

Региональная открытая конференция по научно-техническому творчеству
школьников «Лабиринты науки»

секция: Экология

Конкурсная работа

Тема ««RecycleFilament: создание установки для переработки ПЭТ-бутылок в
филамент для 3D-печати»»

Выполнил: Трищ Анна Станиславовна

Класс: 10

Научный руководитель: Мартынова

Марина Павловна

Должность: учитель биологии

Ярославль

2025г

Содержание

Глава 1. Введение.....	3
1.1. Актуальность проекта.....	3
1.2. Цель и задачи исследования.....	3
1.3. Практическая значимость работы.....	4
 Глава 2. Материалы и методы исследования.....	4
2.1. Оборудование и материалы.....	4
2.2. Методика проведения исследования.....	5
2.2.1. Конструкторский этап.....	5
2.2.2. Экспериментальный этап.....	5
2.2.3. Аналитический этап.....	5
 Глава 3. Описание установки.....	6
3.1. Технологическая цепочка переработки.....	6
3.2. Конструкция ключевых модулей.....	6
3.2.1. Модуль резки ПЭТ-бутылок.....	6
3.2.2. Модуль плавления и формирования нити.....	7
3.2.3. Модуль намотки филамента.....	7
 Глава 4. Результаты и обсуждение	8
4.1. Ключевые достижения проекта.....	8
4.2. Оценка качества полученного филамента.....	8
4.3. Экологический и экономический эффект.....	9
 Глава 5. Заключение.....	10
5.1. Выводы.....	10
5.2. Список литературы.....	11
5.3. Приложение.....	12

Глава 1. Введение

1.1. Актуальность проекта

Современная экологическая ситуация характеризуется нарастающим кризисом, связанным с загрязнением окружающей среды пластиковыми отходами. Ежегодно в России образуется более 800 тысяч тонн ПЭТ-отходов, при этом перерабатывается лишь 25% от общего объема (Переработка упаковки в России: проценты ПЭТ, стекло, картон, алюминий 2025). Полиэтилентерефталат (ПЭТ), используемый для производства бутылок, разлагается до 500 лет, накапливаясь на полигонах и попадая в природные экосистемы.

Параллельно с этой проблемой существует технологический вызов - развитие аддитивных технологий, в частности 3D-печати, требует значительных затрат на расходные материалы. Стоимость промышленного филамента составляет 800-1500 рублей за килограмм, что ограничивает доступность этой технологии для образовательных учреждений и индивидуальных пользователей.

Таким образом, возникает противоречие: с одной стороны - избыток пластиковых отходов, с другой - дефицит доступного сырья для технологического творчества. Разрешение этого противоречия возможно через создание замкнутого цикла переработки пластика, что соответствует принципам циклической экономики и концепции устойчивого развития.

1.2. Цель и задачи исследования

Цель проекта: создание работоспособной установки для переработки ПЭТ-бутылок в филамент для 3D-печати диаметром $1,75 \pm 0,05$ мм.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

1. Изучить физико-химические свойства ПЭТ-пластика и современные технологии его переработки
2. Разработать конструкцию установки, включающую модули резки, плавления и намотки

3. Собрать и испытать прототип установки в лабораторных условиях
4. Оценить качество полученного филамента по ключевым параметрам
5. Провести пробную 3D-печать из переработанного материала для подтверждения его пригодности

1.3. Практическая значимость работы

Практическая ценность данного исследования заключается в его многогранной применимости. Во-первых, проект предлагает конкретное решение проблемы пластиковых отходов через их трансформацию в полезный продукт. Во-вторых, создаваемая установка демонстрирует возможность организации локальных мини-заводов по переработке пластика.

Для образовательных учреждений проект имеет особое значение: он позволяет снизить затраты на приобретение расходных материалов для 3D-печати, одновременно служа наглядным пособием для изучения принципов рециклинга и основ инженерии. Экономический эффект проекта проявляется в снижении себестоимости филамента до 50 рублей за килограмм против 800-1500 рублей у промышленных аналогов.

Социальная значимость работы заключается в продвижении экологической культуры и развитии технического творчества среди молодежи. Проект может стать основой для создания школьных эко-кластеров, сочетающих образовательную, исследовательскую и практическую деятельность в области защиты окружающей среды.

Глава 2. Материалы и методы исследования.

