

## Разработка автоматизированной системы управления процессом экструдирования полимерного покрытия труб

*Д.А. Шеремет, А.В. Савчиц*

*Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ*

**Аннотация:** В работе рассматривается тема разработки системы управления технологическим процессом экструдирования полимерного покрытия труб. В процессе работы была проанализирована существующая система регулирования температуры зон экструдера полиэтилена, приведено описание процесса экструдирования наружного полимерного покрытия стальной трубы, осуществлен подбор технических средств автоматизации, определены оптимальные настроечные коэффициенты ПИД-регулятора, а также произведен выбор наиболее подходящего способа регулирования температуры зон червячных машин, за счет чего достигается повышение однородности и равномерности защитного полимерного слоя.

**Ключевые слова:** экструдирование полимерного покрытия труб, ПИД-регулятор, полиэтилен, адгезив.

### Введение

Создание антикоррозийных стальных труб является актуальной темой, особенно в нынешнее время, так как при прокладке трубопроводов первостепенным являются безопасность и долговечность используемых материалов [1]. Защитные покрытия трубопроводов должны обладать высокой диэлектрической сплошностью, низкой кислородопроницаемостью, хорошими механическими характеристиками (стойкостью к продавливанию, ударной прочностью), высокой и стабильной во времени адгезией к стали, стойкостью к катодному отслаиванию, устойчивостью к тепловому старению [2]. Еще одним требованием к антикоррозионному покрытию является устойчивость к различному температурному диапазону. Полимерные покрытия из полиэтилена обрели наибольшую популярность, так как соответствуют критериям качества.

### Трехслойное покрытие – описание процесса

Трехслойное полиэтиленовое покрытие состоит из эпоксидного слоя, слоя адгезива и слоя полиэтилена. Слой адгезива и полиэтиленовый слой наносят благодаря двум экструдерам, после того как труба прошла обработку, нагрев и нанесение эпоксидного слоя [3,4]. В начале работы

экструдеры разогревают, гранулы полиэтилена и адгезива подаются в зону загрузки экструдеров с помощью вакуумных загрузчиков. Червячные машины в процессе работы равномерно перемешивают нагретую массу материала и выдавливают ее через плоскую щелевую головку, формируя при этом гомогенную полиэтиленовую плёнку. На трубу, которая совершает поступательно-вращательное движение, наносится слой адгезива для более прочного соединения поверхности трубы со слоем полиэтилена, а следом за ним сразу слой полиэтилена [5-7]. Электрические нагреватели обеспечивают нагрев зон экструдеров до температуры, указанной в технологической карте процесса. Водяное охлаждение используется для загрузочной зоны экструдера, чтобы в нем не образовался ком, который может заклинить шнек. В остальных зонах используется воздушное охлаждение в случае превышения заданной температуры. В данном процессе осуществляется регулирование параметров, таких, как температура зон червячных машин, подача полимерной пленки на трубу и заполнение вакуумных загрузчиков. Так же осуществляется контроль параметров давления полимерной массы, температуры, скорости червячных машин, уровня гранул в вакуумных загрузчиках, контроль шва трубы.

### **Регулирование температуры, закон регулирования**

Для регулирования температуры в зонах экструдера в существующей системе используется пропорциональный закон регулирования (далее П-закон). В качестве используемых технических средств автоматизации используются регуляторы температуры, в качестве коммутирующей аппаратуры используются контакторы EasyPact TVS LC1E65. Пропорциональное регулирование заключается во включении воздействия, если сигнал меньше уставки и в выключении, если сигнал больше уставки. График работы П-регулятора представлен на рисунке 1. При управлении

объектом с помощью такого регулятора всегда будут присутствовать колебания сигнала.

Они возникают по причине инерционности элементов, а также величина и период этих колебаний не зависят от регулятора, а определяются конструкцией измерительного датчика и исполнительного механизма, что уменьшает надежность и точность системы управления [8].

