

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Институт компьютерных наук и технологий  
Высшая школа киберфизических систем и управления

Работа допущена к защите

Директор ВШ КФСУ

\_\_\_\_\_ В.П. Шкодырев

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

### **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ НАГРЕВА ПЛАВЯЩИХСЯ ВЕЩЕСТВ**

по направлению 27.03.04 – Управление в технических системах

по образовательной программе 27.03.04 \_02 – Системы и технические средства автоматизации и управления

Выполнил студент гр. 43503/1

А.С. Никитина

Научный руководитель

В.М. Филиповский

Консультант по нормоконтролю

О. А. Викторов

Санкт-Петербург  
2019

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Институт компьютерных наук и технологий  
Высшая школа киберфизических систем и управления

УТВЕРЖДАЮ

Директор ВШ КФСУ

\_\_\_\_\_ В.П. Шкодырев

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2019 г.

### ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы

по направлению 27.03.04 – Управление в технических системах  
профиль 27.03.04 \_02 – Системы и технические средства автоматизации и  
управления

студенту Никитиной Анастасии Сергеевне, группа 43503/1

1. Тема работы: Разработка системы нагрева плавящихся веществ
2. Срок сдачи студентом законченной работы: « 11 » июня 2019 г
3. Исходные данные по работе:
  - 3.1. Техническое задание на автоматизацию процесса плавления термопластов;
4. Содержание расчётно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

- 4.1. Разработка математической модели процесса нагрева и плавления термопластов;
- 4.2. Разработка системы управления;
- 4.3. Выбор программного обеспечения;
- 4.4. Человеко-машинный интерфейс;
5. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных иллюстраций):
  - 5.1. Презентация
6. Дата выдачи задания: «    » февраля 2019г.

Руководитель,  
к.т.н., доцент ВШ КФСУ ИКНТ  
ученая степень, звание, должность

\_\_\_\_\_

подпись

(В.М. Филиповский)  
расшифровка

Задание принял к исполнению « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019г.  
Студент,  
Группа 43503/1

\_\_\_\_\_

подпись

(А.С. Никитина)  
расшифровка

## **РЕФЕРАТ**

41 страница, 3 таблицы, 18 рисунков, 1 приложение

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА,  
ТЕРМОПЛАСТЫ, ПЛАВЛЕНИЕ ПЛАСТИКА, ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЙ  
ИНТЕРФЕЙС**

В данной работе создана математическая модель нагрева термопластов при помощи эжекционной горелки. На основе расчетов произведено проектирование системы автоматического управления. Полученный технологический процесс смоделирован в среде разработки SCADA-систем. Разработанный человеко-машинный интерфейс визуализирует информацию о температуре пластика в зависимости от состояния нагревателя, подача газа на который регулируется согласно прописанному для контроллера коду.

## **THE ABSTRACT**

41 pages, 3 tables, 18 pictures, 1 attachment

**MANAGEMENT SYSTEM, PROCESS AUTOMATION, THERMO-  
PLASTIC, MELTING PLASTIC, HUMAN-MACHINE INTERFACE**

In this work we created a mathematical model for heating thermo-plastics using an ejection burner. The design of the automatic control system was made based on the calculations. The obtained technological process is modeled in the development environment of SCADA-systems. The developed human-to-machine interface visualizes information about the temperature of the plastic depending on the state of the heater, the gas supply to which is regulated by the code specified for the controller.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Глава 1. Описание технологического процесса	7
1.1 Методы изготовления пластмасс	7
1.2 Литьё пластмасс под давлением	11
Глава 2. Математическое описание процесса плавления	13
2.1 Разработка математической модели плавления термопласта	13
2.2 Разработка математической модели горелки	22
2.3 Измерение температуры в экструдере	24
2.4 Синтез системы управления	25
Глава 3. Моделирование	27
3.1 Выбор среды моделирования	27
3.2 Выбор языка программирования	27
3.2 Разработка алгоритмов и написание программы	29
3.3 Моделирование в SCADA-системе	32
Заключение	36
Список сокращений	37
Список использованных источников	39
Приложение 1.	41
Листинги программ	41

## ВВЕДЕНИЕ

Пластмассы (пластики) – это органические материалы, основой которых являются синтетические или природные высокомолекулярные соединения (полимеры). Широкое применение получил вид пластмасс на основе синтетических полимеров.

В современном мире пластмассы играют всё большую роль в жизни человека. Они окружают нас повсеместно несмотря на то, что некоторые страны отказываются от них ввиду неэкологичности. Именно поэтому данное исследование остаётся актуальным и на сегодняшний день. Кроме этого, производство изделий из пластика остаётся одним из самых выгодных. Возможность создать из одного и того же исходного материала надежный и легкий продукт, поражающий разнообразием, сделало этот вид производства ценным для потребителя. Полимеры не относятся к дорогостоящим материалам, но из них можно получить многоплановые изделия, используемые практически во всех сферах промышленности.

