

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-45-58>

Разработка системы управления технологической линией для производства изделий из вспененного полистирола

И. А. Рыбин¹, А. В. Рыбина¹ ✉

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: anna.vasilevna@mail.ru

Резюме

Цель исследования. При проектировании новых и модернизации существующих систем управления процессом вытягивания полимеров важную роль играет решение задач создания математических или имитационных моделей и синтеза алгоритмов управления, обеспечивающих снижение доли ручного труда. В статье приведен обзор подходов к разработке и моделированию систем автоматизированного управления экструзионными технологическими линиями производства изделий из полимеров. Рассмотрена возможность разработки и моделирования многомерной системы управления процессом вытягивания вспененного полистирола на основе пакета математического анализа Matlab. Актуальность темы исследования связана с тенденцией роста рынка потребления и реализации управления в условиях создания более сложных форм упаковки из полимеров.

Методы. Для разработки системы управления и ее анализа применены основы теории многомерных систем в задачах управления, теории переработки пластических масс, методы компьютерного моделирования систем управления.

Результаты. В статье представлен алгоритм управления процессом формования и его реализация в среде Simulink. Приведены и проанализированы графики изменения скорости вытягивания и скорости намотки, изменения толщины и натяжения полотна во времени. Представлена схема автоматизации технологической линии на основе разработанного алгоритма.

Заключение. Результаты тестирования модели показывают, что применение математического моделирования системы управления вытягиванием полотна пенополистирола возможно для решения вопроса повышения эффективности производства на действующем оборудовании, что и позволит приблизить их характеристики к новым технологическим линиям, оставив механическую часть без изменений. Значимость работы обусловлена тем, что применение современных систем управления позволяет улучшить качество изготавливаемой продукции, снизить расход сырья. Материалы и методики исследования могут быть применены при разработке проектов для других установок, например при производстве оптического полотна.

Ключевые слова: экструзия; полимеры; виртуальная модель; процесс формования; система управления; Matlab.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Для цитирования: Рыбин И. А., Рыбина А. В. Разработка системы управления технологической линией для производства изделий из вспененного полистирола // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(1): 45-58. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-45-58>.

Поступила в редакцию 16.01.2023

Подписана в печать 12.03.2023

Опубликована 14.04.2023

Введение

Процесс получения изделий из полимеров известен с первой половины двадцатого века, промышленность требует все более развитых технологий и глубоких познаний в области применения пластмасс, пищевой и фармацевтической промышленности. Однако до сих пор имеется только ограниченная информация об аналитических вычислениях в области экструзии. Решения по управлению, принимаемые операторами на основе субъективной визуальной оценки качества экструдата, приводят к увеличению времени перенастройки линий, снижению производительности, повышению доли брака и энергозатрат. Как правило, производство выполняется на основе эмпирического опыта и методов проб и ошибок. Тем не менее современные технологии позволяют развивать промышленные операции на порядок лучше и быстрее благодаря моделированию соответствующих процессов, где экструзионный поток расплавов полимеров и волокон уже был подвергнут предварительным исследованиям. В связи с возрастанием функциональных возможностей вычислительной техники и совершенствованием программных средств становится возможным развитие новых подходов к управлению комплексами экструдеров. При этом важно учитывать, что большая часть дефектов готовых из-

делий вызвана отклонениями от оптимального режима формования. Решение данной задачи возможно с помощью разработки математических моделей систем управления объектами, обеспечивающих заданное качество изделий при выполнении требований к производительности. Математическое моделирование необходимо для предварительной настройки и оценки эффективности разработанного алгоритма управления. Кроме того, процесс производства изделий из пенополистирола может быть организован как полностью замкнутый безотходный контур, что очень важно с точки зрения экологической безопасности. Таким образом, целью данного исследования является повышение качества вырабатываемой продукции за счет автоматизации процесса формования вспененной полистирольной ленты с использованием методов математического моделирования.

Для повышения точности вытягивания и уменьшения издержек на производстве необходимо исследование параметров вытягивания. Известно большое количество научных работ по исследованию параметров и получению математических моделей экструдера¹ [1-5]. Так в работе [2] определена пере-

¹ Сагиров С.Н. Мехатронный комплекс экструзионной обработки полимеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Владимир, 2012. 17 с.

даточная функция экструдера между выходным давлением и угловой скоростью вращения червяка относительно рабочей точки устройства и представлена структурная схема согласно полученным уравнениям. Исходя из анализа работ, определены физико-химические свойства экструзионного процесса, но задача обобщенного представления экструдера как объекта управления остается нерешенной. Из литературных данных получены графики зависимостей температур в зонах экструдера. Физические процессы, протекающие при вытягивании пенополистирола, подобны процессам, происходящим при вытягивании оптического волокна. Проблемам разработки математических моделей процесса экструзии посвящены работы ряда авторов: Беляевой Н. А., Прянишниковой Н. А., Орлова С. П., Соколовой Т. В.¹ и др.² [6-8]. Вопросы совершенствования систем автоматизированного управления экструзионными процессами остаются актуальными, так в работе¹ определены коэффициенты передачи от скоростей вытяжки и подачи и представлена система управления на базе сервоприводов с двумя контурами «скорость вытягивания-диаметр полот-

на» и «скорость подачи-диаметр полотна» для низкоскоростного и высокоскоростного режима. По итогам обзора литературных источников были подобраны параметры экструдера, определены графики зависимостей коэффициентов передачи от скоростей вытяжки и подачи. В настоящей работе будет представлена двумерная компьютерная модель зоны формирования полотна из вспененного полистирола, реализованная в системе Matlab/Simulink, и схема автоматизации процесса управления для исследуемого предприятия.