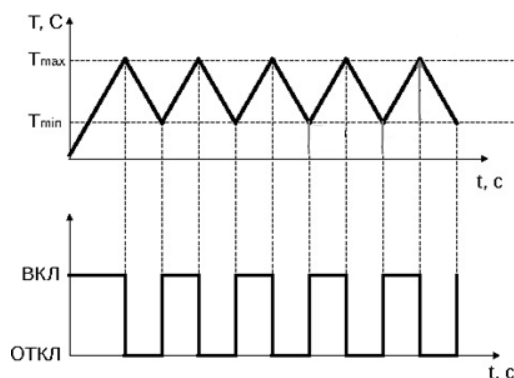


Рис. 1. - График работы позиционного регулятора

В результате, из-за перегрева зон экструдера, защитный полиэтиленовый слой получается неоднородным, что может привести к преждевременным повреждениям слоя, коррозии и прорыва трубы [9,10].

Для улучшения точности и надежности системы управления наиболее часто в задачах АСУ ТП применяется пропорционально-интегрально-дифференциальное регулирование (далее ПИД). ПИД-регулятор обеспечивает такое состояние трубчатого электронагревателя (далее ТЭН), при котором фактическая температура равна заданной. Состояние ТЭНа становится стабильным и точность поддержания температуры повышается.

Объектом управления выбрана головка агрегата. В ней полиэтиленовая масса разогревается от  $245^{\circ}\text{C}$  до  $250^{\circ}\text{C}$ , необходимо поддерживать температуру в заданных пределах, в случае, если температура повысит максимальную границу, то включаются вентиляторы для охлаждения.

Для нахождения передаточной функции объекта управления необходимо проанализировать экспериментальную кривую температуры

головки экструдера и преобразовать данный график в координаты от 0 до 100% для удобства последующих расчетов.

Метод расчета предназначен для объектов, переходная характеристика которых имеет S-образный вид. Зависимость температуры от мощности ТЭНов можно описать передаточной функцией, представленной в виде [8]:

$$W(p) = \frac{k}{(Tp + 1)^n} e^{-p\tau}, \quad (1)$$

где:  $k$ -коэффициент усиления;  $T$ -постоянная времени;  $\tau$ -время запаздывания;  $n$ - порядок объекта.

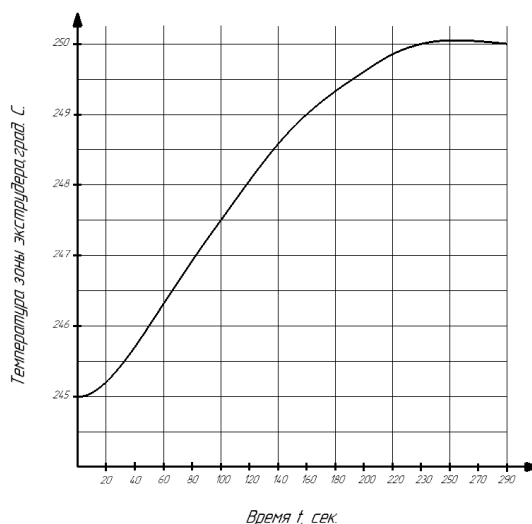


Рис. 2. –Исходный график переходного процесса

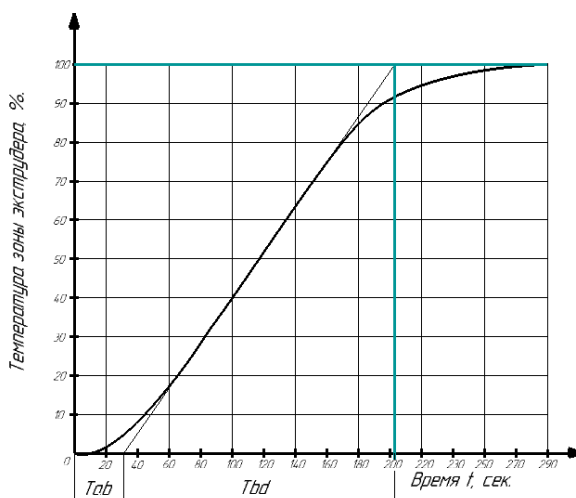


Рис. 3. - Определение передаточной функции объекта управления

Формула для определения коэффициента усиления -  $k$ :

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x}, \quad (2)$$

где:  $\Delta y$  – изменение выходного параметра температуры %;  $\Delta x$  – величина возмущающего воздействия, это изменение мощности ТЭНов, %;

По заданной кривой на рисунке 3 определяется значение отрезков времени  $T_{ab}$  и  $T_{bd}$ :  $T_{ab} = 32$ ;  $T_{bd} = 173$ ; По отношению  $\frac{T_{ab}}{T_{bd}} = 0.184$  из таблицы №1, определяем порядок.

