случае они деформируются и размягчаются.

PLA-пластик больше подходит для печати больших прототипов изделий, макетов, образцов и т.д. Имея принтер больших размеров, можно напечатать изделие соответствующих больших размеров, деталь будет иметь более качественный и завершенный вид, а также более четкую детализацию.

PLA-пластик больше подходит для образцов, прототипов, которые не требуют длительной эксплуатации, предметы декоративного назначения с большей детализацией, выполняющие презентационную роль или роль прототипа для наладки производственных процессов.

ABS-пластик не пригоден для печати изделий больших размеров. Данная проблема решается путем поддетальной печати объекта, с дальнейшим склеиванием частей путем «холодной сварки».

ABS-пластик предназначен для изделий, предполагающих длительную эксплуатацию.

Основным рекомендуемым способом утилизации биоразлагаемого пластика полилактида является метод компостирования, аэробный или анаэробный. Просто выкинуть использованный полилактид вместе с остальным бытовым мусором не рекомендуется. Полное биоразложение пластика при высокой температуре может произойти за 15 дней. Биоматериал, например, кукуруза, из которого производится полилактид, может быть выращен за 100 дней в отличие от нефти (из которой производятся небiorазлагаемые полимеры), состав которой формируется много миллионов лет и является невозобновляемым природным ресурсом.

При утилизации биоразлагаемых пластиков методом сжигания не выделяются вредные вещества, в отличие от пластиков на основе нефти.

Увеличение объемов печати пластиком полилактидом в ООО «Прототип» с 5% до 20% существенно сэкономит затраты предприятия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В магистерской диссертации проводилась теоретическая и экспериментальная работа по исследованию и разработке методов применения и утилизации биоразлагаемого пластика полилактида, используемого при печати изделий на 3D-принтере в ООО «Прототип» (г.о.Тольятти).

Было выяснено, что пластик полилактид применяется для производства экологически чистой продукции, изделий, в том числе для детей, и имеет биоразлагаемые качества, что является совершенно безопасным при использовании человеком. Полилактид не выделяют вредных веществ, как при его производстве, так и при непосредственном использовании, а также дальнейшей утилизации.

Одна из целей научного исследования и содержания магистерской диссертации это сравнительный анализ методов применения и утилизации биоразлагаемого пластика полилактида по сравнению с пластиками, не имеющими биоразлагаемых свойств (акрилонитрилбутадиенстирол), и приводящих к пластиковому загрязнению окружающей среды с приведением соответствующих выводов по работе.

Проводилось детальное исследование использования полилактида при печати изделий на 3D-принтере и сравнительный анализ с ABS-пластиками, которые широко используются в настоящее время при печати изделий на 3D-принтере.

Большое внимание в работе было уделено структуре 3D-принтера, особенностям печати на нем, детально рассмотрен технологический процесс при печати изделий из пластика, риски при работе с 3D-принтером.

Экспериментальное исследование печати одинаковых изделий при помощи PLA-пластика и ABS-пластика на 3D-принтере помогло выяснить, что печать изделий на принтере с использованием биоразлагаемого пластика полилактида значительно экономит расход электроэнергии, так как одно из

важных свойств пластика, это отсутствие усадки, что не требует подогрева столика печати.

При исследовании на выделение вредных веществ при печати было выяснено, что запыленность микрочастицами при печати на 3D-принтере представленными видами пластика абсолютно безвредная для здоровья.

Основное выделение в воздух при печати ABS-пластиком это хлористый винил. По результатам исследования его фоновые показатели превышаются в 3,4 раза. Данное превышение в 24,8 раза меньше, чем предельно-допустимая концентрация.

При печати PLA-пластиком основным продуктом распада является ацетон, но его выделение при экструзии согласно результатам исследования находится в пределах погрешности, а общее его содержание в воздухе помещения офиса в ходе исследования находится в 7,5 раз ниже, чем ПДК.

Можно сформулировать вывод, что печать данными видами пластика безопасна согласно Постановлению Главного государственного санитарного врача РФ от 22.12.2017 N 165 "Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.1.6.3492-17 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений".

Пластик PLA оказался прочным при изгибе, при растяжении и самым прочным при испытании на сжатие, образцы изделий пластика совсем не деформировались.

Одним из минусов при эксплуатации изделий из пластика полилактида является его невозможность использования при высоких температурах (от 50°C), пластик деформируется и размягчается, что больше подходит для изделий и ограниченным сроком службы.

PLA-пластик рекомендуется использовать для печати больших прототипов изделий, макетов, образцов и т.д. в отличие от ABS-пластика. Имея принтер больших размеров, можно напечатать изделие

соответствующих больших размеров, деталь будет иметь более качественный и завершенный вид, а также более четкую детализацию.

Основным рекомендуемым способом утилизации биоразлагаемого пластика полилактида является метод компостирования, аэробный или анаэробный. Выкидывать использованный полилактид вместе с остальным бытовым мусором не рекомендуется. Полное биоразложение пластика при высокой температуре может произойти за 15 дней. При утилизации биоразлагаемых пластиков методом сжигания не выделяются вредные вещества, в отличие от пластиков на основе нефти. Полилактид является экологически чистым возобновляемым материалом.