Материалы и методы

Технологический процесс производства упаковок из пенополистирола на предприятии включает циклическое повторение следующей последовательности этапов: получение смеси из нового и вторичного полистирола, добавление в смесь изобутана и вытягивание, намотка в рулоны, отстаивание рулонов, размотка рулонов, формование, прокол форм, вырубка форм, дробилка остатков, регланулирование остатков (рис. 1). Основным технологическим оборудованием для переработки полимеров в упаковки с помощью метода экструзии являются двухшнековые экструдеры [9]. Экструдер 1 предназначен для смешивания гранул нового и вторичного полистирола, в экструдер 2 подаётся смесь из предыдущего экструдера и газ для смешивания и последующего вытягивания. Экструдер комплектуется электроприводными системами на

¹ Соколова Т.В. Исследование и разработка двумерной системы управления процессом формования оптических волокон на базе интеллектуальных сервоприводов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 16 с.

² Терлыч А.Е. Модели и алгоритмы управления процессом экструзии полимеров при производстве кабелей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2013. 16 с.

базе асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором. Основные регулируемые технологические параметры экструдера – это частота вращения червяка и продольное распределение температур, заданное на цилиндре. Для газации исходного материала используется изобутан высшей марки, который подается для смешивания с прилегающей территории предприятия. Получившийся лист полистирола нама-

тывается намотчиком в рулоны. Полученные рулоны складироваются в зоне промежуточного хранения для испарения газов из рулонов. После отстаивания рулоны поставляются на размотчик для дальнейшего формирования. Процесс получения готовых упаковок происходит на трёх этапах: узел формования, узел прокалывания, узел вырубki (см. рис. 1). Остатки после вырубki форм подаются в дробилку.



Рис. 1. Схема цикла производства упаковок из вспененного полистирола на предприятии

В рамках данного исследования получим многомерную математическую модель зоны формирования рулонов [10]. Из анализа технологического процесса можно сделать вывод, что основными параметрами управления являются обеспечение стабильности диаметра и натяжения полотна, которые влияют на основные показатели качества. Изменение толщины полотна полистирола определяется формулой

$$h(t) = \frac{Q(t)}{v(t) \cdot B},$$

где $Q(t)$ – объёмный расход полимера на выходе из экструдера, м³/с; $v(t)$ – скорость намотки полотна пенополистирола, м/с; B – ширина данного полотна, м.

Функция изменения натяжения полотна может быть представлена:

$$F(t) = \int_0^t k \cdot \left(\frac{Q(t)}{h(t) \cdot B} - v_H(t) \right) dt,$$

где $v_H(t)$ – скорость намотки полотна, м/с.

Получим передаточные функции при входе $v = \text{const}$. Передаточная функция толщины полотна:

$$h(t) = \frac{Q(t)}{v \cdot B}, \quad W_1(s) = \frac{1}{v \cdot B} \frac{Q(s)}{h(s)}.$$

Передаточная функция натяжения полотна:

$$F(t) = \left(\frac{Q(t)}{h(t) \cdot B} - v \right) \cdot \frac{1}{s},$$

$$W_2(s) = \frac{\frac{1}{B} \frac{Q(s)}{h(s)} - v}{s \cdot F(s)} = \frac{1}{B} \cdot \frac{Q(s)}{s \cdot F(s) \cdot h(s)} - v \cdot \frac{1}{s \cdot F(s)}.$$

Получим передаточные функции при входе $Q = \text{const}$.

Передаточная функция толщины полотна:

$$h(t) = \frac{1}{v(t)} \cdot \frac{Q}{B},$$

$$W_1(s) = \frac{\frac{Q}{B} \cdot \frac{1}{v(s) \cdot h(s)}}{h(s)} = \frac{Q}{B} \cdot \frac{1}{v(s) \cdot h(s)}.$$

Передаточная функция натяжения полотна:

$$F(t) = \left(\frac{Q(t)}{h(t) \cdot B} - v(t) \right) \cdot \frac{1}{s},$$

$$W_2(s) = \frac{\frac{Q}{B} \frac{1}{h(s)} - v(s)}{s \cdot F(s)} = \frac{Q}{B} \cdot \frac{1}{s \cdot F(s) \cdot h(s)} - \frac{v(s)}{s \cdot F(s)}.$$

На основе полученной математической модели была разработана компьютерная модель системы управления вытягиванием полотна полистирола в среде Matlab/Simulink (рис. 2). Применение Matlab позволит отладить алгоритм управления до внедрения на предприятии [11-13]. Общая имитационная модель включает в себя семь блоков Scope и семь блоков Subsystem.

На рис. 3 представлена модель подсистемы двигателя оборудования технологической линии [14, 15]. Подсистема расчета отклонения текущей толщины полотна полистирола от заданной представлена на рис. 4.