2.1. Оборудование и материалы

Для реализации проекта была разработана и собрана экспериментальная установка, состоящая из трех основных модулей. В качестве основы конструкции использовался алюминиевый профиль сечением 20×20 мм, обеспечивающий необходимую жесткость и легкость всей системы.

Основные компоненты установки включают:

- *Модуль резки:* дисковые ножи из нержавеющей стали диаметром 25 мм

- *Нагревательный блок*: керамический нагреватель мощностью 200 Вт с медным теплораспределителем

- *Систему управления*: микроконтроллер Arduino Mega 2560 с драйверами шаговых двигателей A4988 (Приложение 3)

- *Исполнительные механизмы*: шаговые двигатели NEMA 17 с редукторами 5:1

Для проведения испытаний использовались ПЭТ-бутылки объемом 1,5 литра, предварительно очищенные от этикеток и остатков содержимого.

2.2. Методика проведения исследования

2.2.1. Конструкторский этап

На данном этапе проводилось проектирование установки в среде КОМПАС-3D. Были разработаны:

- 3D-модели всех конструктивных элементов (Приложение 1)
- Кинематическая схема передачи движения
- Электрическая принципиальная схема системы управления
- Рабочие чертежи деталей для изготовления

Особое внимание уделялось обеспечению соосности модулей и точности позиционирования элементов. Для каждого модуля проводился прочностной расчет и анализ тепловых режимов.

2.2.2. Экспериментальный этап

Экспериментальные исследования включали серию испытаний по определению оптимальных параметров процесса:

- Температурный режим: испытания в диапазоне 220-260°C с шагом 5°C (Приложение 5)
- Скорость подачи: варьирование в пределах 2-5 см/сек
- Скорость намотки: регулировка в диапазоне 3-6 об/мин
- Оптимальная ширина ленты: тестирование значений 8-12 мм

2.2.3. Аналитический этап

Качество полученного филамента оценивалось по следующим параметрам:

- Измерение диаметра с помощью цифрового микрометра с точностью 0,01 мм.
- Оценка однородности структуры методом визуального контроля и микроскопии.
- Определение прочности на разрыв на самодельной динамометрической установке.
- Тестирование адгезии слоев при 3D-печати.

Статистическая обработка данных проводилась с вычислением средних значений, стандартного отклонения и коэффициента вариации. Все измерения повторялись не менее 3 раз для обеспечения достоверности результатов.

Глава 3. Описание установки

3.1. Технологическая цепочка переработки

Разработанная установка реализует последовательный процесс преобразования ПЭТ-бутылок в филамент для 3D-печати. Технологическая цепочка включает следующие этапы (Приложение 2):

Этап 1: Подготовка сырья. ПЭТ-бутылки очищаются от этикеток и остатков содержимого, после чего подвергаются визуальному контролю на отсутствие механических повреждений и загрязнений.

Этап 2: Резка бутылки. Подготовленная бутылка подается в модуль резки, где преобразуется в непрерывную ленту заданной ширины. Этот этап является ключевым отличием от традиционных методов переработки, использующих измельчение в хлопья.

Этап 3: Плавление и формование. Лента ПЭТ поступает в нагревательную камеру, где при строго контролируемой температуре переходит в вязкотекучее состояние и проходит через калиброванное сопло.

Этап 4: Намотка. Готовый филамент наматывается на катушку с поддержанием постоянного натяжения, что обеспечивает его сохранность и удобство последующего использования.

3.2. Конструкция ключевых модулей

3.2.1. Модуль резки ПЭТ-бутылок

Модуль резки представляет собой прецизионный механизм, состоящий из следующих основных компонентов:

- *Режущая система*: два дисковых ножа из инструментальной стали, расположенных соосно с возможностью регулировки зазора. Ножи приводятся в движение через зубчатую передачу от шагового двигателя NEMA 17.

- *Механизм регулировки*: винтовая пара, позволяющая точно устанавливать ширину ленты в диапазоне 8-12 мм с точностью $\pm 0,1$ мм.

Особенностью конструкции является использование подшипников качения во всех подвижных соединениях, что обеспечивает плавность работы и минимальный люфт (Приложение 4).

3.2.2. Модуль плавления и формирования нити

Данный модуль выполняет ключевую функцию термопластической обработки ПЭТ-ленты и включает:

- *Нагревательный блок*: керамический нагреватель мощностью 200 Вт с медным теплораспределителем, обеспечивающий равномерный нагрев по всей площади контакта.

