

Разработка математической модели установки автоматизированной линии по получению исходного сырья из вторичных полимерных материалов для технологии послойного наплавления

Ш.С. Нозирзода✉, Т.-Б.Е. Мирзахмедов

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород, Российская Федерация

✉shoni_@mail.ru

Резюме

Для повышения производительности и обеспечения требуемой точности и качества выпускаемой продукции в технологическом процессе необходимо применять автоматизированные линии. Один из таких процессов – производство полимерной нити определяется возможностью применения вторичного сырья. В статье рассматриваются теоретические основы и моделирование установки автоматизированной линии для получения исходного сырья из вторичных полимерных отходов для технологии послойного наплавления. Целью данной работы является изучение динамических процессов установки для получения исходного сырья из вторичных полимерных материалов для технологии послойного наплавления. В соответствии с поставленными задачами в статье представлены разработка цифровой модели установки, а также математическая модель для исследования динамических процессов, которая реализована в программном продукте MatLab. Для моделирования установки составлена структурная схема, показывающая взаимосвязь между элементами системы. Определяются передаточная функция системы и амплитудно-частотные характеристики, позволяющие выявить рациональные параметры установки. Автоматизация процесса получения исходного материала для технологии послойного наплавления в виде полимерной проволоки из вторично переработанных отходов позволит уменьшить затраты на производство исходного материала и повысить производительность работ, сохраняя качественные показатели исходного материала, так как при вторичной переработке полимерные материалы изменяют свои физико-механические и химические свойства.

Ключевые слова

автоматизированная линия, моделирование, динамические процессы, вторичная переработка, качество продукции, исходное сырье, технология послойного наплавления

Для цитирования

Нозирзода Ш.С. Разработка математической модели установки автоматизированной линии по получению исходного сырья из вторичных полимерных материалов для технологии послойного наплавления // Ш.С. Нозирзода, Т.-Б.Е. Мирзахмедов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 32–40. DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).32-40.

Информация о статье

поступила в редакцию: 1.11.2022 г.; поступила после рецензирования: 16.03.2023 г.; принята к публикации: 17.03.2023 г.

Development of a mathematical model for the installation of an automatic line for obtaining feedstock from secondary polymeric materials for layer-by-layer deposition technologies

Sh.S. Nozirzoda✉, T.-B. E. Mirzakhmedov

Yaroslav the Wise Novgorod State University

✉shoni_@mail.ru

Abstract

In order to increase productivity and ensure the required accuracy and quality of products, automated lines must be used in the technological process. One of such processes is the production of a polymer line for additive technologies, namely for layer-by-layer deposition technology. For the production of polymer thread, the possibility of using secondary raw materials is being considered. The paper considers the development of theoretical foundations and modeling of the installation of an automated line for obtaining raw materials from secondary polymer waste for the technology of the layered direction. The purpose of this work is theoretical modeling, the development of a digital model and the study of the dynamic processes of the installation for obtaining raw materials from secondary polymer materials for the technology of the layer-by-layer deposition. According to the tasks set in the work, a digital model of the installation was developed, a mathematical model for the study of dynamic processes, which is implemented in the MatLAB software product. To simulate the installation, a block diagram has been compiled that shows the relationship between the elements of the system. The transfer function of the system and the amplitude-frequency characteristics

are determined, which made it possible to identify the rational parameters of the installation. Automation of the process of obtaining the source material for the technology of layer-by-layer deposition in the form of polymer wire from recycled waste will reduce the cost of producing the source material and increase productivity, while maintaining the quality indicators of the consumable material, since polymer materials change their physical, mechanical and chemical properties during recycling.

Keywords

automated line, modeling, dynamic processes, recycling, product quality, raw materials, layer-by-layer deposition technology

For citation

Nozirzoda Sh.S., Mirzakhmedov T-B.E. Razrabotka matematicheskoi modeli ustanovki avtomatizirovannoi linii po polucheniyu iskhodnogo syr'ya iz vtorichnykh polimernykh materialov dlya tekhnologii posloynogo naplavlenniya [Development of a mathematical model for the installation of an automatic line for obtaining feedstock from secondary polymeric materials for layer-by-layer deposition technologies]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77). pp. 32–40. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).32-40.

Article Info

Received: November 1, 2022; Revised: March 16, 2023; Accepted: March 17, 2023.

Введение

Процесс вторичной переработки полимерных отходов и создания новой продукции является довольно сложным. Первый фактор заключается в том, что отходы в виде полимеров представляют собой соединения, которые несовместимы друг с другом по термодинамическим свойствам. Вторым фактором является то, что большое количество полимеров – это композиционные материалы. Например, в состав многослойной пленочной упаковки входят слои бумаги, частицы металла [1].

Для улучшения качества вторичных полимеров их подвергают предварительной обработке. В зависимости от состояния отходов, их состава, степени деструкции и загрязненности они могут перерабатываться как смесь полимеров или разделяться на отдельные компоненты [1].