Существует несколько различных способов создания продукции из пластмассы. Они отличаются как технологией нагрева пластика, так и способом придания расплавленному термопласту формы готового изделия. В данной работе будет подробно рассмотрена каждая из существующих методик, сделан выбор одной из них (с обоснованием), приведена математическая модель работы горелки и нагрева пластика, разработана система управления.

Задача управления процессом перехода полимеров из твердого состояния в расплавленное вязкотекучее заключается в том, чтобы нагреть исходные материалы (например, гранулы полипропилена) до температуры плавления и поддерживать её в необходимом диапазоне так, чтобы структура пластика не начала разрушаться или сам он не испарялся сверх нормы, до тех пор, пока вся масса не станет однородной, но при этом полимер не прекращал плавиться и не начал остывать, затвердевая. В противном случае, при нарушении процесса

нагрева, у выходного изделия могут появиться дефекты, оно может потерять цвет, требуемые свойства и другие физико-механические характеристики. Поэтому главной целью исследования является математическое описание процессов нагрева и плавления. Исходя из этого можно будет реализовать программное моделирование технологического процесса и отобразить результаты в SCADA-системе.

# ГЛАВА 1. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

## 1.1 Методы изготовления пластмасс

Существует четыре основных метода изготовления изделий из пластика:

- 1) Вакуумная формовка;
- 2) Методика выдувки;
- 3) Экструзионный метод;
- 4) Литьё под давлением.

В данной работе будет рассмотрено литьё пластмасс под давлением, потому что этот способ является самым распространенным в нашей стране. Литьё под давлением – сложный производственный процесс. Его основной задачей является преобразование твердых (сыпучих) исходных полимеров в жидкую расплавленную пластмассу, которую затем под давлением поместят в пресс-форму, чтобы осуществить формировку конечного изделия. Основным фактором, по которому можно оценить качество литья, является нагрев пластмасс. Он может осуществляться несколькими различными способами:

- ⟨ При помощи трубчатых электронагревателей (далее ТЭН) – наиболее распространенный вариант;
- ⟨ При помощи водяного пара;
- ⟨ При помощи воздействия электрической дуги;
- ⟨ При помощи открытого огня.

Чтобы понять, в чем заключаются принципиальные различия, поясним особенности каждого метода.

Самым распространенным вариантом является нагрев пластмасс при помощи ТЭНов. Это обуславливается простотой изготовления нагревателей (что влечет за собой еще одно достоинство - сравнительно невысокую стоимость) и низкую чувствительностью к качеству электроэнергии. Однако этот



метод имеет и недостатки. Так, например, для обеспечения требуемой скорости разогрева, температура нагревателя при запуске должна существенно превышать требуемую по технологии рабочую температуру, а значит повышается мощность нагревателя и, следовательно, его размеры.

Плавление при помощи водяного пара имеет смысл применять там, где он имеется в избыточном количестве. Такой метод имеет ряд ограничений, обусловленных сравнительно низкой температурой подогрева даже при высоком давлении. Именно исходя из этого нагрев при помощи водяного пара используют преимущественно в технологиях, не требующих больших температур нагрева, в диапазоне от  $160^{\circ}\text{C}$  до  $170^{\circ}\text{C}$ . Установки нагрева пластика по такой методике получаются громоздкими и плохо поддаются автоматизации.

Приспособление для нагрева при помощи воздействия электрической дуги носит название дуговая печь. Такие печи делятся на два типа по месту фактического нахождения электрической дуги. Различают дуговые печи прямого нагрева – в них электрическая дуга помещена непосредственно в реагирующую среду, и печи косвенного нагрева, где материал (в нашем случае, гранулы полимера) нагревается не самой электрической дугой, а теплом, исходящим от неё. На рис. 1.1 – 1.3 приведены схемы дуговых печей трёх видов. На рис. 1.4 показан непосредственно электрический разряд в газовой среде.

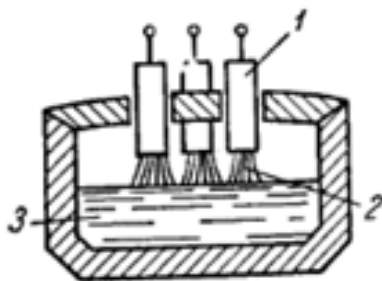


Рис. 1.1 – Схема прямого (непосредственного) нагрева электрической дугой [1, с. 20]

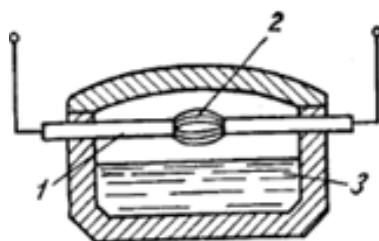


Рис. 1.2 – Схема косвенного нагрева электрической дугой [1, с. 20]