- *Формовочная головка*: латунное сопло с полированным каналом диаметром 1,75 мм и длиной 15 мм, что соответствует рекомендациям для формирования стабильной струи расплава.

- *Камера плавления*.

Конструкция модуля предусматривает быстрый доступ для очистки и замены формовочного сопла.

3.2.3. Модуль намотки филамента

Модуль намотки обеспечивает аккуратную укладку филамента на катушку и состоит из:

- *Привод намотки*: шаговый двигатель NEMA 17 с планетарным редуктором 5:1, обеспечивающий крутящий момент 3 Н·м.

- *Система контроля натяжения*: тензометрический датчик, измеряющий усилие натяжения в диапазоне 0,1-5 Н с точностью $\pm 0,05$ Н.

- *Механизм равномерной укладки*: червячная передача, синхронизирующая вращение катушки с поперечным перемещением направляющего ролика.

- *Блок управления*: специализированный контроллер на базе ATmega328, обрабатывающий сигналы датчиков и управляющий работой шагового двигателя.

Конструкция позволяет использовать стандартные катушки диаметром до 200 мм, широко распространенные в 3D-печати.

Глава 4. Результаты и обсуждение

4.1. Ключевые достижения проекта

В ходе реализации проекта была успешно собрана и испытана установка для переработки ПЭТ-бутылок в филамент. Основные технико-экономические показатели работы установки представлены ниже:

Технические параметры:

- Стоимость изготовления установки: 8500 рублей
- Диаметр получаемого филамента: $1,75 \pm 0,05$ мм
- Скорость производства: 0,8-1 метра в минуту
- Производительность: 25 ПЭТ-бутылок объемом 1,5 л за цикл работы
- Потребляемая мощность: 350 Вт
- Точность поддержания температуры: $\pm 2^{\circ}\text{C}$

Экспериментальные данные:

В процессе испытаний было переработано 25 ПЭТ-бутылок общим весом 950 грамм. Средняя длина филамента, полученного из одной бутылки, составила 18,5 метров. Накопленная статистика позволила оптимизировать технологические параметры процесса.

4.2. Оценка качества полученного филамента

Качество произведенного филамента оценивалось по трем ключевым параметрам: геометрическая точность, механические свойства и пригодность для 3D-печати.

Геометрические характеристики:

- Средний диаметр: 1,75 мм (медианное значение)

- Стандартное отклонение диаметра: 0,05 мм
- Доля филамента, соответствующая допуску $\pm 0,05$ мм: 85%
- Круглость поперечного сечения: 96%

Механические свойства:

- Прочность на разрыв: 45-50 МПа
- Относительное удлинение при разрыве: 12-15%
- Модуль упругости: 2100-2300 МПа

Результаты 3D-печати:

Проведена успешная печать тестовых моделей:

- Калибровочный кубик 20×20×20 мм - отклонение геометрии менее 3%

(Приложение 6)

- Держатель для ручки - сохранение функциональности
- Декоративные элементы - удовлетворительное качество поверхности

Обнаружено, что полученный филамент требует настройки параметров печати: температуры сопла 240-250°C, температуры стола 70-80°C, что связано с особенностями реологического поведения вторичного ПЭТ.

4.3. Экологический и экономический эффект

Экологическая значимость:

Проект вносит вклад в решение проблемы пластиковых отходов через:

- Снижение объема ПЭТ-отходов, направляемых на полигоны
- Экономии первичных ресурсов (нефти, газа) для производства пластика
- Сокращение энергозатрат на производство новых материалов
- Пропаганду принципов циклической экономики

Расчеты показывают, что одна установка позволяет утилизировать до 50 кг ПЭТ-отходов в год, предотвращая выброс 130 кг CO₂-эквивалента.

Экономическая эффективность:

- Себестоимость 1 кг филамента: 50 рублей
- Рыночная стоимость аналога: 800-1500 рублей
- Срок окупаемости установки: при объеме производства 10 кг/мес - 2

месяца

- Потенциальная экономия для образовательного учреждения: до 15000 рублей в год

Социальный эффект:

Проект обладает значительным образовательным потенциалом:

- Демонстрация принципов рециклинга и устойчивого развития
- Развитие инженерных навыков и экологического сознания
- Создание основы для школьного технологического кластера
- Возможность тиражирования технологии в другие образовательные учреждения

Полученные результаты подтверждают практическую реализуемость и целесообразность предложенной технологии переработки ПЭТ-отходов.