На данный момент направление аддитивных технологий, а именно 3D-печати по FDM-технологии стало широко распространяться и имеет большую сферу применения [2]. Свое применение оно нашло в создании прототипов, макетов, деталей, архитектурно-строительных объектов, медицинских изделий. На данный момент 3D-печать по FDM-технологии применяется во многих сферах деятельности. Встает острая проблема в изготовлении исходного материала по причине увеличения потребителей в данной сфере [3], возникает необходимость в обеспечении потребителей качественными и доступными расходным материалами для осуществления 3D-печати по FDM-технологии. Для повышения производительности процесса изготовления исходного материала из вторичного сырья необходимо применять современные средства автоматизации.

Анализ предшествующих работ показывает, что на данный момент существует необходимость в разработке автоматизированных линий по производству полимерной проволоки для технологии послойного наплавления. Автоматизация технологического процесса переработки и производства исходного материала (филамента) для технологии послойного наплавления повысит производительность при получении таких материалов и сократит производственные расходы.

Методика исследования

Целью работы является теоретическое моделирование, разработка цифровой модели и исследование динамических процессов установки для получения исходного сырья из вторичных полимерных материалов для технологии послойного наплавления. Объектом исследования являются конструктивные особенности данной установки.

Объектом исследования является конструктивные особенности установки для получения исходного сырья из вторичных полимерных материалов для технологии послойного наплавления.

Предметом исследования служит влияние основных параметров установки на динамические и частотные характеристики конструкции.

Методологическая база для выполнения данной работы включала: сравнительный анализ, моделирование, синтез, эксперимент, наблюдение, измерение, описание.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

– рассмотреть различные конфигурации автоматизированных линий и проанализировать

рациональный вариант конфигурации линии;

– разработать компоновочную схему автоматизированной линии и экструдера;

– разработать математическую модель для выявления частотных и динамических характеристик, обосновать оптимальные параметры установки;

– провести исследование по определению динамических характеристик установки.

Автоматизированную линию для переработки полимеров можно применять на предприятиях промышленного типа для изготовления исходного материала из переработанных вторичных материалов. Автоматизированная линия такого типа позволит получить качественные показатели для производимых полимеров и дистанционно управлять технологическим процессом. Она также может быть использована на предприятиях, занимающихся переработкой вторичного сырья с целью получения нового качественного материала.

Основными техническими параметрами [4], которые определяют количественные, качественные и стоимостные характеристики продукции являются:

1. Стабильность работы. Показывает, насколько установка на протяжении длительного времени работы сможет поддерживать заданные параметры как самих компонентов установки, так и производимого продукта.

2. Скорость переработки полимеров. Необходимо чтобы линия обладала высокой производительностью.

3. Способность линии к переработке различных видов полимеров. В сфере аддитивных технологий существует множество видов пластика. Одними из самых распространенных пластиков являются PLA (полилактид) и PET-G (полиэтилентерефталат-гликоль).

4. Температурный диапазон при нагревании. У каждого типа пластика есть своя рабочая температура плавления, необходимо чтобы установка могла обеспечивать как максимальную, так и минимальную температуру плавления, учитывая температуры плавления всех видов пластика.

Стандартный состав оборудования линии: одношнековый экструдер; гравиметрический, волюметрические дозирующие системы с различным количеством бункеров; фильтр-тестер; дозирующий насос для расплава; калибровочный инструмент; охлаждающие ванны; осушитель

филамента; лазерный контроль диаметра; вытяжное устройство; аккумулятор (компенсатор) филамента; намотчик филамента; панель оператора (контроль панель) 1–2 шт. [5–9].

Одним из главных компонентов в автоматической линии по производству полимерных материалов является экструдер. Подбор экструзионной установки определяется характеристиками перерабатываемого материала, а также требуемой производительностью на линии [9–12].

Производительность (Q , кг/с) экструдера можно определить по формуле (1):

$$Q = v \cdot T \cdot m \cdot i \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

где v – скорость приема нити, м/с; T – линейная плотность формируемой нити, текс; m – число формовочных устройств, обслуживаемых одним экструдером; i – число нитей, формируемых на каждом рабочем месте [13].

Общая технологическая схема вторичной переработки полимерных отходов включает в себя:

1. Дробление сырья. Эта операция позволяет подготовить полимер для дальнейших этапов очистки и смешивания. Высокое и равномерное качество дробления позволит повысить характеристики итогового сырья. Современные технологии предлагают измельчение полимеров с помощью охлаждения. Таким образом можно получить фракции от 0,5 до 2 мм.

2. Промывка. Измельченное сырье очищают от загрязнений в несколько этапов с использованием специальных моющих средств.

3. Высушивание. Перед нагревом необходимо просушить полученный и промытый порошок в центрифугах. Финальный процесс сушки проходит в специальных установках. На выходе влажность продукта составляет 0,2 %.

4. Подготовленное сырье попадает в экструзионную установку, где оно расплавляется и перемешивается, при необходимости на данном этапе добавляются присадки. На выходе получается продукт – пластиковая проволока или гранулят, в зависимости от типа установки.

5. Намотка. Наматывается готовое сырье в качестве нити на катушку. В работе рассматривается автоматизация технологической схемы вторичной переработки полимерных отходов и производства филамента (рис. 1).