Таблица № 1

Значения вспомогательных коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  объектов различного порядка

Отношение $T_{ab}/T_{bd}$	Порядок $n$	Коэффициент $k_1$	Коэффициент $k_2$
0	1	1	0
0,104	2	2,718	0,282
0,218	3	3,695	0,805
0,319	4	4,463	1,425
0,41	5	5,119	2,1

По таблице №1 выбираем коэффициенты:  $n = 2$ ,  $k_1 = 2.718$ ,  $k_2 = 0.282$ .

Сначала высчитывается постоянная времени передаточной функции:

$$T = \frac{T_{bd}}{k_1}, \quad (3)$$

где:  $T_{bd}$  – отрезок времени;  $k_1$  – вспомогательный коэффициент;

Далее определяется условное время запаздывания:

$$\tau_y = T \cdot k_2, \quad (4)$$

где:  $T$  – постоянная времени;  $k_2$  – вспомогательный коэффициент;

Время запаздывания считается по следующей формуле:

$$\tau = T_{ab} - \tau_y, \quad (5)$$

где:  $T_{ab}$  – отрезок времени;  $\tau_y$  – условное время запаздывания;

По формулам 2,3,4,5 находим значения для построения передаточной функции объекта управления:

$$k = \frac{100}{100} = 1;$$

$$T = \frac{173}{2.718} = 63 \text{ сек};$$

$$\tau_y = 63 \cdot 0.282 = 18 \text{ сек};$$

$$\tau = 32 - 18 = 14 \text{ сек};$$

Вид передаточной функции объекта, посчитанный по формуле 1, представлен на рисунке 4:

$$W(p) = \frac{1}{(63p + 1)^2} e^{-14p} = \frac{1}{3969p^2 + 126p + 1} e^{-14p}.$$

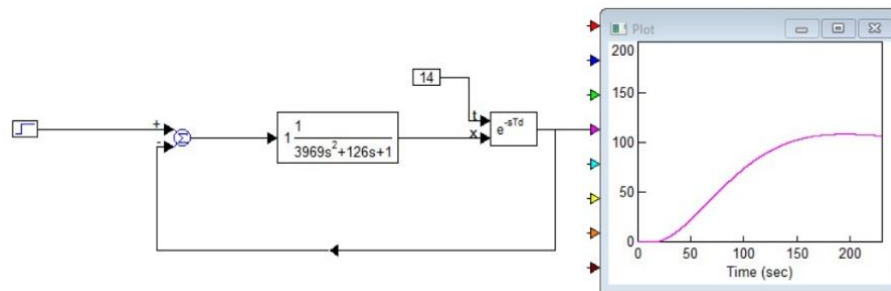


Рис. 4. - Графическое изображение переходного процесса передаточной функции объекта в VisSim

Нахождение коэффициентов для настройки регулятора было выполнено методами Кохена-Куна, Шински Циглера-Никольса, 3С. Найденные коэффициенты представлены в таблице 2.

Таблица № 2

#### Полученные настроечные коэффициенты ПИД-регулятора

	Кохен-Кун	Шински	Циглер-Никольс	3С
$K_P$	4.1	3.5	3.8	3.1
$K_I$	0,028	0,018	0.035	0,015
$K_D$	10	8.4	7	24