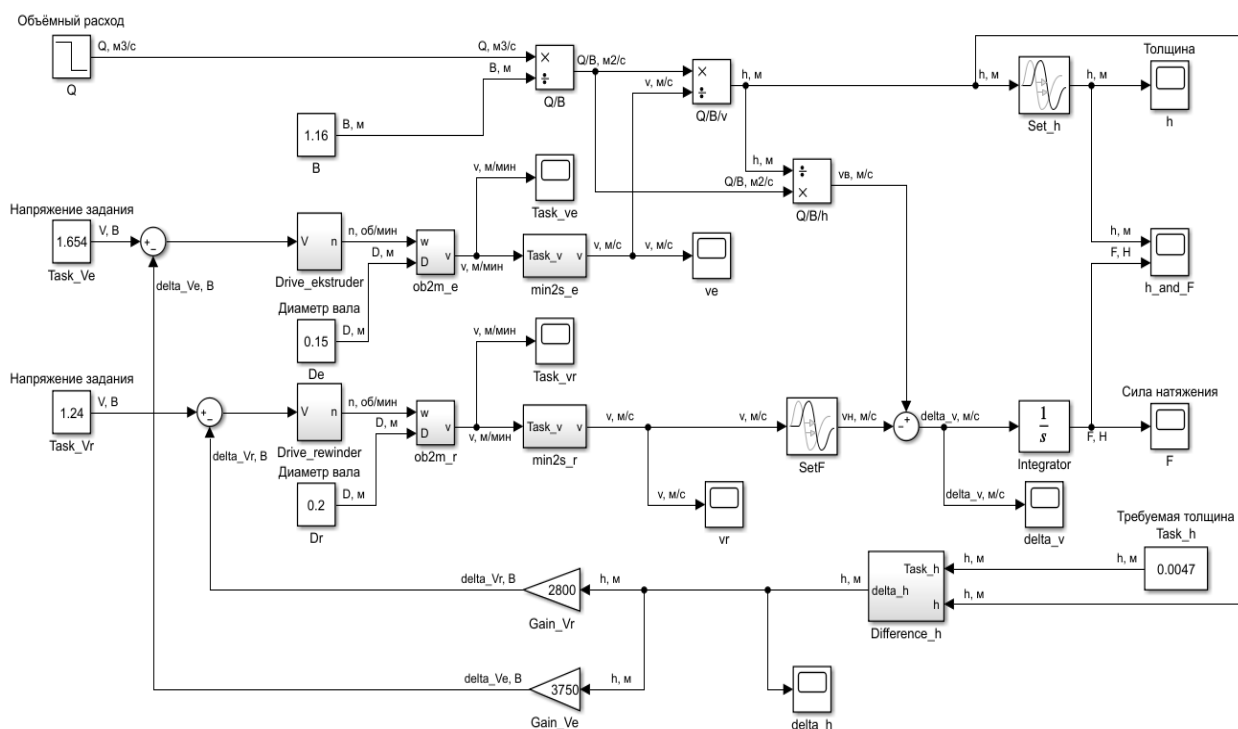


Рис. 2. Математическая модель системы управления вытягиванием вспененного полистирола в Matlab/Simulink

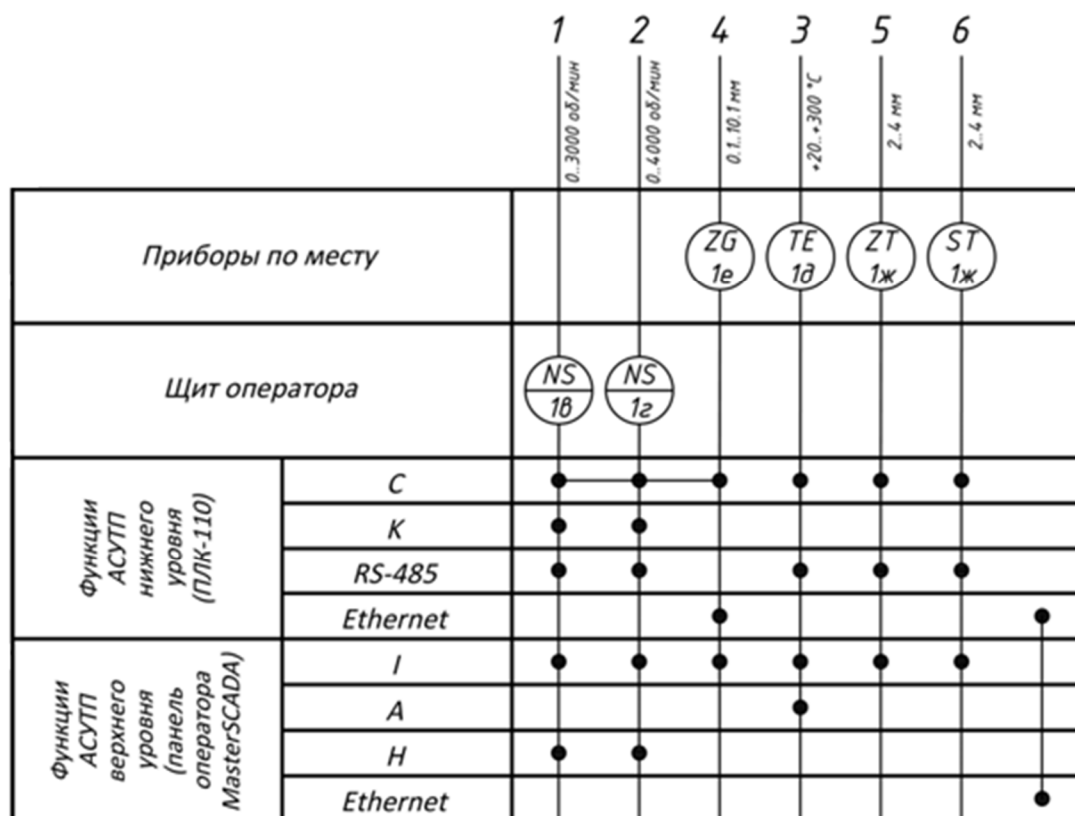


Рис. 6. Таблица автоматизации технологического процесса

Для автоматизации управления производственным процессом на единой панели оператора необходимо выбрать контроллер, а также измерители технологических величин [16, 17]. В схеме автоматизации (см. рис. 5, 6) приняты следующие обозначения: 1а – асинхронный двигатель, 1б – ДПТ, 1в – преобразователь частоты, 1г – блок управления двигателем для управления скоростью и моментом, 1д – термопара, 1е – лазерный датчик расстояния, 1ж – датчик бесконтактный индуктивный. Система управления базируется на использовании двух основных электроприводов подачи заготовки и вытягивания полотна полистирола. Алгоритм

управления и интерфейс оператора реализованы в программе MasterScada.