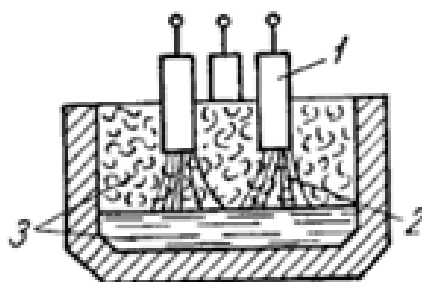


Рис. 1.3 – Схема комбинированного (смешанного) нагрева электрической дугой [1, с. 20]

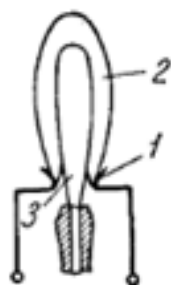


Рис. 1.4 – Электрический разряд в газовой среде [1, с. 20]

На рис. 1.1 – 1.4 цифрами обозначено: 1 – электрод, 2 – дуга, 3 – нагреваемый материал (может быть в жидкой, твердой или газообразной форме).

Нагрев при помощи открытого огня осуществляется посредством грелки, направленной на емкость с исходным материалом, которая имеет тем-

температуру плавления выше температуры плавления полимеров, с одной или нескольких сторон (для более равномерного нагрева всей массы пластика). Такие установки не сложны в реализации, но требуют защиты от возгорания посторонних предметов. Примером нагрева таким методом является шнековый экструдер (см. рис. 1.2).

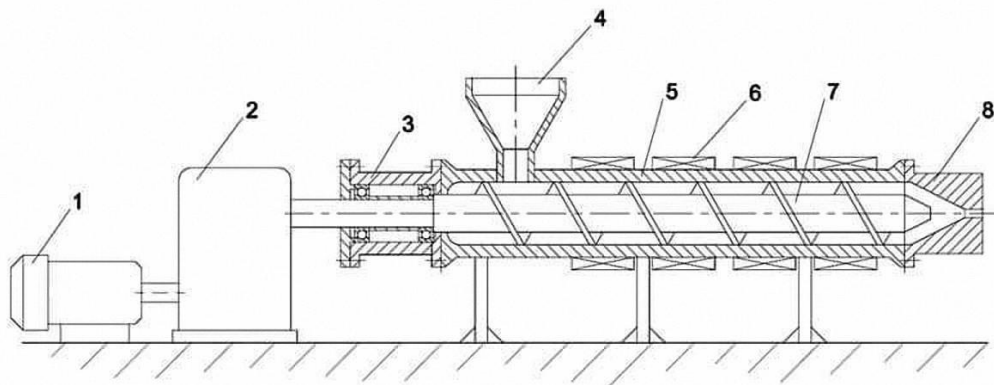


Рис. 1.5 – Схема шнекового экструдера [3]

На рисунке 1.5 представлена схема нагрева открытым огнем при помощи шнекового экструдера. Цифрами обозначено: 1 – электродвигатель, 2 – редуктор, 3 – подшипниковый узел, 4 – загрузочное устройство, 5 – корпус, 6 – нагревательный элемент, 7 – шнек, 8 – экструзионная головка. Гранулированный пластик попадает через загрузочное устройство (4) в основную полость, в которой начинает нагреваться от горелок (6) и посредством силы трения об шнек (7), который приводится в движение электродвигателем (1) и продвигает начинающую плавиться массу к форме через сопло (8).

В данной работе будет рассмотрена система нагрева последним способом – при помощи открытого огня, потому что он прост в реализации, но математическое описание до сих пор не так сильно изучено по сравнению с другими методами ввиду своей сложности.

## 1.2 Литьё пластмасс под давлением

Опишем более подробно основные этапы технологического процесса литья пластмасс:

1) Загрузка сырья (гранулы полимера) из загрузочного бункера в цилиндр литьевой машины;

2) Нагрев пластика. Это основной этап литья, в котором пластик переходит из твердого состояния в вязкотекучее. Основной задачей данного этапа является равномерный нагрев по всей массе, для чего используются несколько источников тепла внешнего обогрева цилиндра и силы трения, возникающие при деформировании материала вращающимся шнеком. Чтобы структура полимера не начала разрушаться от излишнего нагрева, практическую температуру расплава принимают на 30°C - 40°C ниже температуры деструкции. Примерные значения температурных диапазонов плавления для некоторых термопластов приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Температурные интервалы нагрева пластмасс (в °C)

Полимер	Температура стеклования или плавления	Термостойкость	Теоретический интервал переработки	Температура разложения при литье	Практический интервал переработки
1	2	3	4	5	6
ПС	100	310	100...310	280	170...250
ПВХ	87	170	87...170	-	170...190
ПММА	105	280	105...280	280	185...230
ПК	150	380	150...380	343	250...290
ПЭВП	136	320	136...320	296	180...280
ПП	176	300	176...300	278	190...260

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4	5	6
ПА-6	255	360	225...360	303	230...290
ПА-66	255	360	255...360	315	260...280
ПЭТФ	255	380	255...380	300	260...280

Составлено по: [6, с. 92].