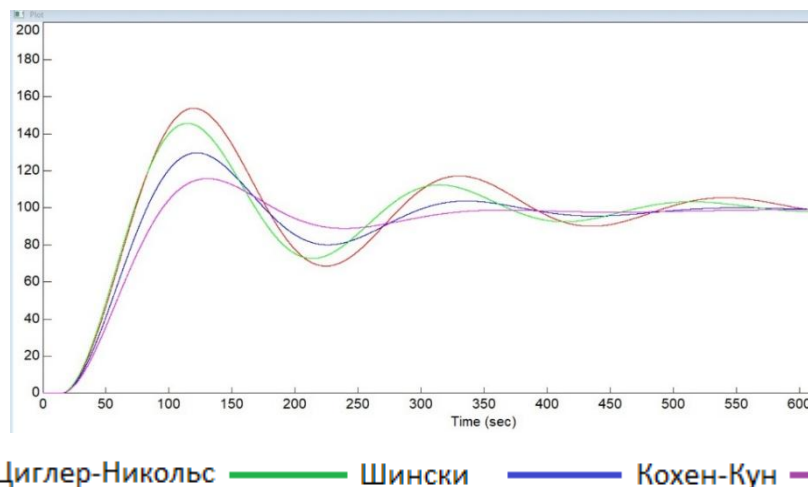


Рис. 5. – Переходные процессы системы с различными коэффициентами ПИД-регулятора

Как видно из рисунка 5, благодаря коэффициентам по методу ЗС, процесс становится более быстродейственным и менее колебательным, если сравнивать с другими методами. В итоге были приняты следующие настроечные коэффициенты ПИД-регулятора:  $K_P = 3.1$ ,  $K_I = 0.015$ ,  $K_D = 24$ .

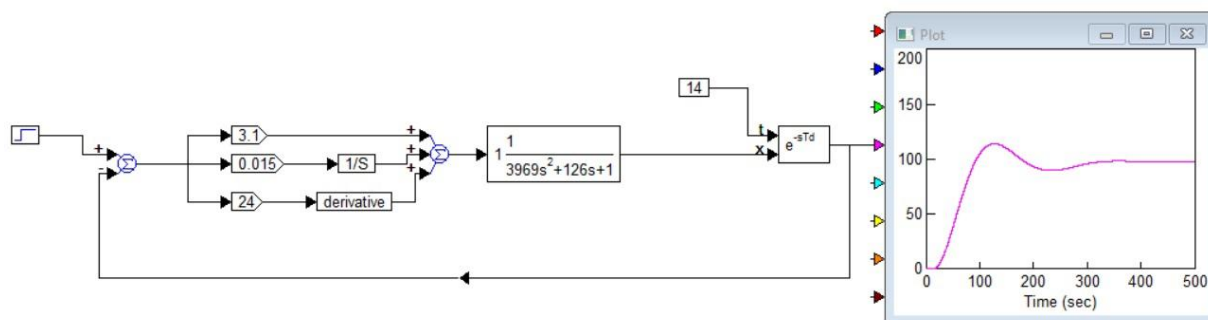


Рис. 6. - Переходный процесс с коэффициентами ПИД-регулятора по методу ЗС

### Выбор технических средств автоматизации

В качестве основного управляющего устройства использовался контроллер ОВЕН ПЛК210-01-CS, вместо регуляторов на каждую зону. В качестве коммутирующей аппаратуры были выбраны твердотельные реле для

регулирования напряжения HD-2544.LA, это позволяет плавно изменять задание на ТЭНы и постоянно поддерживать температуру на заданном уровне без скачков. Преобразователи давления МИДА установлены в головке экструдеров, благодаря ним производится контроль давления материала в системе, регулирование вращения шнека и подачи гранул. Лазерные датчики Banner обеспечивают высокую точность в определении сварочного шва при каждом обороте трубы. Термопреобразователи сопротивления ОВЕН обеспечивают точное измерение температуры расплава внутри каждой зоны экструдеров. Датчики тока Seneca предназначены для контроля работы ТЭНов, с их помощью появляется возможность увидеть зарождающуюся неисправность, например, загрязнение ТЭНа или обрыв спирали, и вовремя ее устранить. В таблице 3 приведен перечень технических средств автоматизации для данного процесса.