Результаты и их обсуждение

Для демонстрации работы модели рассмотрен процесс вытягивания полотна полистирола при заданном расходе вещества, ширине и толщине полотна полистирола, диаметре вала намотчика и экструдера, необходимой скорости натяжения. На рис. 7 приведен график изменения скорости вытягивания полистирольной ленты. По графику видно, что через 15 секунд происходит скачок скорости с 9,35 м/мин до 8,35 м/мин. Заданная скорость натяжения 9,3 м/мин.

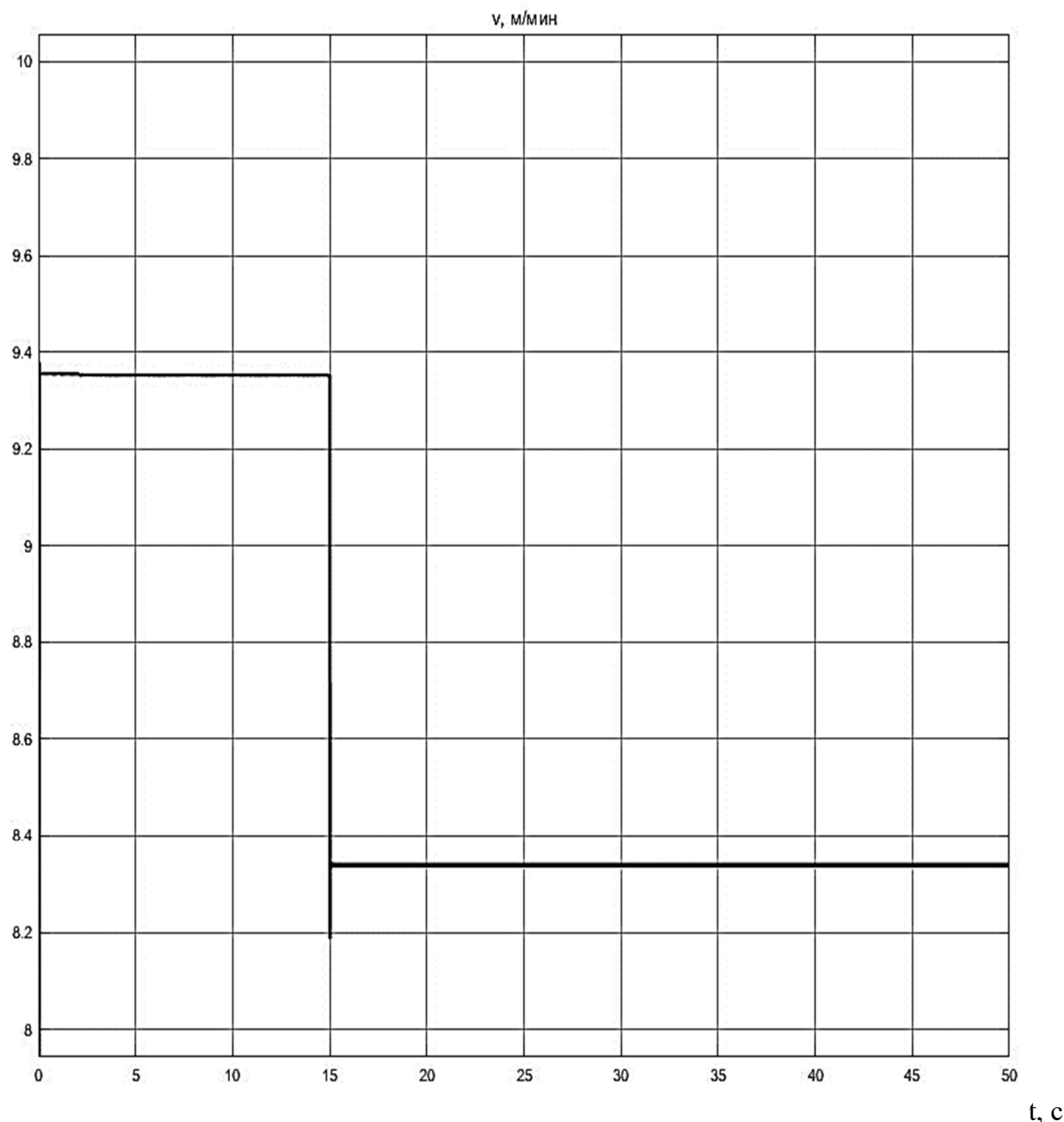


Рис. 7. График изменения скорости вытягивания полотна полистирола

Изменение скорости намотки полотна полистирола в рулон представлено на рис. 8. По графику видно, что через 15 секунд происходит скачок скорости.

Как можно заметить графики изменения скорости вытягивания полотна полистирола (см. рис. 7) и намотки полотна полистирола в рулон (см. рис. 8)

соответствуют друг другу, что говорит о согласовании скорости вытягивания и скорости намотки.

График разности скорости вытягивания полотна полистирола и скорости намотки полотна полистирола в рулон представлен на рис. 9.