Увеличение объемов печати некоторых изделий пластиком полилактидом в ООО «Прототип» с 5% до 20% существенно сэкономит затраты предприятия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Асякина, Л.К. Технологии биоразлагаемых упаковочных материалов [Электронный ресурс]: монография / Л.К. Асякина, А.Ю. Просеков, Л.С. Дышлюк. — Кемерово: КемТИПП, 2017. — 119 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/102696>, (дата обращения 01.06.2018).
2. Биоразлагаемые полимерные смеси и композиты из возобновляемых источников [Электронный ресурс] — Санкт-Петербург : НОТ, 2013. — 464 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/35860>, (дата обращения 01.06.2018).
3. Пояснения к единой Товарной номенклатуре внешнеэкономической деятельности Евразийского экономического союза (ТН ВЭД ЕАЭС)» (Том II. Разделы VI – VII. Группы 29-43). [Электронный ресурс]. - Режим доступа <http://www.consultant.ru>. (дата обращения 20.05.2018).
4. Полилактид // Википедия. [2018—2018]. Дата обновления: 08.02.2018. [Электронный ресурс]. - URL: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=90800837> (дата обращения: 08.02.2018).
5. АБС-пластик // Википедия. [2018—2018]. Дата обновления: 27.05.2018. [Электронный ресурс]. - URL: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=92911316> (дата обращения: 27.05.2018).
6. Пластиковое загрязнение // Википедия. [2018—2018]. Дата обновления: 31.05.2018. [Электронный ресурс]. - URL: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=92999231> (дата обращения: 31.05.2018).
7. Биополимеры // Википедия. [2017—2017]. Дата обновления: 29.06.2017. [Электронный ресурс]. - URL: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=86250735> (дата обращения: 29.06.2017).
8. 3D-принтер // Википедия. [2018—2018]. Дата обновления: 06.06.2018. [Электронный ресурс]. - URL: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=93127932> (дата обращения: 06.06.2018).

9. Изгиб. Растяжение/сжатие // Лекции. Нет. [Электронный ресурс]. - URL: [https:// http://lektcii.net/](https://http://lektcii.net/) (дата обращения: 01.06.2018).
10. Предел прочности // Википедия. [2018—2018]. Дата обновления: 14.03.2018. [Электронный ресурс]. - URL: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=91508444> (дата обращения: 14.03.2018).
11. Готлиб, Е.М. Пути создания биоразлагаемых полимерных материалов и их получение на основе пластифицированных диацетатов целлюлозы [Электронный ресурс]: монография/ Готлиб Е.М., Голованова К.В., Селехова А.А.— Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2011.— 132 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/63976.html>.— ЭБС «IPRbooks», (дата обращения 01.06.2018).
12. Структура биополимеров. Общие проблемы структуры, самоорганизации и функционирования белковых молекул. Методы структурного анализа белков [Электронный ресурс]: учебник/ М.Ф. Куприянов [и др.].— Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2008.— 224 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47145.html>.— ЭБС «IPRbooks», (дата обращения 31.05.2018).
13. Биологически разлагаемый пластик и его применение: патент на изобретение RU 2014143799, 30.10.2014, [Электронный ресурс].— Режим доступа: <http://www1.fips.ru/Archive/PAT/2016FULL/2016.05.27/DOC/RUNWA/000/002/014/143/799/DOCUMENT.PDF> (дата обращения 30.04.2018).
14. Биоразлагаемые многофазные композиции на основе крахмала: патент на изобретение RU 2009114686, 10.11.2010 [Электронный ресурс].— Режим доступа: <http://www1.fips.ru/Archive/PAT/2010FULL/2010.11.10/DOC/RUNWA /000/002/009/114/686/DOCUMENT.PDF> (дата обращения 30.04.2018).
15. Новая биоразлагаемая полимерная композиция, пригодная для получения биоразлагаемого пластика, и способ получения указанной композиции: патент на изобретение RU 2480495, 26.04.2007, [Электронный ресурс].— Режим доступа: <http://www1.fips.ru/Archive/PAT/2013FULL/2013.04.27/DOC/>

RUNWC2/000/000/002/480/495/DOCUMENT.PDF (дата обращения 30.04.2018).

16. Крыжановский, В.К. Инженерный выбор и идентификация пластмасс [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Крыжановский В.К.— СПб.: Научные основы и технологии, 2009.— 204 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/13213.html>.— ЭБС «IPRbooks» (дата обращения 30.04.2018).

17. Пластиковая упаковка [Электронный ресурс] / Зелке С., Кутлер Д., Хернандес Р.; Под ред. Загорский А.Л. - СПб:Профессия, 2011. - 560 с.: 70x100 1/16, ISBN 978-5-91884-018-4. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/49072> (дата обращения 30.04.2018).

18. Каменская, Е. Н. Безопасность жизнедеятельности и управление рисками [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Е. Н. Каменская. - Москва : РИОР : ИНФРА-М, 2016. - 252 с. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-369-01541-4. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/59072> (дата обращения 30.04.2018).

