

УДК 681-54:621.316.7

Н.И. Сиухин, О.М. Власенко

Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина, Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭКСТРУДЕРА ДЛЯ ВТОРИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТИКА

В данной статье рассматривается вопрос автоматизации системы охлаждения экструдера для вторичной переработки пластика. Приведена математическая модель экструдера как теплового объекта управления, исследованы динамические свойства системы управления для разных вариантов охлаждения.

Ключевые слова: экструдер, автоматизация, вторичная переработка, пластик, система охлаждения.

N. I. Sukhin, O. M. Vlasenko

The Kosygin State University of Russia, Moscow

RESEARCH OF EXTRUDER COOLING SYSTEMS FOR PLASTIC RECYCLING

This article deals with the issue of automation of the extruder cooling system for plastic recycling. A mathematical model of the extruder as a thermal control object is presented, and the dynamic properties of the control system for different cooling options are investigated.

Keywords: extruder, automation, recycling, plastic, cooling.

XXI век – это не только век высоких технологий, но и глобальных экологических проблем. Одной из них является проблема загрязнения окружающей среды различными пластиками. Дешевые и практичные изделия из пластмасс имеют один общий недостаток: они не разлагаются в естественных условиях. Для переработки пластика используют экструдеры. Это сложные объекты, в которых качество получаемого продукта зависит от точности поддержания технологических параметров процесса, что реализуется автоматической системой регулирования. Актуальная задача автоматизации экструдера для вторичной переработки пластика предполагает получение и исследование математических моделей элементов системы. Данная работа посвящена обзору систем охлаждения экструдера и анализу математической модели объекта управления в контуре охлаждения.

Экструдер — это машина для непрерывной переработки полимерного сырья (гранул, дробленки, агломерата) в однородный расплав и придания ему формы путём продавливания через экструзионную головку, в том числе используется для вторичной переработки пластика.

Экструзия является технологичным процессом, в котором, в конечном итоге готовые изделия изготавливаются средством продавливания расплавленного материала через формирующую часть (фильеру, экструзионную головку, отверстие). Материал, который применяется в ходе экструзии, характеризуется

большой степенью вязкости, а изделия получаются с поперечным сечением необходимой формы. Другими словами, экструзия это комплексный физико-химический процесс, протекающий под действием машинных усилий и большой температуры. Перерабатываемое сырье разогревается из-за тепла, выделяющегося в ходе преодоления внутреннего трения и деформации материала, и посредством наружного нагрева.

Эффективность технологического процесса экструдирования зависит от организации системы обогрева и системы охлаждения, в том числе и оснащение оборудования системой автоматического регулирования. По способу поддержания температуры различают экструдеры с водяным и воздушным охлаждением.

Водяное охлаждение обеспечивается за счет подачи холодной воды во внутренние полости шнекового вала/валов экструдера. Требуемую температуру воды обеспечивает чиллер.

В систему водяного охлаждения входят: насос, теплообменник-охладитель, расширительная емкость, фильтр в контуре умягченной воды, фильтр на трубопроводе подачи охлаждающей воды в теплообменник-охладитель, контрольно-измерительные приборы, подающий и обратный трубопроводы умягченной воды с электромагнитными клапанами для каждой обогреваемой зоны экструдера. Умягченная вода циркулирует по замкнутому контуру (зона экструдера – фильтр – теплообменник-охладитель – насос – зона экструдера).

Наиболее распространенным способом охлаждения экструдеров считается обдув воздухом шнекового вала (рис.1). При этом каждая зона имеет свой охлаждающий вентилятор, работой которых управляет контроллер автоматической системы регулирования.

Проведем сравнительный анализ систем охлаждения водой и воздухом. Сравним их по следующим критериям: по стоимости, сложности обслуживания, потреблению электроэнергии и надежности.