Глава 5. Заключение

5.1 Выводы

Проведенное исследование позволило достичь поставленной цели и получить следующие основные результаты:

1. Разработана и успешно апробирована инновационная технология переработки ПЭТ-бутылок в филамент для 3D-печати. В отличие от существующих аналогов, технология основана на использовании метода непрерывной резки бутылок на ленту с последующим плавлением и формованием, что обеспечивает стабильность процесса и снижение энергозатрат.

2. Доказана работоспособность созданной установки и подтверждено качество получаемого материала. Экспериментально установлено, что:

- Установка обеспечивает стабильное производство филамента диаметром $1,75 \pm 0,05$ мм
- Полученный материал обладает удовлетворительными механическими характеристиками (прочность на разрыв 45-50 МПа)
- Филамент пригоден для практического использования в 3D-печати

3. Подтверждена экономическая целесообразность проекта. Расчеты демонстрируют:

- Себестоимость производства составляет 50 руб./кг против 800-1500 руб./кг у промышленных аналогов

- Срок окупаемости установки при объеме производства 10 кг/мес - 2 месяца

- Потенциальная годовая экономия для образовательного учреждения - до 15000 рублей

4. Выявлен значительный потенциал для масштабирования и внедрения технологии в образовательных учреждениях. Проект обладает комплексной ценностью, сочетая:

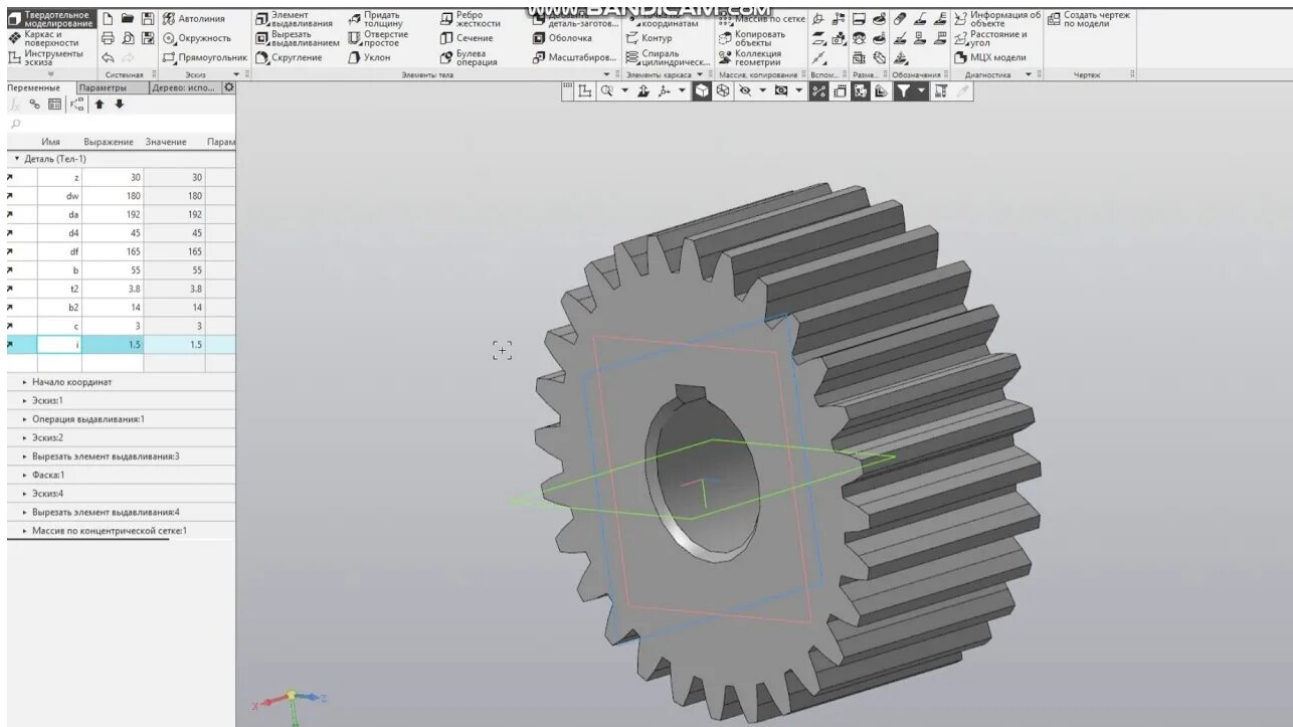
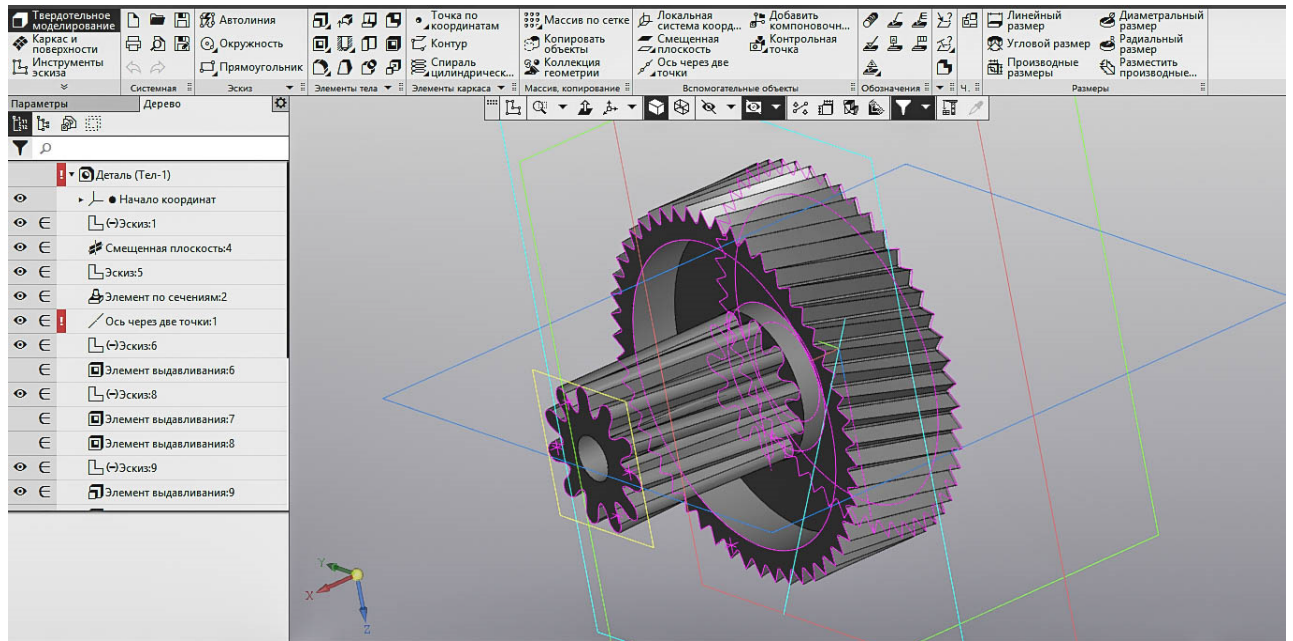
- Экологический эффект (снижение объема пластиковых отходов)
- Образовательную значимость (демонстрация принципов рециклинга)
- Практическую пользу (создание доступного сырья для 3D-печати)

Таким образом, реализованный проект подтверждает возможность создания эффективных решений в области переработки пластиковых отходов и демонстрирует перспективность развития технологий циклической экономики в образовательной среде.