В момент извлечения из формы температура изделия не должна превышать температуру стеклования в случае с аморфными полимерами и значение температуры термостойкости для кристаллических полимеров.

3) Заполнение формы расплавом (впрыск). Оно сопровождается охлаждением массы. Она имеет бóльшую температуру, чем стенки формы и при соприкосновении с ними, происходит нагревание материала стенок формы и уменьшение температуры пластика. Если форма не монолитна, а имеет какие-либо вставки, то при впрыскивании поток расплава встречает препятствие и, огибая его отдельными потоками, объединяется вновь с обратной стороны. В таких местах образуются стыковые швы, которые понижают прочность изделия.

Следует помнить, что существуют два различных вида полимеров: те, что поддаются повторной переплавке и те, которые после застывания теряют свои первоначальные свойства, и придать им другую форму уже не получится. Это означает, что работу не со всеми материалами можно продолжить с утра, оставив разогретую массу остывать после окончания рабочей смены. Так, при плавлении поликарбонатов, при необходимости сделать перерыв, температуру цилиндра поддерживают не ниже 160°C. Этот материал можно переплавлять вторично, но его физико-химические свойства при этом снижаются на 15-20% [6, с. 143].

## ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ

### 2.1 Разработка математической модели плавления термопласта

На первом этапе литья под давлением, твердый пластик поступает в зону подачи из бункера со смесью исходных материалов – гранул полимеров. Если принять емкость с гранулированным полимером и нагреватель за объект моделирования, то тогда входными воздействиями на систему будут: тип материала, начальная температура материала (которая в подавляющем большинстве случаев равна температуре окружающей среды) и его масса. Выходным параметром системы является текущая температура материала, исходя из значения которой мы будем делать вывод о необходимости продолжения нагревания или его остановке. В качестве управляющего воздействия примем температуру нагревателя, которая тоже будет изменяться в зависимости от выбранного режима работы. Схема объекта управления представлена на рисунке 2.1.

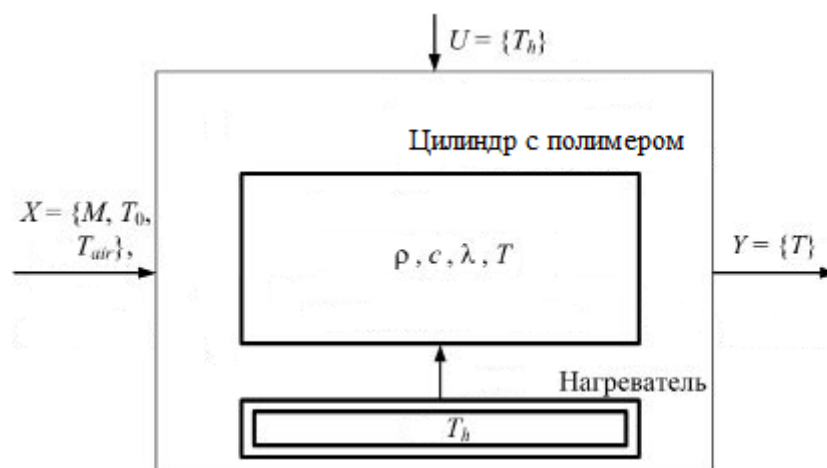


Рис. 2.1 – Объект управления плавлением пластика

На рис. 2.1 приняты следующие обозначения:

$X$ ,  $U$ ,  $Y$  – векторы входных параметров, управляющих воздействий и выходных параметров соответственно;

$M$  - тип материала;

$T_0$  - начальная температура материала,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{\text{air}}$  - температура воздуха в цехе,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_h$  – температура греющей поверхности (стенок цилиндра),  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\rho$ ,  $c$ ,  $\lambda$  - плотность ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), средняя удельная теплоемкость ( $\text{Дж}/(\text{кг } ^{\circ}\text{C})$ ) и теплопроводность ( $\text{Вт}/(\text{м } ^{\circ}\text{C})$ ) полимера;

$T$  - температура полимера,  $^{\circ}\text{C}$ .

В отличие от плотности  $\rho$  и средней удельной теплоёмкости  $\lambda$ , которые являются постоянными свойствами материала, его теплопроводность  $c$  будет изменяться с увеличением температуры полимера по нелинейному закону  $c(t)$ . Для удобства восприятия можем обозначать входной сигнал .

На рисунке 2.2 показан график изменения теплопроводности  $c(t)$  на примере полистирола и полиметилметакрилата.