Сравнивая системы охлаждения по стоимости, следует обратить внимание на следующие моменты. Охлаждение воздухом осуществляется при помощи вентиляторов. Ленточные нагреватели из наборной керамики оснащенные ребрами являются экономически выгодными. Сравнительно с иными типами литых нагревательных устройств их цена на 50-60% будет ниже. Алюминиевые литые ТЭНы способны работать в среднем на 30% больше, чем аналоги с водяным охлаждением. Самыми дорогими элементами водяного охлаждения являются насос, водопровод и теплообменник либо чиллер. В конечном счете, использование и сама установка водяной системы охлаждения в полтора раза дороже системы воздушного охлаждения.

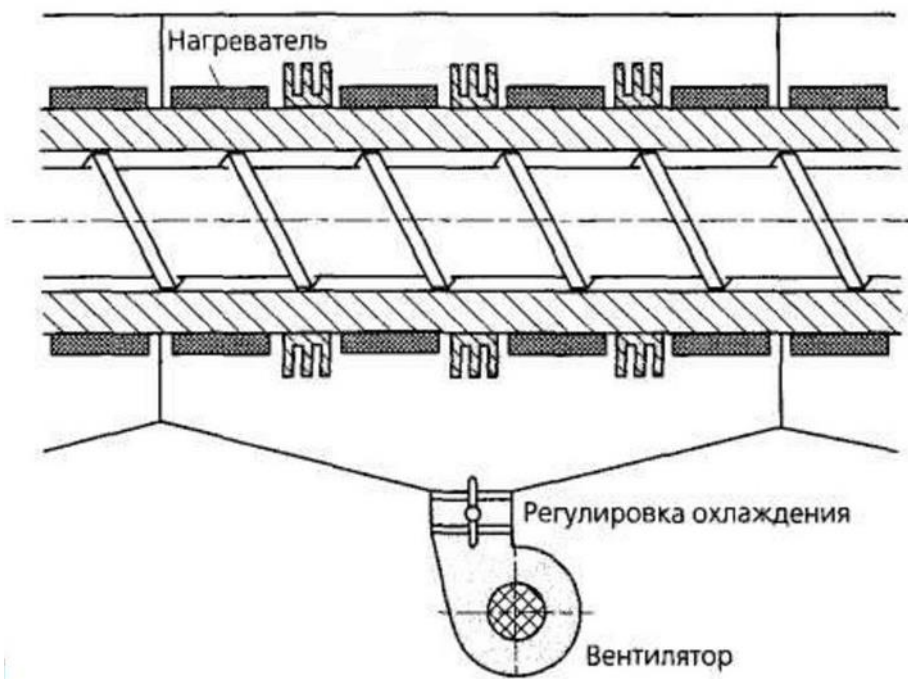


Рисунок 1 – Воздушная система охлаждения.

Системы водяного охлаждения со временем могут выходить из строя из-за того, что забились охладительные трубки, или на каком-то участке случилась утечка. Зачастую трубки забиваются минеральными отложениями или биологическими скоплениями. Поэтому, чтобы снизить риск закупорки трубок, рекомендовано использовать только дистиллят. Также замена литых тэнов трудоемка и может занять много времени. В случае же воздушной системы охлаждения все намного проще, быстрее и дешевле.

Работа этих двух систем охлаждения значительно различается не только по принципу действия, но и по затратам энергоресурсов.

В зависимости от устройства водяная система охлаждения требует от 7% до 80% большего энергопотребления, чем воздушные системы охлаждения. К примеру, одно исследование показало, что воздушная система охлаждения, установленная в 3.5-дюймовый экструдер потребила на 23% меньше электроэнергии сравнительно с водяной системой охлаждения, где постоянно работает насос.

Что касается надежности, то стоит учесть, что системы с водяным охлаждением могут быть более нестабильными, чем системы с воздушным охлаждением. В дополнение к способности превращать воду в пар, водяное охлаждение дает оператору возможность переохладить определенные области. В любом случае температура на протяжении всей длины шнека может быть нестабильной.