Изучив источники [14–17], можно сформулировать функционально-конструктивные требования к автоматизированной линии данного типа:

- высокая надежность;
- унифицированная конструкция;
- высокая производительность;
- оптимальный диапазон рабочей температуры нагрева сырья;
- высокая скорость экструзии;
- высокая прочность и жесткость;
- экструдер должен быть оснащен фильтром для расплава сырья;
- наличие форсунок для протяжки проволоки диаметром 1,75 и 2,85 мм;
- применение в установке широко распространенных и сертифицированных комплектующих;
- наличие модульной компоновки с функцией «горячей» замены;
- наличие нескольких систем защиты от сбоя и аварийной остановки;
- наличие датчиков температуры, скорости, присутствия сырья.

Разрабатываемая автоматизированная система для переработки пластиковых отходов в

пластиковые нити, которые предпочтительно используются в 3D-печати, состоит из нескольких основных частей:

- шредер для измельчения крупных пластиковых отходов в пластиковые гранулы;
- конвейерные ленты для транспортировки измельченных пластиковых гранул;
- очистительные бассейны для удаления инородных тел;
- сушилки горячего воздуха для снижения воды в пластиковом грануляте после очистки;
- экструдер для формирования пластикового гранулята в пластиковые нити;
- автоматический механизм для намотки пластиковых нитей на специальные валики (рис. 2).

Пластиковые отходы, подлежащие переработке, сначала подают в шредер через бункер. По возможности используемые пластиковые отходы должны состоять не из разных видов пластика, а только из одного, чтобы не

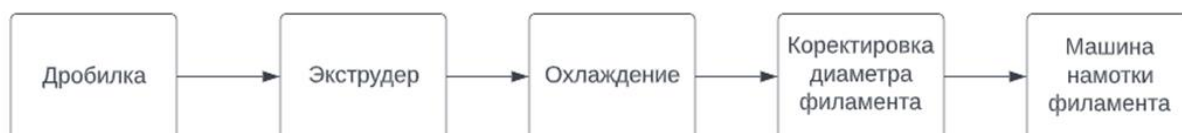


Рис. 1. Технологическая схема вторичной переработки полимерных отходов и производства филамента

Fig. 1. Technological scheme of polymer waste recycling and filament production

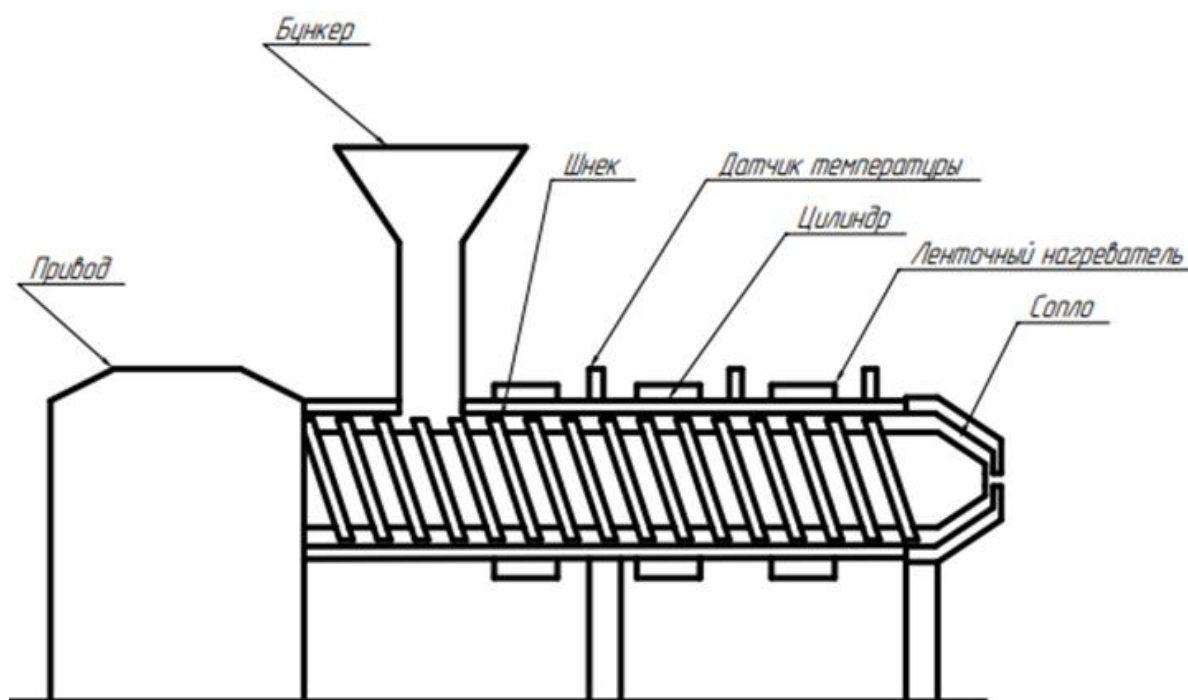


Рис. 2. Схема работы экструдера для переработки полимерного вторичного сырья

Fig. 2. Operation diagram of the extruder for processing polymer secondary raw materials

страдало качество последующего продукта. Измельченные в шредере пластиковые детали, которые теперь имеют вид гранул, транспортируются дальше по конвейеру до бассейна, где они очищаются от инородных тел. После очистки гранулы транспортируются на другой конвейер для сушки. В специальной сушилке, в которую гранулы поступают через бункер, содержание жидкости уменьшается под воздействием горячего воздуха. После сушки очищенные и высушенные гранулы поступают непосредственно в экструдер, где они расплавляются и формируются в нити. По мере выхода из экструдера через сопло нить охлаждается. Это предотвращает ее деформацию, которая может повлиять на качество готовой нити. С помощью автоматического механизма охлажденная нить наматывается на специальные валики. Когда на валик намотано максимальное количество нити, валик автоматически заменяется пустым.