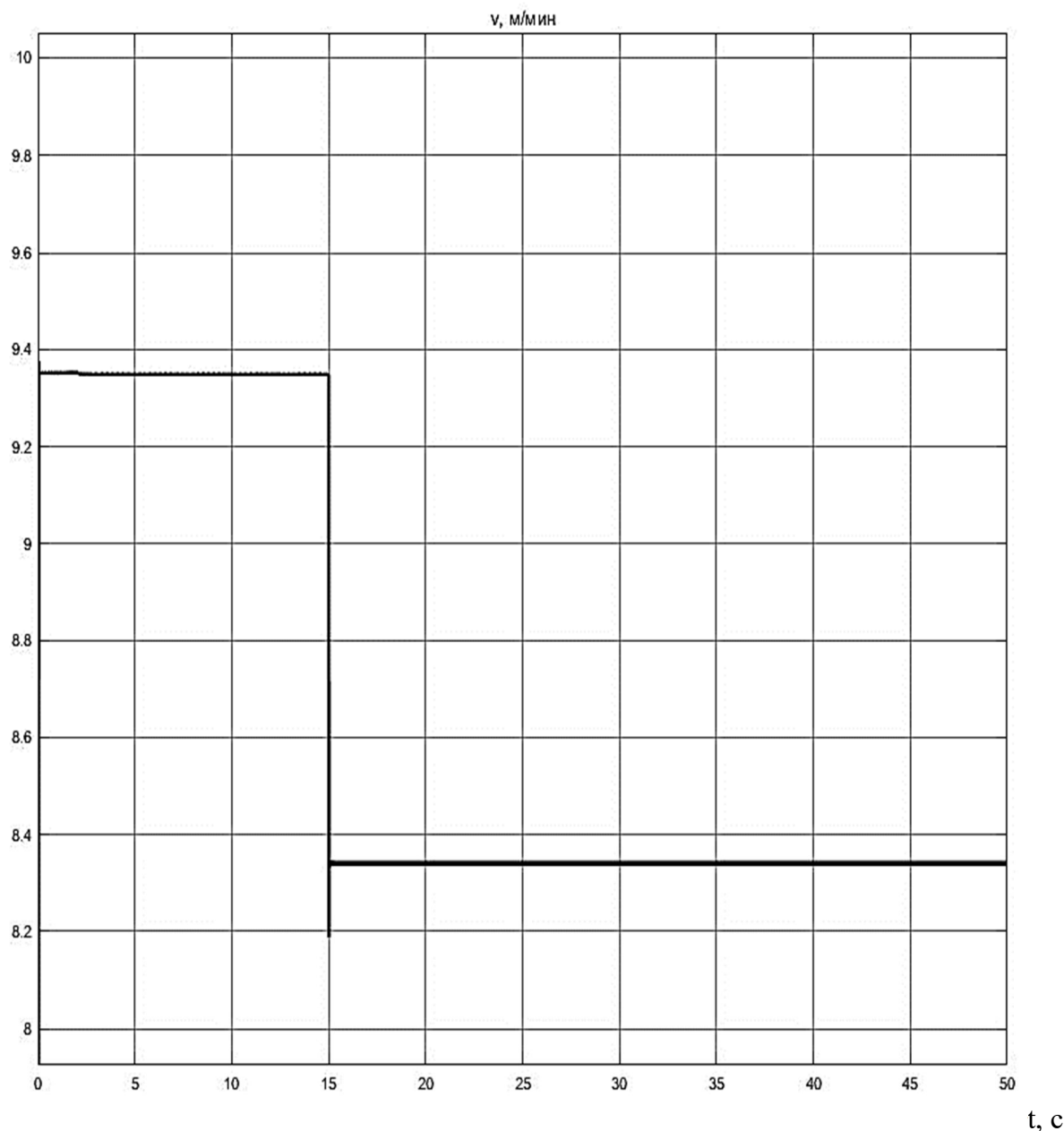


Рис. 8. График изменения скорости намотки полотна полистирола

Пики на графике разности скорости вытягивания полотна полистирола и скорости намотки полотна полистирола в рулон (рис. 9) показывают моменты, когда нарушается равенство скорости вытягивания и скорости намотки полотна полистирольной ленты в рулон.

На рис. 10-11 приведены графики изменения толщины полотна из вспе-

ненного полистирола. Исходя из графиков можно сказать, что первые две секунды происходит установление толщины полотна полистирола до 4,7 мм. При уменьшении расхода вещества толщина полотна из вспененного полистирола снижается.

Изменение натяжения полотна полистирола представлено на рис. 12.