Очевидным будет сделать вывод, что воздушное охлаждение экономически выгодней. Но, также следует учесть и тот факт, что с помощью воздуха не удастся рассеять на некоторых участках оборудования достаточно тепла для обеспечения необходимого контроля.

В данной статье рассматривается математическая модель экструдера ЭПС 150x30 с водяной системой охлаждения по зонам. В контуре охлаждения входным воздействием является температура стенок экструдера, выходным расход охлаждающей воды. Основным возмущающим воздействием – изменение температуры охлаждающей воды.

Мощность охлаждения расходуется на уменьшение температуры стенок экструдера:

$$Q_{\text{охл}} = F_{\text{в}} \rho_{\text{в}} C_{\text{в}} (\theta_{\text{в}} - \theta_{\text{вн}}), \quad (1)$$

где $F_{\text{в}}$ – объемный расход, м³;

$C_{\text{в}}$ – удельная массовая теплоемкость, Дж/кг·К;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность, кг/м³.

Уравнение теплового баланса экструдера по охлаждению:

$$F_{\text{в}} \rho_{\text{в}} C_{\text{в}} (\theta_{\text{в}} - \theta_{\text{вн}}) = m_{\text{э}} c_{\text{э}} \frac{d\theta_{\text{э}}}{dt} + \alpha_{\text{вэ}} S_{\text{вэ}} (\theta_{\text{э}} - \theta_{\text{в}}) \quad (2)$$

$$m_{\text{э}} c_{\text{э}} \frac{d\theta_{\text{э}}}{dt} + \alpha_{\text{вэ}} S_{\text{вэ}} \theta_{\text{э}} = (F_{\text{в}} \rho_{\text{в}} C_{\text{в}} + \alpha_{\text{вэ}} S_{\text{вэ}}) \theta_{\text{в}} \quad (3)$$

$$\frac{m_{\text{э}} c_{\text{э}}}{\alpha_{\text{вэ}} S_{\text{вэ}}} \frac{d\Delta\theta_{\text{э}}}{dt} + \Delta\theta_{\text{э}} = k_{\text{э}} \theta_{\text{в}} \quad (4)$$

Введем обозначения:

$$T_{\text{в}} = \frac{m_{\text{э}} c_{\text{э}}}{\alpha_{\text{вэ}} S_{\text{вэ}}} - \text{постоянная времени};$$

$$k_{\text{в}} = \frac{c_{\text{в}} F_{\text{в}} \rho_{\text{в}} + \alpha_{\text{вэ}} S_{\text{вэ}}}{\alpha_{\text{вэ}} S_{\text{вэ}}} - \text{коэффициент передачи экструдера в контуре}$$

охлаждения.

здесь $\alpha_{\text{вэ}}$ – коэффициент теплоотдачи от воды к стенке экструдера, Вт/м²·К; $S_{\text{вэ}}$ – площадь теплопередачи, м²

В работе [1] и [3] были получены соотношения, описывающие математическую модель экструдера по контуру нагрева и сдвига:

$$W_{\theta}(p) = \frac{k_{\text{э}}}{T_{\text{э}} p + 1} - \text{передаточная функция для контура нагрева};$$

$W_{\text{сд}}(p) = \frac{k_{\text{сд}}}{T_{\text{сд}} p + 1} - \text{передаточная функция, описывающая изменение температуры из-за деформации сдвига.}$

На рисунке 3 представлена часть структурной схемы экструдера, показывающая контуры нагрева и охлаждения в 4-й зоне, а также контуры деформации сдвига.

В программе Matlab Simulink было проведено исследование динамических свойств системы управления температурой смеси в экструдере [1], [3]. Подобраны параметры регулятора ПИ $k_{\text{р}}=1.27$ и $k_{\text{и}}=3.05$, которые обеспечивают устойчивость системы по фазе 60° и заданное качество регулирования 3.7 мин, а перерегулирование составило 13.8%, что соответствует требуемому для подобных систем качеству регулирования.