Одним из главных компонентов автоматизированной линии является экструдер, который осуществляет технологическую схему (рис. 3). В связи с этим очень важно изучение его динамических процессов во время работы, поэтому более подробно рассматривается конструкция экструдера как технологического инструмента для производства филамента.

Для изучения динамических процессов конструкции необходимо рассмотреть ее схему более подробно, определить параметры вибрационной системы. Также нужно описать массу каждого элемент, обобщить и разработать схему установки.

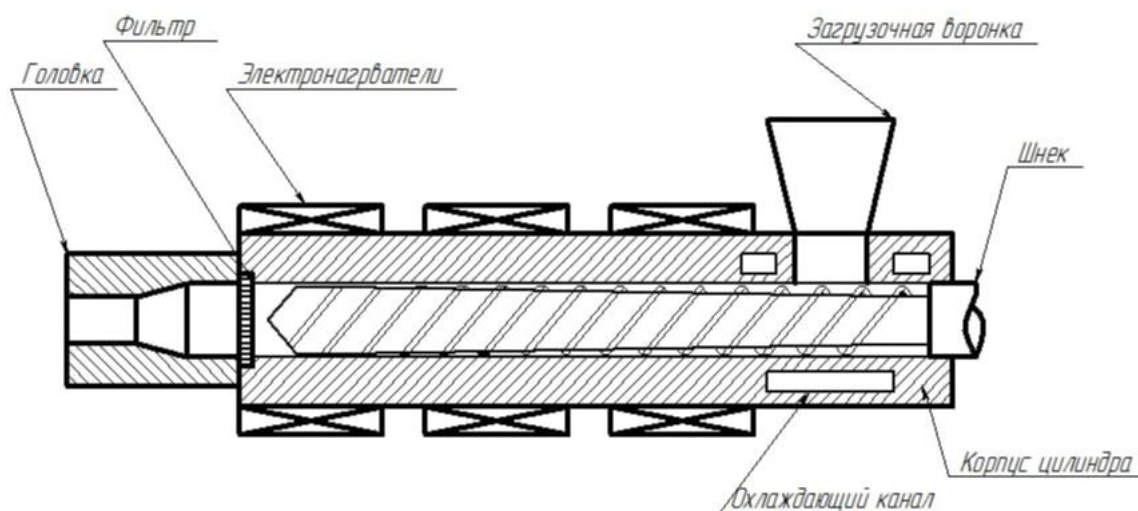


Рис. 3. Схема конструкции экструдера
Fig. 3. Design diagram of the extruder

Результаты исследования

Для правильного выбора рациональных вариантов параметров установки рассмотрим его в качестве двухмассовой вибрационной системы (рис. 4).

В системе m_1 – корпус установки, жестко скрепляемый с остальными элементами. Масса m_2 – шнек, который соединяется с корпусом.

В данной системе сила F является внешней силой для тела с массой m_2 и ее значение принимаем как постоянное. Силы сопротивления – сила упругости F_{c1} и демпфирование F_{h1} . Сила, которая служит силой сопротивления для массы m_2 , является также внешним воздействием для тела с массой m_1 . В данном случае сила F_{ext} – сила сопротивления для массы m_1 , при этом сила F_{ext} будет переменной.

Исходя из расчетной схемы баланса каждого тела можно составить следующие дифференциальные уравнения:

– для первой массы –

$$F_{cext} = F_{c1} + F_{m1} + F_{h1},$$

$$C_{ext} \cdot (X_{ext1} - X) = C_1 \cdot (X_1 - X_2) + h_1 \cdot (V_1 - V_2) + m_2 \cdot a_1,$$

$$a_1 = \frac{C_{ext} \cdot (X_{ext1} - X_1) - C_1 \cdot (X_1 - X_2) - h_1 \cdot (V_1 - V_2)}{m_1},$$

– для второй массы –

$$F_{c1} + F_{h1} = F_{m2} + F_t;$$

$$C_1 \cdot (X_1 - X_2) + h_1 \cdot (V_1 - V_2) = m \cdot a_2 + h_2 \cdot V_2,$$

$$a_2 = \frac{C_1 \cdot (X_1 - X_2) + h_1 \cdot (V_1 - V_2) - F_t}{m_2}.$$

Составляем систему дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx_1}{dt} = V_1; \\ \frac{dV_1}{dt} = \frac{C_{ext} \cdot (X_{ext} - X_1) - C_1 \cdot (X_1 - X_2) - h_1 \cdot (V_1 - V_2)}{m_1}; \\ \frac{dx_2}{dt} = V_2; \\ \frac{dV_2}{dt} = \frac{C_1 \cdot (X_1 - X_2) + h_1 \cdot (V_1 - V_2) - F_t}{m_2}. \end{array} \right.$$

Полученные дифференциальные уравнения решаем с помощью составленной программы в среде MatLab.