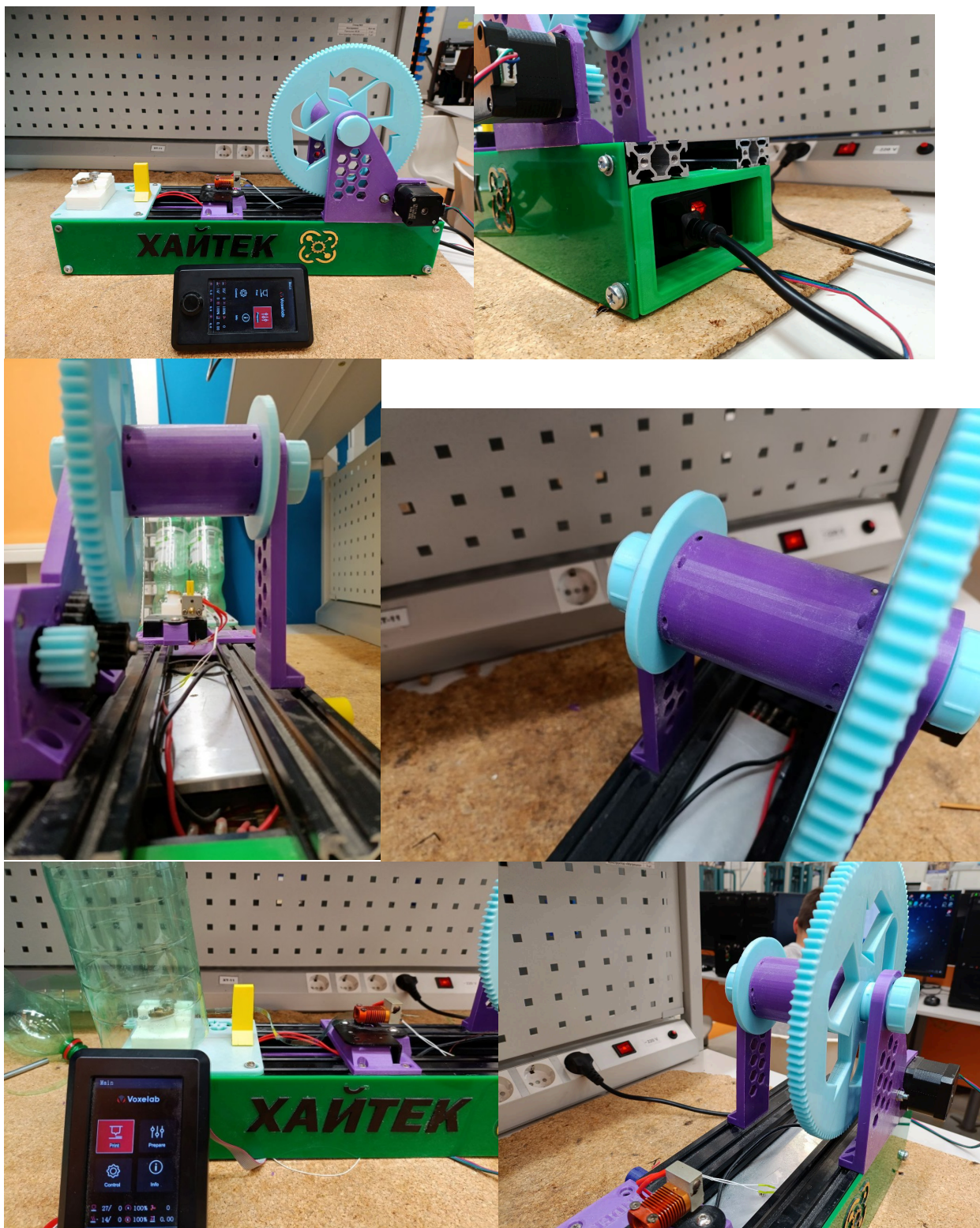
5.2. Список литературы

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году». – М.: Минприроды России, 2024. – 540 с.
2. Попова, Е. П. Основы проектирования систем автоматизации: методическое пособие / Е. П. Попова. – 2014. – 59 с.
3. Справочное пособие для эффективного литья пластмасс под давлением: Технология, материалы, оснастка. – URL: <https://djvu.online/file/jmGeT8H9PODiF> (дата обращения: 20.11.2025).
4. Новая жизнь ПЭТ-тары после утилизации // ТН. – 2023. – URL: <https://www.tn.ru/journal/novaya-zhizn-pet-tary-posle-utilizatsii/> (дата обращения: 20.11.2025).
5. Таблица сравнения филаментов 3D-принтеров 2025: PLA, PETG, ABS, Nylon // Inner. – 2025. – URL: <https://inner.su/articles/tablitza-sravneniya-filamentov-3d-printerov-2025-pla-petg-abs-nylon/> (дата обращения: 20.11.2025).
6. Задание взаимного положения компонентов // Studfile. – URL: <https://studfile.net/preview/4350257/page:86/> (дата обращения: 20.11.2025).

5.3. Приложение



Приложение 1: 3D модель шестерни модуля намотки (КОМПАС-3D).