19. Как устроен 3D-принтер // [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.losprinters.ru/articles/kak-ustroen-3d-printer/> (дата обращения: 31.05.2018).

20. Нано- и биокompозиты [Электронный ресурс] / под ред. А. К.-Т. Лау, Ф. Хуссейн, Х. Лафди ; пер. с англ. — Эл. изд. (1 файл pdf : 393 с.). — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. — (Нанотехнологии). ISBN 978-5-9963-2914-4.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47145.html>.— ЭБС «IPRbooks», (дата обращения 31.05.2018).

21. Перухин, Ю.В. Расчет и конструирование изделий из пластмасс и формирующей оснастки. Экструзионный формирующий инструмент [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Ю.В. Перухин, Т.Р. Дебердеев, С.Н. Русанова. —Казань : КНИТУ, 2017. — 96 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/102091>, (дата обращения 31.05.2018).

22. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 22.12.2017 N 165 "Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.1.6.3492-17 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений" (вместе с «ГН 2.1.6.3492-17. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений») (Зарегистрировано в Минюсте России 09.01.2018 N 49557) [Электронный ресурс]. - Режим доступа <http://www.consultant.ru>. (дата обращения 20.05.2018).
23. Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ (ред. от 31.12.2017) "Об охране окружающей среды" [Электронный ресурс]. - Режим доступа <http://www.consultant.ru>. (дата обращения 20.05.2018).
24. ГОСТ Р ИСО 16000-1-2007. Национальный стандарт Российской Федерации. Воздух замкнутых помещений. Часть 1. Отбор проб. Общие положения. [Электронный ресурс]. - Режим доступа <http://www.consultant.ru>, (дата обращения 20.05.2018).
25. Швейцер, Ф.А. Коррозия пластмасс и резин [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : НОТ, 2010. — 640 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/4296>. (дата обращения 20.05.2018).
26. Лоуренс, М. Свойства пленок из пластмасс и эластомеров [Электронный ресурс] : справ. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : НОТ, 2014. — 528 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/49073>. (дата обращения 25.05.2018).
27. Шумаев, В. А. Теория и практика ресурсосбережения [Электронный ресурс] : монография / В. А. Шумаев. - Москва : Русайнс, 2016. - 234 с. - ISBN 978-5-4365-0879-5. .— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru>.— ЭБС «IPRbooks», (дата обращения 31.05.2018).
28. Приказ Минприроды России от 04.12.2014 N 536 "Об утверждении Критериев отнесения отходов к I – V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду" (Зарегистрировано в

Минюсте России 29.12.2015 N 40330). [Электронный ресурс]. - Режим доступа <http://www.consultant.ru>, (дата обращения 22.05.2018).

29. Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 N 242 (ред. от 28.11.2017) "Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов" (Зарегистрировано в Минюсте России 08.06.2017 N 47008). [Электронный ресурс]. - Режим доступа <http://www.consultant.ru>, (дата обращения 22.05.2018).

30. Федеральный закон от 24.06.1998 N 89-ФЗ (ред. от 31.12.2017) "Об отходах производства и потребления"(с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2018), [Электронный ресурс]. - Режим доступа <http://www.consultant.ru>, (дата обращения 22.05.2018).

31. Негодяев, Н.Д. Оборудование и основы проектирования предприятий по переработке пластмасс: учебное пособие [Электронный ресурс] / Н.Д. Негодяев, О.С. Ельцов, Ю.Ю. Моржерин.— Екатеринбург : УрФУ, 2013. — 144 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/98950>, (дата обращения 02.06.2018).

32. Миленький, А.В. Утилизация упаковки [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Кемерово : КемТИПП, 2014. — 102 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/60195>, (дата обращения 02.06.2018).

33. Smith R. Biodegradable polymers for industrial applications. Woodhead Publishing Limited, CRCPress, 2005. - 516 p.

34. X. Lin, W. Bo, G. Yang, M.Gauthier Poly(Lactic Acid)-Based Biomaterials: Synthesis, Modification and Applications/ Biomedical Science, Engineering and Technology, 2012. – 247-282 p. ISBN 978-953- 307-471-9

35. L. Averous, E. Pollet. Biodegradable Polymers. Environmental Silicate Nano-Biocomposites, Green Energy and Technology, DOI: 10.1007/978- 1-4471-4108-2_2, 2012. – 27 p.

36. Миленький, А.В. Утилизация упаковки: практикум [Электронный ресурс] — Кемерово : КемТИПП, 2016. — 95 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/99568>, (дата обращения 02.06.2018).

37. Утилизация и переработка твёрдых бытовых отходов [Электронный ресурс]: учебное пособие/ А.С. Клинков [и др.].— Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2015.— 188 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/63916.html>.— ЭБС «IPRbooks», (дата обращения 02.06.2018).
38. Rafael Auras Polylacticacid : synthesis, structures, properties, processing, and applications/ Includes index. ISBN 978-0-470-29366-9 (cloth).
39. K. Madhavan Nampoothiri, NimishaRajendran Nair, Rojan Pappy John. An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research. Bioresource Technology 101(22):8493-501. Nov. 2010.