Выбираем параметры: $m_1 = 50$ кг; m_2

$= 200$ кг; $C_1 = 70\,000$ Н/м; $C_{ext} = 40\,000$ Н/м; $h_1 = 10$ Н · с/м; $F_t = 50$ Н; $A = 0,004$ м; $f_w = 60$ Гц; $X_{ext} = A \cdot \sin \omega t$.

По формуле угловой скорости находим собственную частоту каждого тела:

$$f_{соб.1} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{C_{ext} + C_1}{m_1}},$$

$$f_{соб.2} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{C_1}{m_2}}.$$

По составленным системам дифференциальных уравнений получим графики перемещений и скоростей первого и второго тела (рис. 5).

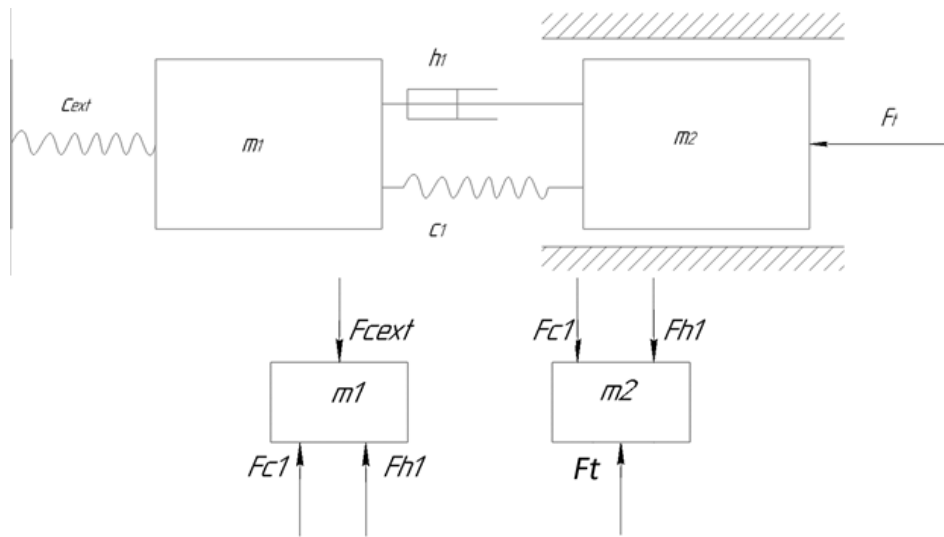


Рис. 4. Расчетная схема для моделирования
Fig. 4. Calculation scheme for modeling

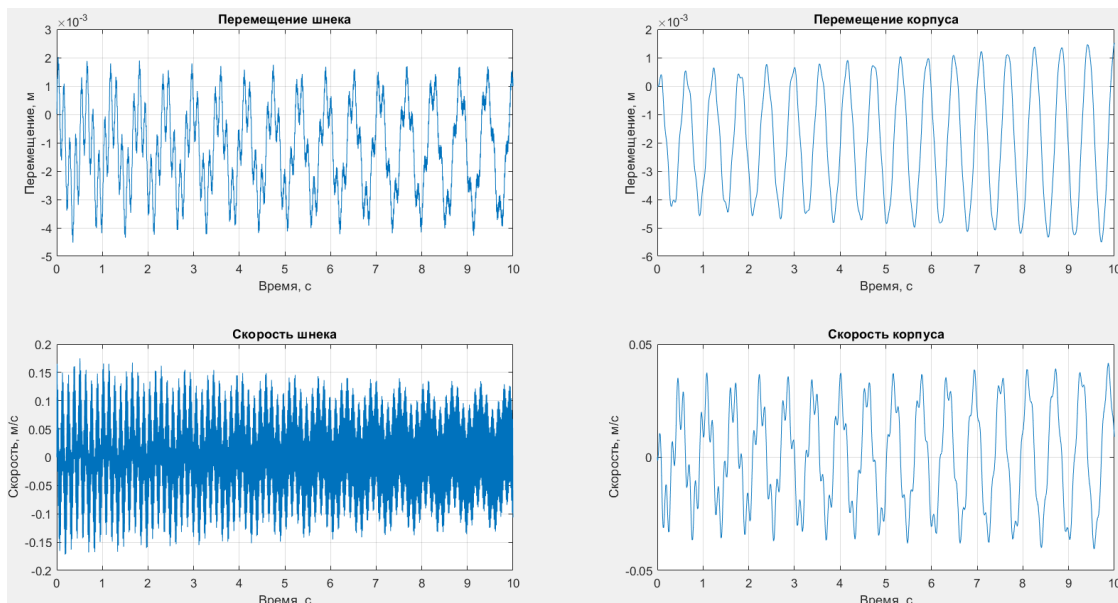


Рис. 5. Графики перемещения и скорости шнека и корпуса экструдера
Fig. 5. Graphs of the movement and speed of the screw and the extruder body

Проведен анализ параметров, которые влияют на амплитуду колебания второго тела. С изменением C_{ext} и F_t изменяется амплитуда колебания второго тела. При исследовании системы было выявлено, что при повышении жесткости пружины увеличивается амплитуда колебания второго тела. Также при росте коэффициента демпфирования уменьшается амплитуда колебания второго тела. Оптимальные параметры для данной системы $C_{ext} = 40\,000$ Н/м, $h = 100$ Н · с/м.