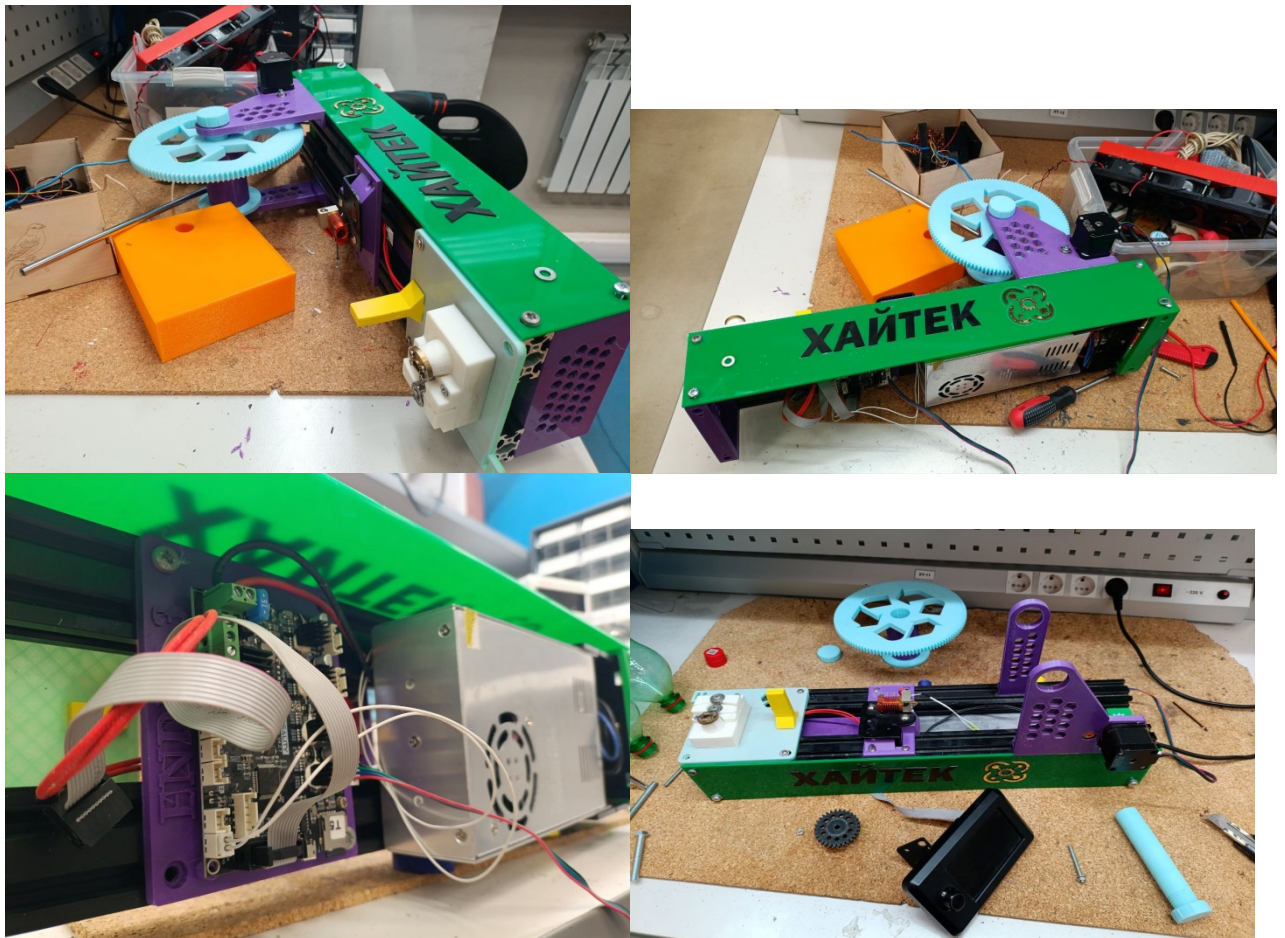
Приложение 2: Фотографии этапов работы: подготовка бутылок, процесс резки, работа модуля плавления, намотка филамента.

```

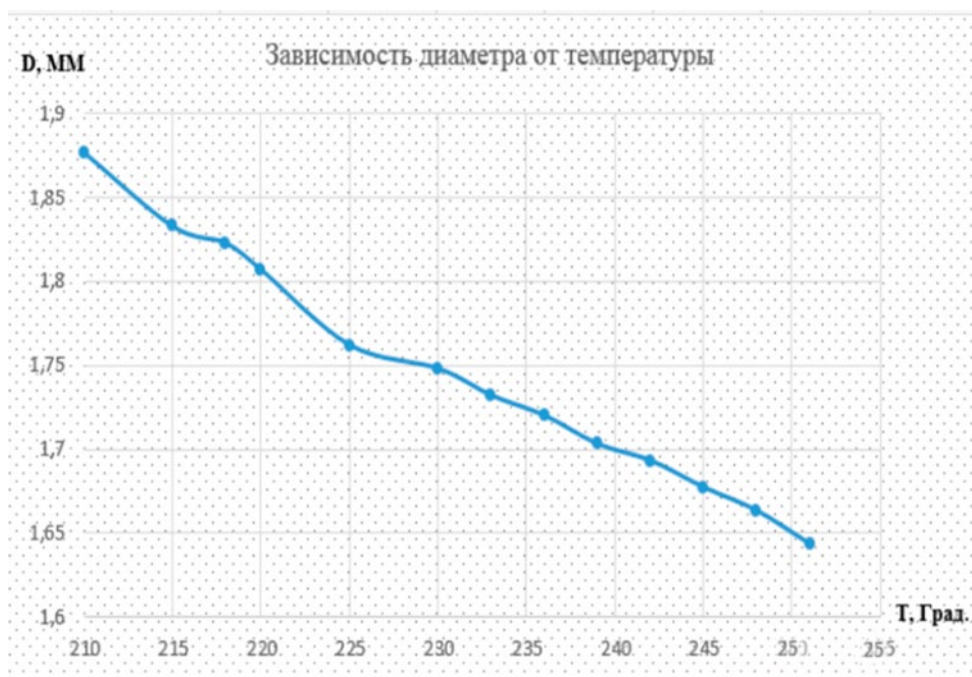
Запуск  Открыть  Консоль  Сохранить  Скачать код  Поделиться  Клавиатура  Настройки
199  int16_t At = 0;
200  for (uint8_t i = 0; i < 10; i++) At += analogRead(tsens_pin); //Усредняем
201  At /= 10; //10 последовательн
202
203  float Rt = 1023.0 / At - 1;
204  Rt = thermo_r / Rt;
205  float T;
206  T = Rt / thermistor_r;
207  T = log (T);
208  T /= thermo_b;
209  T += 1 / (t_nominal + 273.15);
210  T = 1 / T;
211  T -= 273.15;
212  int xx;
213  xx = T;
214  return xx;
215  }
216  //-----
217  void PID_heater (void) {
218  //heater_current_temp = GetTemp ();
219  regulator.input = heater_current_temp; // сообщаем регулятору текущую темп
220  pwr = regulator.getResultTimer();
221  analogWrite(heater_pin, pwr);
222  if (pwr>0) {heater_logo = true;} else {heater_logo = false;};
223  }
224  //-----
225  //