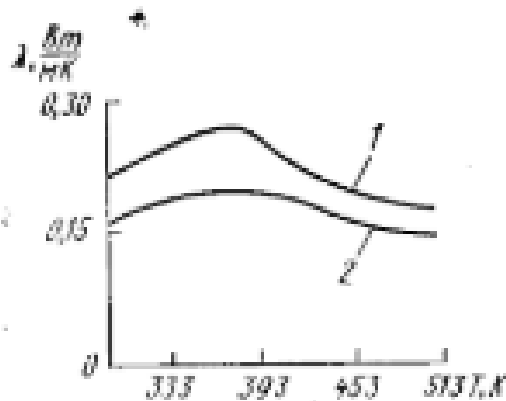


Рис. 2.2 – Зависимость значений коэффициента теплопроводности от температуры для полиметилметакрилата (1) и полистирола (2) [1, с. 255]

Из рисунка 2.2 становится понятно, что при создании математической модели плавления пластика необходимо учитывать то, как с изменением температуры меняется соотношение между основными составляющими.

В таблице 2.1 приведены постоянные теплофизические характеристики  $\rho$  и  $\lambda$  для некоторых наиболее распространенных полимеров, а также диапазоны изменения их теплопроводности.

Таблица 2.1

## Теплофизические свойства термопластов

Полимер	Плотность, г/м <sup>3</sup>	Удельная (массовая) теплоёмкость, кДж/(кг*К)	Теплопроводность, Вт/(м К)
Полистирол	1.04	1.2...1.8	0.14...0.18
Поливинилхлорид	1.35...1.43	0.9	0.159
Органическое стекло	1.18	1.3...1.7	0.19...0.20
Поликарбонат	1.2	1.2...2.4	0.20...0.28
Полиэтилен высокой плотности	0.923	1.8...2.4	0.4...0.5
Полипропилен	0.92...0.93	1.7...1.9	0.12...0.25
Полиамид 6	1.13...1.14	1.7...2.5	0.27...0.28
Полиамид 66 (нейлон)	1.1	0.87...0.88	0.25
Полиэтилентерефталат	1.4	1.0...2.3	0.21...0.28

Составлено по: [13].

Моделирование процесса нагрева полимеров основывается на законе сохранения энергии. Математическое описание зоны плавления было изучено профессором З. Тадмором [12]. Он предположил, что процесс плавления является стационарным, и исходя из этого построил свою модель, приняв следующие допущения:

1. Среда несжимаема;
2. Расплав термопласта не обладает упругими свойствами;
3. Массовые силы малы и ими можно пренебречь;



4. Теплофизические свойства полимера постоянны, за исключением теплопроводности (о чем говорилось ранее).

Внутренняя энергия массы будет являться функцией от температуры и удельного объёма, но при этом её считают постоянной. Тогда, при принятии допущения о несжимаемости расплава, уравнение сохранения энергии примет вид:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho u \, dV + \int_V \rho \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} \, dS = \int_V \rho \mathbf{P} : \mathbf{D} \, dV \quad (2.1)$$

Здесь  $u$  – удельная теплоёмкость материала, изменяющаяся с повышением температуры, кДж/(кг\*К);

$\rho$  – плотность пластика, кг/м<sup>3</sup>;

$\mathbf{q}$  – вектор теплового потока. Используя обобщенную форму закона Фурье, его можно выразить в виде  $\mathbf{q} = -\mathbf{k} \cdot \nabla T$ ;

$\mathbf{P}$  – тензор напряжений.  $\mathbf{P} = -p \mathbf{I} + \mathbf{P}'$ , где  $\mathbf{P}'$  – тензор напряжений в рассматриваемой точке,  $p$  – гидростатическое давление,  $\mathbf{I}$  – единичный тензор, определяемый в виде единичной матрицы:

$\mathbf{v}$  – скорость, с которой совершается работа в любой точке поверхности;

$\sigma$  – поверхностная тепловая энергия.

Значения плотности термопласта приведены в табл. 2.1.

При принятии во внимание допущений, о которых говорил З. Тадмор [12], уравнение сохранения энергии (2.1) в системе координат XYZ принимает следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \rho \left( \frac{1}{2} \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} + \Phi \right) \right) + \nabla \cdot \left( \rho \mathbf{v} \left( \frac{1}{2} \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} + \Phi \right) \right) = \nabla \cdot \left( \mathbf{k} \cdot \nabla T \right) + \dot{q} \quad (2.2)$$

Здесь  $L$ ,  $B$  и  $H$  – длина, ширина и высота в прямоугольной системе координат;