В данной работе также были выявлены амплитудно-частотные характеристики двухмассовой вибрационной системы. Для определения амплитудно-фазовой и частотной характеристики данной системы необходимо составить передаточную функцию и описать заданными параметрами. Передаточной функцией системы называется отношение выходной величины к входной, представленных в операторной форме или в функции комплексного переменного p .

Для определения амплитудно-фазовых частотных характеристик системы необходимо найти передаточную функцию [18]:

$$W(p) = \frac{X_2}{X_{ext}}$$

$$\begin{cases} C_{ext} \cdot (X_{ext} - X_1) = C_1 \cdot (X_1 - X_2) + h_1 \cdot (V_1 - V_2) + m_1 \cdot a_1 \\ C_1 \cdot (X_1 - X_2) + h_1 \cdot (V_1 - V_2) = h_2 \cdot V + m_2 \cdot a_2. \end{cases}$$

$$V = pX, \quad \frac{d}{dt} X = pX.$$

$$\begin{cases} C_{ext} \cdot (X_{ext} - X_1) = C_1 \cdot (X_1 - X_2) + h_1 \cdot (pX_1 - pX_2) + m_1 \cdot p^2 \cdot X_1 \\ C_1 \cdot (X_1 - X_2) + h_1 \cdot (pX_1 - pX_2) = m_2 \cdot p^2 \cdot X_2 + h_2 \cdot pX_2. \end{cases} \quad (2)$$

Из второго уравнения системы (2) находим X_1 :

$$X_1 = \frac{m_2 \cdot p^2 \cdot X_2 + h_2 \cdot pX_2 + C_1 X_2 + h_1 pX_2}{C_1 + h_1 p}.$$

Подставляем X_1 в первое уравнение и находим $\frac{X_2}{X_{ext}}$:

$$W(p) = \frac{X_2}{X_{ext}} = \frac{C_{ext} \cdot C_1 + h_1 \cdot p \cdot C_{ext}}{\begin{bmatrix} m_1 m_2 p^4 + h_2 m_2 p^3 + \\ + h_2 \cdot m_1 \cdot p + h_1 m_1 p - \\ - C_1 h_2 p m_2 + h_1 p X_1 + m_1 p^2 + \\ + C_{ext} - (C_1 + h_1 \cdot p^2) \end{bmatrix}}$$

Введем все данные в программный продукт MatLab и получим амплитудно-

частотные характеристики системы, которые показывают ее устойчивость при оптимальных параметрах (рис. 6).

Заключение

В работе предложен рациональный вариант схемы компоновки конструкции автоматизированной линии. После анализа особенностей конструкции экструдера была разработана расчетная схема для разработки математической модели.

Конструкция экструдера рассматривалась как двухмассовая система для изучения динамических характеристик. Исследуя динамические характеристики двухмассовой системы с помощью программного продукта MatLab, можно оптимизировать параметры технологической системы. Необходимо отслеживать частоты технологического оборудования, чтобы они не совпадали. Полученные графики перемещений и скоростей корпуса и шнека показывают, что выбранные в ходе анализа параметры удовлетворяют условиям компоновки экструдера.

В ходе работы был проведен спектральный анализ и определены амплитудно-частотные характеристики для конструкции экструдера как двухмассовой системы. Из графиков амплитудно-фазовых частотных характеристик видно, что данная динамическая система является устойчивой.

Таким образом, свойства конечной продукции в процессе вторичной переработки полимеров зависят от исходного полимера, метода переработки и числа циклов переработки, а также от наличия кислорода в среде и добавления стабилизаторов. Автоматизация данного процесса обеспечивает качественные показатели вторичного сырья из полимеров и позволяет регулировать основные свойства полимеров при вторичном использовании, что способствует повышению качества исходного материала.

Линия автоматизированной переработки вторичных полимеров будет использоваться на заводах и фабриках, связанных с производством упаковки, бытовых и промышленных полимерных изделий. Рециклинг пластмасс является сложным, но необходимым технологическим процессом. Автоматизация всех этапов данного процесса удешевляет и стабилизирует качество получаемого материала.