```

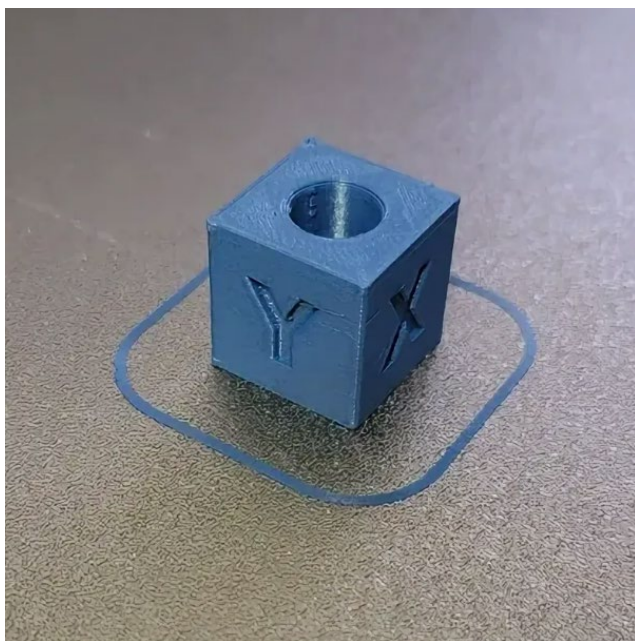
Приложение 3: Исходный код программы для микроконтроллера Arduino, управляющего установкой.



Приложение 4: Фотографии этапов работы над созданием установки.



Приложение 5: Графики зависимости качества филамента от температуры плавления и скорости подачи.



Приложение 6: Калибровочный кубик