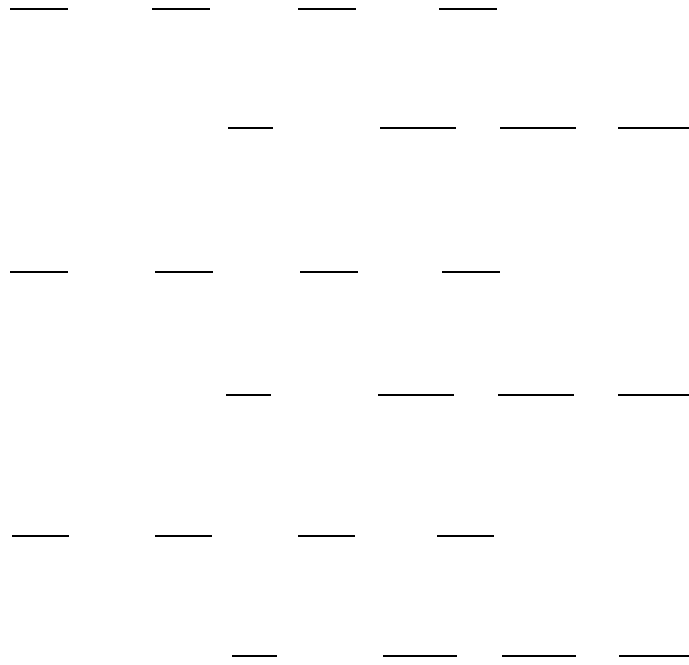
$v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$  – соответствующие компоненты вектора скорости жидкости;

$\Phi$  – функция диссипации, расчет которой приведен в формуле (2.17).

Уравнение состояния для несжимаемой жидкости, которой являются полимеры, связывает тензор напряжений и тензор скоростей деформации. С учетом постоянства вязкости и плотности расплавленной массы, которые вытекают из условия несжимаемости, получаем уравнение Навье-Стокса [12]:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \mathbf{v}) \right) = \nabla \cdot \left( \mathbf{k} \cdot \nabla T \right) + \dot{q} \quad (2.3)$$

Это уравнение даст нам представление о том, как именно температура нагрева распределяется по всей массе полимера, где уже нагретый термопласт смешивается с гранулированным посредством шнека. Ниже представлены компоненты уравнения (2.3) в прямоугольной системе координат для расчетов.



Здесь — — — — градиенты давления по соответствующим координатам;

— коэффициент вязкости, являющийся функцией скорости сдвига и температуры. Он рассчитывается индивидуально для каждого вида термопластов (см. формулу 2.4).

$$\eta = \eta_0 \left( \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^{-n} \exp \left( - \frac{U}{RT} \right) \quad (2.4)$$

где — температурный коэффициент вязкости;

$n$  — показатель аномалии вязкости;

— коэффициент консистенции расплава полимера при начальной температуре ;

— квадратичный инвариант тензора скоростей деформаций (рассчитан в формуле 2.12).

Функция диссипации из уравнения (2.2) находится по следующей формуле:

$$\frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (2.5)$$

Здесь – компоненты тензора девиатора напряжений, расчет для каждого случая приведен в формулах (2.6) – (2.11).

$$\frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \quad (2.6)$$

$$\frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (2.7)$$

$$\frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (2.8)$$

$$\frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \quad (2.9)$$

$$\frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (2.10)$$

$$\frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (2.11)$$

Подставив выражения для вычисления компонентов тензоров девиатора напряжения  $\sigma_{ij}$ , получим выражение для вычисления квадратичного инварианта тензора скоростей деформаций:

$$\frac{1}{2} \text{tr}(\dot{\epsilon})^2 = \frac{1}{2} (\dot{\epsilon}_{11}^2 + \dot{\epsilon}_{22}^2 + \dot{\epsilon}_{33}^2 + 2\dot{\epsilon}_{12}^2 + 2\dot{\epsilon}_{13}^2 + 2\dot{\epsilon}_{23}^2) \quad (2.12)$$

Тогда выражение для вычисления функции диссипации сократится до вида:

Для управления нагревателем, необходимо знать текущую температуру полимера в цилиндре. Уравнение состояния позволяет рассчитать среднюю температуру расплава в данный момент, в зависимости от давления в ней.

$$T = T_0 + \frac{1}{\alpha} \left( \frac{p}{p_0} - 1 \right) \quad (2.13)$$

где  $\alpha$  – коэффициент сжимаемости расплава, МПа<sup>-1</sup>;  
 $c_p$  – удельная теплоёмкость расплава, кДж/(кг · °С);  
 $T_0$  и  $T_1$  – температура расплава перед входом в сопло и в самой форме после впрыска, К;  
 $p$  – среднее давление в форме на стадии заливки, МПа;

– константы материала, которые определяются экспериментально и являются константами для каждого вида полимеров, значения которых приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Значения постоянных уравнения состояния для некоторых термопластов

Термопласт	$\pi$ , МПа	$\omega \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$(R/M) \cdot 10^2$ , Дж/(кг·К)
Полистирол	180	0.822	7.98
Поликарбонат	67	0.61	3.27
Органическое стекло	210	0.734	8.3
Полиэтилен высокой плотности	677	1.11	29.7
Полипропилен	160	0.620	19.7
Полиамид 6	150	0.722	7.33

Составлено по: [6].