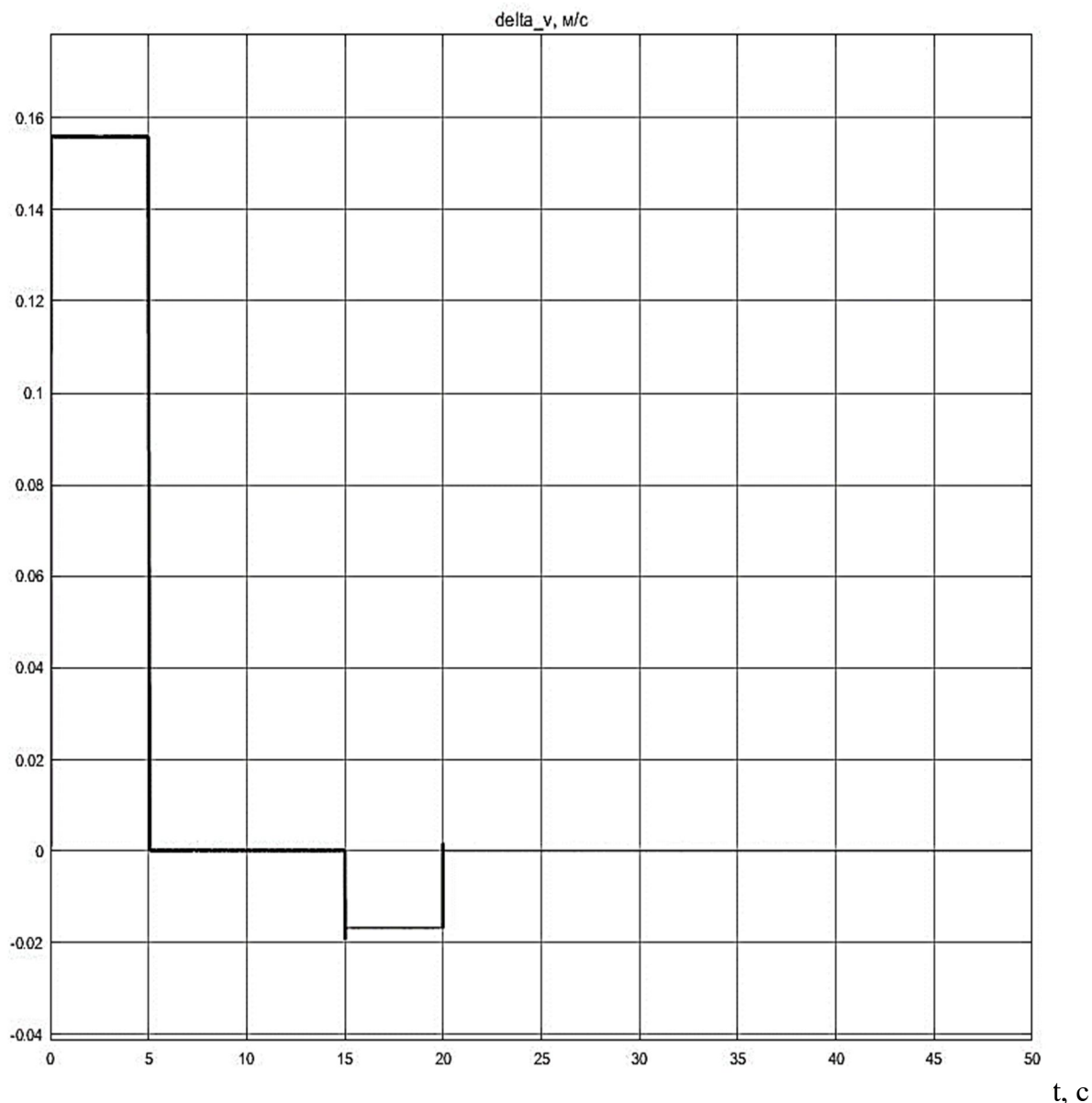


Рис. 9. График разности скорости вытягивания полотна полистирола и скорости намотки полотна полистирола в рулон

По графику на рис. 12 можно сказать, что первые пять секунд происходит натяжение полотна до 0,78 Н. При уменьшении расхода вещества также снижается и натяжение полотна.

Таким образом, толщина полотна и скорость натяжения будут заданы штатной системой программного управления

технологической линии, а необходимые значения управляющих сигналов будут определяться динамически на основе алгоритмов анализа информации, получаемой от измерительной аппаратуры и характеризующей текущее состояние процесса формирования рулона.