В контуре охлаждения применяется релейное регулирование, которое реализовано через элемент Switch. На средний вход данного элемента подается значение температуры смеси в формующей головке, которое сравнивается с установленным в блоке пороговым значением. При превышении порогового значения переключатель переключится на верхний канал и в экструдер будет

подаваться холодная вода. В случае, если текущее значение меньше порогового, подачи воды не будет.

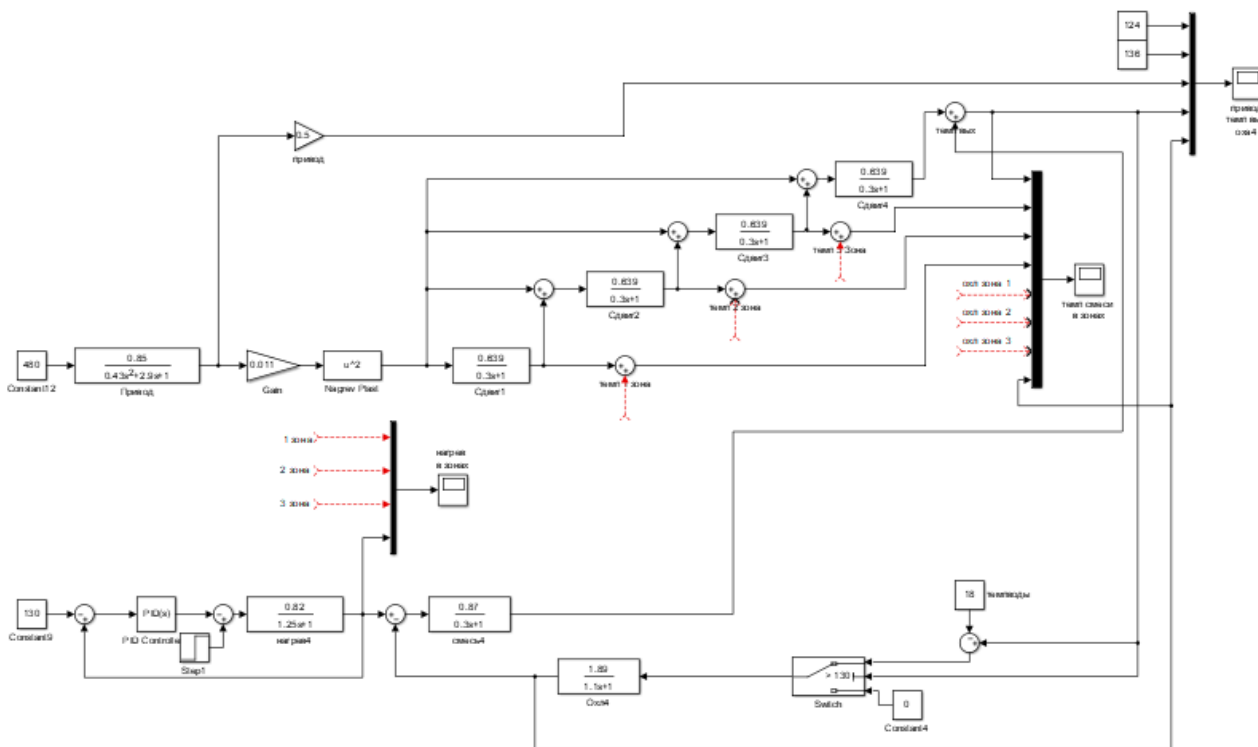


Рисунок 3 – Структурной схемы экструдера с водяным охлаждением

На рисунке 4 приведены переходные процессы для скорости вращения привода, температуры смеси и температуры охлаждающей воды на выходе экструдера. На 7 минуте подано возмущающее воздействие. Регулятор возмущение отработал, включилось охлаждение, на выходной температуре смеси возмущение не отразилось.