Процесс формирования конечного изделия завершается остыванием пластика в форме уже без давления. При таких условиях расплав остывает быстрее, чем на первом этапе. Время выдержки под давлением подбирают таким образом, чтобы расплавленная масса успела застыть. В противном случае при отсутствии давления она вытечет из формы. Время остывания изделия без давления определяется толщиной изделия, его формой и теплопроводностью исходного материала. Совокупность этих параметров помогает оценить температуру в центре изделия на момент его извлечения из формы, чтобы предотвратить вынимание ещё не затвердевшего изделия. Полное время охлаждения складывается из времени охлаждения под давлением и без него.

## 2.2 Разработка математической модели горелки

Очень часто на производстве используют эжекционные горелки, отличительной особенностью которых является зазор между камерой горения и кожухом топки (рис. 2.3). В этот промежуток подаётся вторичный воздух, являющийся источником кислорода для источника пламени. Смешиваясь с продуктами горения, воздух охлаждает внешние стенки кожуха.

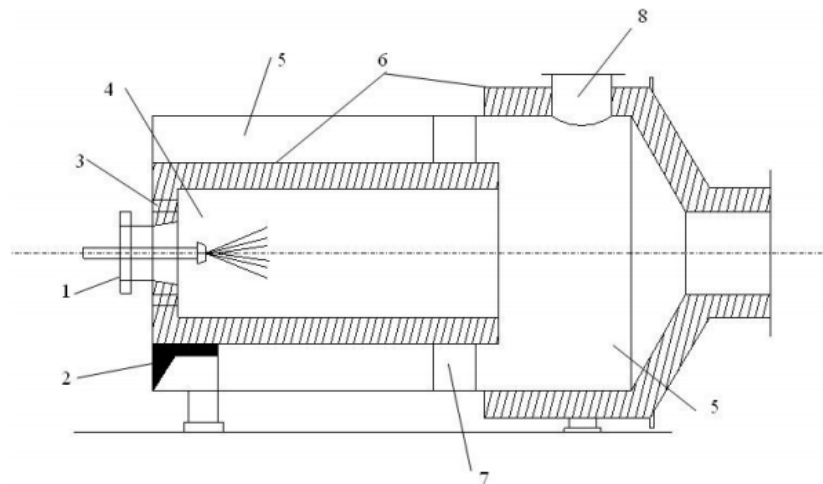


Рис. 2.3 – Схема топki с охлаждением наружных стенок камеры горения [8, с. 2]

На рисунке 2.3 цифрами обозначено: 1 – гнездо для установки форсунки; 2 – ввод вторичного воздуха; 3 – контроль; 4 – камера горения; 5 – камера смешения; 6 – шамотный кирпич; 7 – опоры; 8 – взрывной клапан.

Разработаем математическую модель эжекционной горелки. Пусть потери тепла в окружающую среду пренебрежимо малы. Тогда уравнение, описывающее динамику горения, имеет вид [9]:

$$\text{—} \quad (2.14)$$

Здесь – масса нагреваемого термопласта, кг;

– удельная теплоёмкость термопласта, кДж/кг ;

– теплотворная способность газа, кДж/кг;

- расход газа для горения,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;
- коэффициент теплоотдачи к стенке камеры горения;
- площадь стенок камеры горения,  $\text{м}^2$ ;
- температура стенок камеры горения,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- расход воздуха для горения,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;
- температура вторичного воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ .

Видно, что мощность горелки тратится на то, чтобы нагреть незначительное количество вторичного воздуха, стенку цилиндра, к которой она прижимается, и, самое главное, от стенки цилиндра нагреть термопласт. Перепишем это уравнение, приведя к виду:

$$\frac{Q_{\text{газ}}}{V_{\text{газ}}} + \frac{Q_{\text{возд}}}{V_{\text{возд}}} + \alpha_{\text{ст}} F_{\text{ст}} (T_{\text{ст}} - T_{\text{ж}}) = \rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}} \frac{dT_{\text{ж}}}{dt} + \rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}} c_{\text{ж}} \frac{dT_{\text{ж}}}{dt} \quad (2.15)$$

Зная температуру стенки  $T_{\text{ст}}$ , можем получать необходимое значение температуры термопласта  $T_{\text{ж}}$ , задавая расход газа. Разделим уравнение (2.15) на множитель  $\rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}}$  и приведём к привычному нам виду.

$$\frac{Q_{\text{газ}}}{\rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}}} + \frac{Q_{\text{возд}}}{\rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}}} + \alpha_{\text{ст}} F_{\text{ст}} \frac{T_{\text{ст}} - T_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}}} = \frac{dT_{\text{ж}}}{dt} + c_{\text{ж}} \frac{dT_{\text{ж}}}{dt} \quad (2.16)$$

Здесь  $\tau$  – постоянная времени объекта (горелки),  $\alpha_{\text{ст}}$  – коэффициенты.