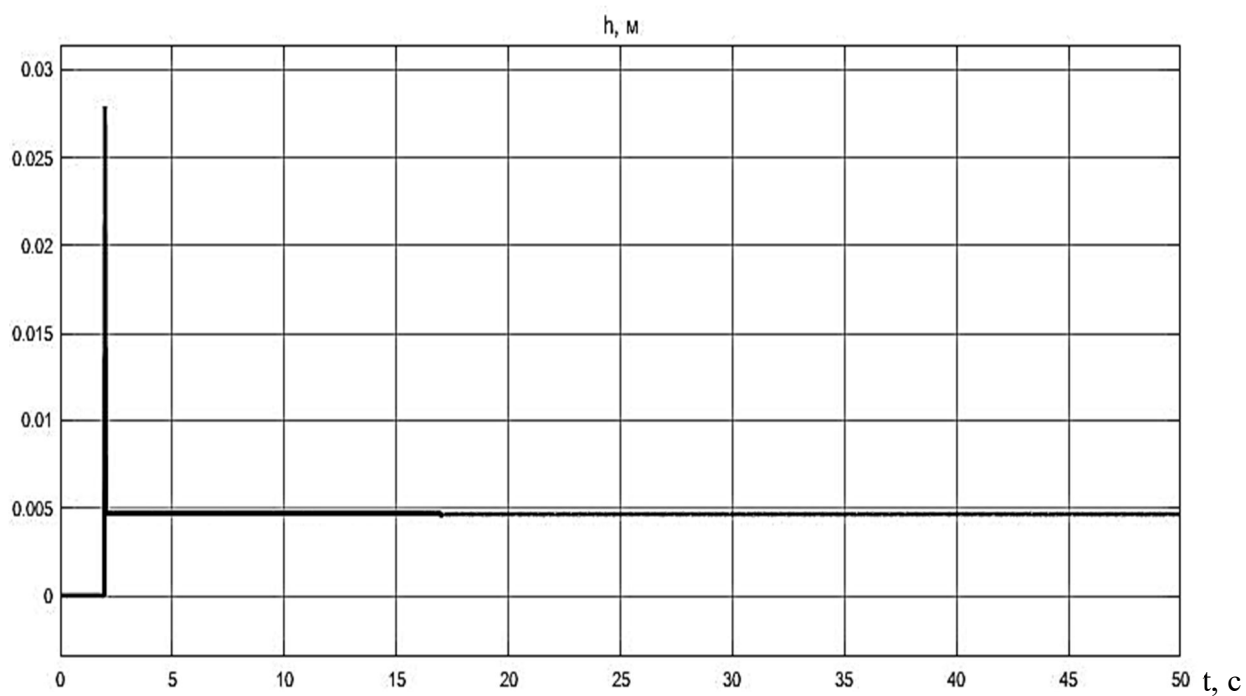


Рис. 10. График изменения толщины полотна полистирола

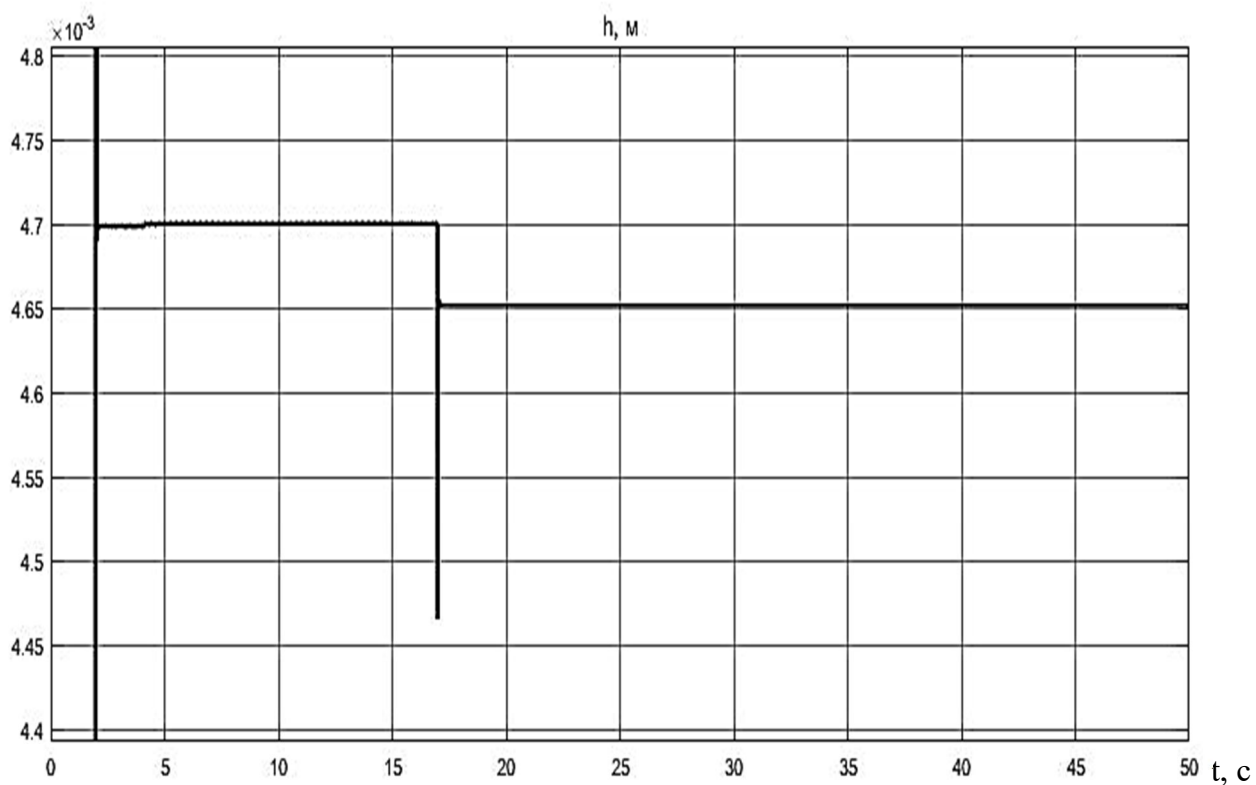


Рис. 11. Приближенная зона изменения толщины полотна полистирола во времени

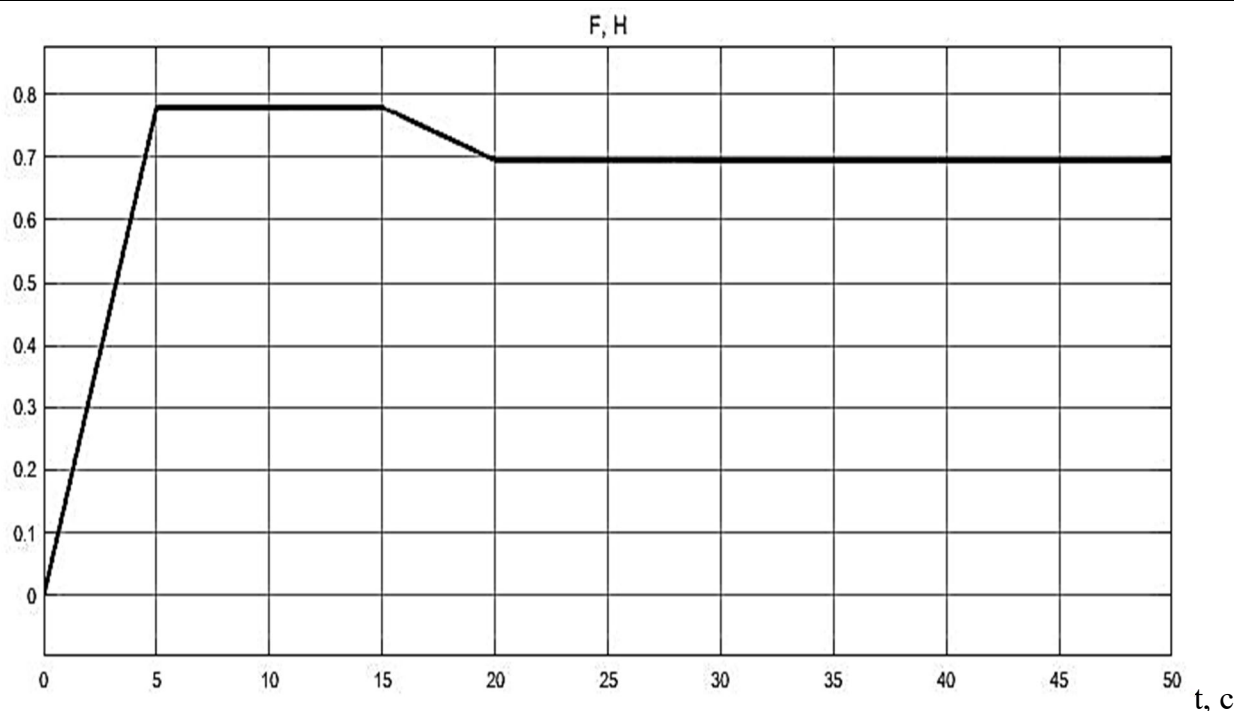


Рис. 12. График изменения натяжения полотна полистирола в функции времени

Выводы

В исследовании представлена компьютерная модель системы управления технологической линией, включающая контуры регулирования натяжения и диаметра полотна вспененного полистирола. Разработанная многомерная компьютерная модель системы управления может применяться для повышения качества, а также снижения затрат при производстве упаковок для продуктов питания. Представлены результаты исследования модели для заданных производственных параметров, приведены

и проанализированы графики изменения скорости вытягивания и скорости намотки, изменения толщины и натяжения полотна во времени. Рассмотрена техническая реализация автоматизированной системы и выполнен подбор оборудования для технологической линии, разработана схема автоматизации процесса производства. Полученные результаты исследования могут применяться для разработки систем управления объектами с взаимосвязанными регулируемыми величинами, например, для процесса вытягивания оптического волокна или листового стекла.

Список литературы

1. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов). М.: Химия, 1977. 464 с.

2. Ганиев Р.Н. Математическая модель экструдера как объекта автоматического управления // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 5. С. 264-267.

3. Nikonova T. et al. Developing a measuring system for monitoring the thickness of the 6 m wide hdpe/ldpe polymer geomembrane with its continuous flow using automation equipment // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. No. 21.

4. Pankaj M.P., Sadaphale D.B. A Study of Plastic Extrusion Process and its Defects. Manag. Appl. Sci. 2018. VII. P. 13–20.

5. Чистякова Т.Б., Полосин А.Н. Математические модели и программный комплекс для управления экструзионными процессами в гибких многоассортиментных производствах полимерных материалов // Вестник ЮУрГУ. 2019. Т. 12. № 4. С. 5-28.