Таким образом, делая вывод по представленным исследованиям, можно сказать, что воздушное охлаждение позволяет осуществлять довольно мягкое воздействие на процесс, поскольку скорость теплообмена довольно мала. Однако это неудобно, когда необходимо интенсивное охлаждение. Тем не менее, преимуществом воздушного охлаждения является плавность изменения температуры при включении или выключении вентилятора. При водяном охлаждении температура меняется более резко. Поэтому при использовании водяного охлаждения труднее контролировать температурный режим.

В работе рассмотрена математическая модель экструдера и приведены результаты исследования динамических свойств системы регулирования температуры смеси на выходе формующей головки. Показано, что при использовании релейного регулирования в контуре охлаждения удастся добиться требуемого качества переходного процесса по температуре смеси по зонам и на выходе экструдера.

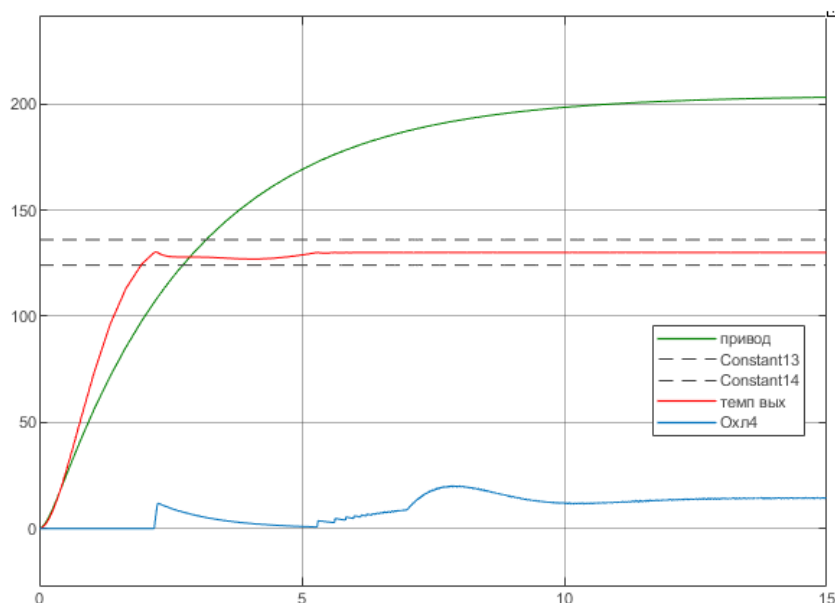


Рисунок 4 – Скорость вращения привода, температура смеси на выходе и температура охлаждающей воды на выходе экструдера

Список литературы

1. Яворский Ю.И., Власенко О.М. Разработка автоматизированной системы управления процессом экструзии// Инновационное развитие легкой и текстильной промышленности: сборник материалов Международной научной студенческой конференции. Часть 3. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2019. – С.152-157
2. Разработка автоматизированной системы управления процессом экструзии// Яворский Ю.И., Власенко О.М. В сборнике: всероссийская научная конференция молодых исследователей с международным участием «инновационное развитие техники и технологий в промышленности (интекс-2020)» 2020. С. 136 – 139
3. Сиухин Н.И. Разработка автоматической системы регулирования температуры в одношнековом экструдере// Тезисы докладов 72-й внутривузовской научной студенческой конференции «Молодые ученые – инновационному развитию общества (МИР-2020)», посвященной Юбилейному году в РГУ им. А.Н. Косыгина. Часть 4, 2020 г. М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2020. С.36-37.

Сведения об авторах

Сиухин Никита Игоревич – студент группы МАГ-А-120, Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина, Москва, e-mail: siuhin.nik@mail.ru

Власенко Ольга Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и промышленная электроника», Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина, Москва, e-mail: Vlasenko-om@rguk.ru

About the authors

Siukhin Nikita Igorevich – student of group MAG-A-120, Russian State University named after A.N. Kosygin, Moscow, e-mail: siuhin.nik@mail.ru

Vlasenko Olga Mikhailovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation and Industrial Electronics, Russian State University. A.N. Kosygin, Moscow, e-mail: om@rguk.ru