Таблица № 3

Технические средства автоматизации для процесса экструдирования полимерного покрытия труб

Тип	Фирма	Название	Количество
Промышленный логический контроллер (ПЛК)	ОВЕН	ПЛК210-01-CS	1
Преобразователь давления	МИДА	МИДА-ДИ-12П-082-К	2
Лазерный датчик	Banner	LE250IQ	2
Термопреобразователь сопротивления	ОВЕН	ДТС055-Pt100.A3.80	11
Датчик тока	Seneca	T201DCH50-LP	11
Твердотельное реле регулирования напряжения	ОВЕН	HD-2544.LA	11

В результате была предложена модернизация системы управления экструдирования полимерного покрытия труб, произведен подбор датчиков и



средств автоматизации, определены настроечные коэффициенты ПИД-регулятора.

### Литература

1. Кунакбаева А.Р. Актуальность производства стальных труб с антикоррозийным покрытием // Молодой ученый. 2021. № 44. URL: [moluch.ru/archive/386/85056/](http://moluch.ru/archive/386/85056/)
2. Борисов Б.И. Защитная способность изоляционных покрытий подземных трубопроводов. М.: Недра, 1987, 123 с.
3. Вирясов А.Н., Гостинин И.А., Семенова М.А. Применение труб коррозионно-стойкого исполнения для обеспечения надежности нефтегазотранспортных систем западной сибери // Инженерный вестник Дона. 2013. №1. URL:[ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_4\\_viryasov.pdf\\_1487.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_4_viryasov.pdf_1487.pdf)
4. Мустафин Ф.М., Кузнецов М.В., Быков Л.И. Защита от коррозии. Т. 1. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2004, 806 с.
5. Ким В.С. Теория и практика экструзии полимеров: Учебное пособие. М.: КолосС, 2005, 568 с.
6. Орлов В.А. Защитные покрытия трубопроводов. М.: АСВ, 2018, 827 с.
7. Узденский Б.Ю. Модификация полимерных материалов. Практическое руководство для технолога. 2-е издание. М.: ЦОП Профессия, 2021, 224 с.
8. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов / 5-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2008, 396 с.
9. Dr. Rauwendaal Chris Polymer Extrusion. edition fourth. 2001, 768 p.
10. Сурис М.А. Защита трубопроводов тепловых сетей от наружной коррозии. М.: Энергоатомиздат, 2016, 216 с.

## References

1. Kunakbaeva A.R. Molodoj uchenyj. 2021. № 44. URL: [moluch.ru/archive/386/85056/](http://moluch.ru/archive/386/85056/)
2. Borisov B.I. Zashhitnaya sposobnost izolyacionnyx pokrytij podzemnyx truboprovodov [Protective capacity of insulating coatings of underground pipelines]. M.: Nedra, 1987, 123 p.
3. Viryasov A.N., Gostinin I.A Inzhenernyj vestnik Dona 2013. №1. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_4\\_viryasov.pdf\\_1487.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_4_viryasov.pdf_1487.pdf)
4. Mustafin F.M., Kuznecov M.V., Bykov L.I. Zashhita ot korrozii [Protective coatings of pipelines.] T. 1. Ufa: DizajnPoligrafServis, 2004, 806 p.
5. Kim V.S. Teoriya i praktika ekstruzii polimerov: Uchebnoe posobie [Theory and Practice of Polymer Extrusion: A Study Guide]. M.: KolosS, 2005, 568 p.
6. Orlov V.A. Zashhitnye pokrytiya truboprovodov [Protective coatings for pipelines]. M.: ASV, 2018, 827 p.
7. Uzdenskij B.Yu. Modifikaciya polimernyx materialov. Prakticheskoe rukovodstvo dlya tehnologa. 2-e izdanie [Modification of polymeric materials. A practical guide for the technologist. 2nd edition]. M.: CzOP Professiya, 2021, 224 p.
8. Rotach V.Ya. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik dlya vuzov / 5-e izd., pererab. i dop [Theory of automatic control: a textbook for universities / 5th ed., revised. and additional]. M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2008, 396 p.
9. Dr. Rauwendaal Chris Polymer Extrusion. edition fourth. 2001, 768 p
- Kim, V.S. Theory and practice of polymer extrusion: Textbook / V.S. Kim. M.: KolosS, 2005, 568 p.
10. Suris M.A. Zashhita truboprovodov teplovyx setej ot naruzhnoj korrozii [Protection of pipelines of heating networks from external corrosion]. M.: E`nergoatomizdat, 2016, 216 p.