6. Беляева Н.А., Прянишникова Н.А. Математическое моделирование в задачах экструзии // Вестник Сыктывкарского университета. 2012. № 15. С. 31-44.

7. Орлов С.П. Адаптивная система управления экструзионной линией // Научный потенциал вуза производству и образованию: сб. материалов науч.-практ. конференции. Армавир, 2003. С. 81-82.

8. Чостковский Б.К., Митрошин В.Н. Автоматизация процесса экструзии пористой кабельной продукции на основе цифрового регулятора // Автометрия. 2017. Т. 53. № 4. С. 74-83.

9. Ухарцева И.Ю. Цветков В.А. Гольдаде Е.А. Методы изготовления полимерной упаковки для пищевых продуктов (обзор) // Пластические массы. 2020. № 7-8. С. 40-48.

10. Александров А.Г. Синтез регуляторов многомерных систем. М.: Машиностроение, 1986. 272с.

11. Assi A.H. Engineering Education and Research Using Matlab. InTech, 2011. 490 p.

12. Chapra S.C. Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineering and Science. McGraw-Hill Science, 2012. 651 p.

13. Taan S. ElAli. Continuous Signals and Systems with MATLAB, 3rd Edition, 2021. 362 p.

14. Моделирование системы управления режимами токарной обработки с учетом изменения температуры в зоне резания / В.Г. Рубанов, И.А. Рыбин, С.А. Сильченко [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10. № 3/4. С. 50-63.

15. Зеленые технологии: промышленное приложение при управлении технологическими процессами / В.Г. Рубанов, Д.А. Юдин, А.Г. Бажанов [и др.]. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. 116 с.

16. Автоматизация процесса производства пенополистирола. URL: <https://owen.ru/project/avtomatizacziya-proczessa-proizvodstva-penopolistirola>.

17. Инновационные аспекты производства вспененной полистирольной упаковки. URL: <http://bel-pack.ru/page14>.

Информация об авторах

Рыбин Илья Александрович, кандидат
технических наук, доцент кафедры технической
кибернетики, Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Российская Федерация,
e-mail: anna.vasilevna@mail.ru

Рыбина Анна Васильевна, старший
преподаватель кафедры энергетики
теплотехнологии, Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Российская Федерация,
e-mail: anna.vasilevna@mail.ru