Список литературы

1. Лобанов В.С., Емельянов А.Н. Проблемы строительства на набухающих глинистых грунтах // Молодежь и наука : сб. материалов VIII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск, 2012. С. 423–427.
2. Всё о 3D-печати. Аддитивное производство. Основные понятия // 3D TODAY : сайт : URL: https://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology (Дата обращения: 10.10.2022).
3. Рынок технологий 3D-печати в России и мире: перспективы внедрения аддитивных технологий в производство // 3D TODAY : сайт : URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/rynok-tekhnologii-3d-pecati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tekhnologii-v-proizvodstvo> (Дата обращения: 10.10.2022).
4. Машины серии Scientific для переработки полимеров: лабораторные и пилотные линии // LabTech Engineering : сайт. URL: <http://labtechengineering.ru/assets/catalog.pdf> (Дата обращения: 10.10.2022).
5. Устройства для экструдирования полимеров // Современные технологии производства. Ehtxe.com : сайт. URL: <https://extxe.com/7186/ustrojstva-dlja-jekstrudirovaniya-polimerov/#1> (Дата обращения: 10.10.2022).
6. Еренков О.Ю., Исаев С.П., Яворский Д.О. Модернизированное устройство для вторичной переработки полимеров // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 6. С. 7–9.
7. Койфман Г.А., Нозирзода Ш.С. Переработка вторичного сырья из полимера для 3D-печати // Химия. Экология. Урбанистика. 2021. Т. 1. С. 319–324.
8. Пат. 156861 Рос. Федерация. Экструдер для переработки вторичных полимеров / В.В. Дядичев, А.В. Колесников. № 2015122964/05 ; заявл. 15.06.2015 ; опубл. 20.11.2015, Бюл. №32. 1 с.
9. Хрулев А.К. Современные технологии переработки вторичных полимеров // Сборник материалов III Молодежно-го Экологического Форума. Кемерово, 2015. С. 81.
10. Лутфуллаев С.Ш., Бекназаров Э.М. Исследование физико-химических и механических свойств полимеров из промышленных отходов при их вторичной переработке // Universum: технические науки. 2021. № 12-4(93). С. 80–83.
11. Бекназаров Э.М., Лутфуллаев С.Ш., Сайдалов Ф.М. Исследование ИК-спектры при переработке вторичных полимеров // Universum: технические науки. 2021. № 5-4(86). С. 24–29.
12. Синева Н.В., Макеев П.В., Беляев П.С. Разработка технологии и оборудования по вторичной переработке отходов полимеров // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент : материалы IX Междунар. науч.-инновац. молодеж. конф. Тамбов, 2017. С. 161–163.
13. Процессы и оборудование производства волокнистых и пленочных материалов / И.Н. Жмыхов, Л.С. Гальбрайт, А.В. Акулич и др. Минск : Выш. шк., 2013. 587 с.
14. Петрушева Н.А., Алашкевич Ю.Д., Чистова Н.Г. Математическая модель процесса обработки вторичного волокна в производстве древесноволокнистых плит // Химия растительного сырья. 2002. № 4. С. 49–53.
15. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор) часть 2. Автоматизированная выкладка волокон (AFP) / П.Н. Тимошков, В.А. Гончаров, М.Н. Усачева и др. // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). С. 117–127.
16. Сорокин К.Н., Сорокин Н.Т., Пестряков Е.В. Современные подходы к автоматизации и цифровизации оборудования при разработке технологических линий // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67. № 4 (41). С. 96–103.
17. Автоматизация технологической линии и качество продукции / Р. Ганжав, П. Алтанцээг, Д. Батдулам и др. // Проблемы механики современных машин : материалы VI Междунар. конф. Улан-Удэ, 2015. Т. 1. С. 41–44.
18. Разработка эталонных передаточных функций систем / Ю.П. Добрабаба, А.Г. Мурлин, В.А. Мурлина и др. // Изв. высш. учеб. заведений. Пищевая технология. 2000. № 1(254). С. 86–88.

References

1. Lobanov V.S., Emelyanov A.N. Problemy stroitel'stva na nabukhayushchikh glinistykh gruntakh [Problems of construction on swelling clay soils]. *Materialy VIII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh «Molodezh' i nauka»* [Proceedings of the VIII All-Russian Scientific-technical conf. of students, postgraduates and young scientists «Youth and science»]. Krasnoyarsk, 2012, pp. 423–427.
2. Vse o 3D-pečati. Additivnoe proizvodstvo. Osnovnye ponyatiya (Elektronnyi resurs) [All about 3D printing. Additive manufacturing. Basic concepts (Electronic resource)]. Available at: https://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology (Accessed October 10, 2022).
3. Rynok tekhnologii 3D-pečati v Rossii i mire: perspektivy vnedreniya additivnykh tekhnologii v proizvodstvo (Elektronnyi resurs) [3D printing technology market in Russia and the world: prospects for the introduction of additive technologies into production (Electronic resource)]. Available at: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/rynok-tekhnologii-3d-pecati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tekhnologii-v-proizvodstvo> (Accessed October 10, 2022).
4. Mashiny serii Scientific dlya pererabotki polimerov: laboratornye i pilotnye linii (elektronnyi resurs) [Scientific series machines for polymer processing: laboratory and pilot lines (Electronic resource)]. Available at: <http://labtechengineering.ru/assets/catalog.pdf> (Accessed October 10, 2022).
5. Ustroistva dlya ekstrudirovaniya polimerov (Elektronnyi resurs) [Devices for polymer extrusion (Electronic resource)]. Available at: <https://extxe.com/7186/ustrojstva-dlja-jekstrudirovaniya-polimerov/#1> (Accessed October 10, 2022).
6. Erenkov O.Yu., Isaev S.P., Yavorskii D.O. Modernizirovannoe ustroistvo dlya vtorichnoi pererabotki polimerov [Modernized device for recycling polymers]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair. Recovery. Modernization], 2020, no. 6, pp. 7–9.
7. Koifman, G.A., Nozirzoda Sh.S. Pererabotka vtorichnogo syr'ya iz polimera dlya 3D-pečati [Processing of second-

ary raw materials from polymer for 3D printing]. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika* [Chemistry. Ecology. Urbanistics], 2021, vol. 2021-1, pp. 319–324.

8. Dyadichev V.V., Kolesnikov A.V. Patent RU 156861 U1, 20.11.2015.

9. Khrulev A.K. Sovremennyye tekhnologii pererabotki vtorichnykh polimerov [Modern technologies of secondary polymer processing]. *Sbornik materialov III Molodezhnogo Ekologicheskogo Forum* [Proceedings of the III Youth Environmental Forum]. Kemerovo, 2015, pp. 81.

10. Lutfullaev S.S., Beknazarov E.M. Issledovanie fiziko-khimicheskikh i mekhanicheskikh svoystv polimerov iz promyshlennykh otkhodov pri ikh vtorichnoi pererabotke [Investigation of physic-chemical and mechanical properties of polymers from industrial waste during their recycling]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: technical sciences], 2021, no. 12-4 (93), pp. 80–83.

11. Beknazarov E.M., Lutfullaev S.S., Saidalov F.M. Issledovanie IR-spektry pri pererabotke vtorichnykh polimerov [Investigation of IR-spectra in the processing of secondary polymers]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: technical sciences], 2021, no. 5-4 (86), pp. 24–29.

12. Sineva N.V., Makeev P.V., Belyaev P.S. Razrabotka tekhnologii i oborudovaniya po vtorichnoi pererabotke otkhodov polimerov [Development of technology and equipment for recycling polymer waste]. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-innovatsionnoi molodezhnoi konferentsii «Sovremennyye tverdogaznyye tekhnologii: teoriya, praktika i innovatsionnyy menedzhment»* [Proceedings of the IX International Scientific and Innovative Youth Conference «Modern solid-phase technologies: theory, practice and innovation management»]. Tambov, 2017, pp. 161–163.

13. Zhmykhov I.N., Gal'braikh L.S., Akulich A.V., Shcherbina L.A., Sorokin F.A. Protsessy i oborudovanie proizvodstva voloknistykh i plenochnykh materialov [Processes and equipment for the production of fibrous and film materials]. Minsk: Vysheishaya shkola Publ., 2013. 587 p.

14. Petrusheva N.A., Alashkevich Yu.D., Chistova N.G. Matematicheskaya model' protsessa obrabotki vtorichnogo volokna v proizvodstve drevsnovoloknistykh plit [Mathematical model of the process of processing secondary fiber in the production of fiberboard]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of vegetable raw materials], 2002, no. 4, pp. 49–53.

15. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrul'kov A.V. Razvitie avtomatizirovannoi vykladki: ot istokov do nashikh dnei (obzor) chast' 2. Avtomatizirovannaya vykladka volokon (AFP) [Development of automated layout: from the origins to the present day (review) part 2. Automated fiber layout (AFP)]. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and Technologies], 2021, no. 3 (64), pp. 117–127.

16. Sorokin K.N., Sorokin N.T., Pestryakov E.V. Sovremennyye podkhody k avtomatizatsii i tsifrovizatsii oborudovaniya pri razrabotke tekhnologicheskikh liniy [Modern approaches to automation and digitalization of equipment in the development of technological lines]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK* [Electrotechnologies and electrical equipment in the agro-industrial complex], 2020, vol. 67, no. 4 (41), pp. 96–103.

17. Ganzhav R., Altantsyseg P., Batdulam D., Huhuu D. Avtomatizatsiya tekhnologicheskoi linii i kachestvo produktsii [Automation of the technological line and product quality]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi konferentsii «Problemy mekhaniki sovremennykh mashin»* [Proceedings of the VI International Conference «Problems of Mechanics of modern machines»], Ulan-Ude, 2015, vol. 1, pp. 41–44.

18. Dobrobaba Yu.P., Murlin A.G., Murlina V.A., Koshkin G.A., Akulov O.V., Grigor'ev V.V. Razrabotka etalonnykh pereda-tochnykh funktsii sistem [Development of reference transfer functions of systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Pishchevaya tekhnologiya* [Bulletins of higher educational organization. Food technology], 2000, no. 1 (254), pp. 86–88.

Информация об авторах

Нозирзода Шодмон Салохидин, аспирант кафедры промышленных технологий, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород; e-mail: shoni_1997@mail.ru.

Мирзахмедов Темир-Бек Эркинович, кафедра автоматизации технологических процессов и производств, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород; e-mail: s245228@std.novsu.ru.

Information about the authors

Shodmon S. Nozirzoda, Ph.D. Student of the Department of Industrial Technologies, Yaroslav the Wise Novgorod State University, Veliky Novgorod; e-mail: shoni_1997@mail.ru.

Temir-Bek E. Mirzakhmedov, Department of Automation of technological processes and productions, Yaroslav the Wise Novgorod State University, Veliky Novgorod; e-mail: s245228@std.novsu.ru.