Уравнение (2.16) полностью отражает процессы, происходящие при нагреве пластмасс эжекционной горелкой. Производная по времени описывает



изменение температуры стенки цилиндра в зависимости от расхода газа и воздуха. Интегрируя это уравнение, можем прогнозировать, какой будет температура пластика при различных количествах подаваемого газа. Таким образом, зная зависимость между входным воздействием и температурой расплава в форме, можем изменять мощность горелки в нужную сторону и тем самым регулировать процесс плавления.

### 2.3 Измерение температуры в экструдере

Перед тем, как начать создавать регулятор, контролирующей температуру расплава, нужно понимать, что какой бы датчик температуры мы ни поставили для обратной связи, он будет проводить измерения лишь в одной точке. В то время как перепад температур расплава очень велик. На практике эту проблему решают измерением температуры металлического корпуса цилиндра, которую к тому же легче стабилизировать [4]. В связи с этим длину всего экструдера делят на температурные зоны. Это зоны, температура расплавленного пластика в которых примерно одинакова и её можно контролировать таким образом. Например, в коротких экструдерах с соотношением длина/ширина от 24:1 до 26:1 обычно задают три-четыре зоны регулирования. С увеличением длины экструдера количество зон может достигать до десяти.

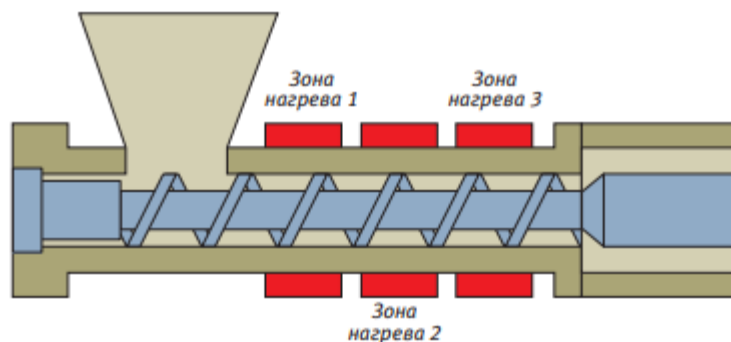


Рис. 2.3 – Схема расположения зон нагрева в экструдере [4, с. 48]

На рис. 2.3 приведен пример расположения температурных зон для короткого экструдера. Допущение того, что мы измеряем не реальную температуру расплава, а лишь температуру стенок цилиндра, приводит нас к тому, что мы должны учитывать время стабилизации реальной температуры расплава. Температура ближайшей к загрузочному отверстию зоны нагрева должна быть  $40^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$ . Этого достаточно, чтобы подогреть гранулы, но не допустить их слипания на входе. Температура в зоне 2 должна быть установлена на  $5^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C}$  ниже температуры плавления. Последующий нагрев происходит уже не только за счёт нагревательных элементов, но и за счёт преобразования механической энергии от шнека. Поэтому разницу температур между второй зоной и последующими нужно задавать с равными промежутками, постепенно снижая.

#### 2.4 Синтез системы управления

Ввиду того, что весь экструдер поделён на температурные зоны, каждая из которых нагревается отдельной горелкой, целесообразно для каждой из них создать свою подсистему управления с уникальным регулятором. Структурная схема одной такой системы приведена на рис. 2.4

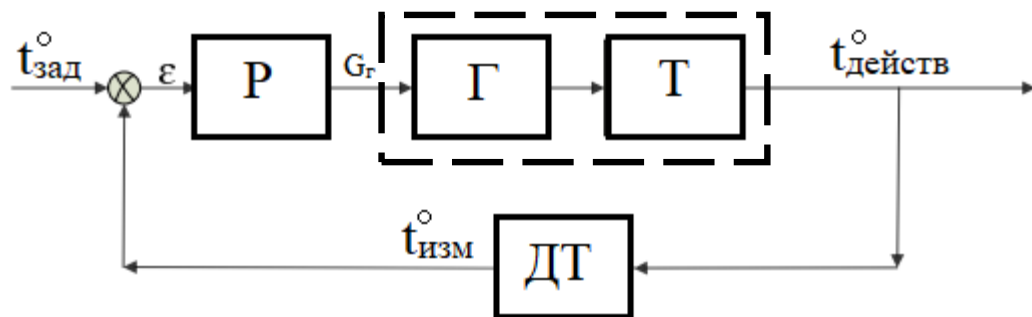


Рис. 2.4 – Структурная схема одной зоны нагрева

На рис. 2.4 обозначено: P – регулятор; Γ – горелка; T – цилиндр с термопластом;  $t_{\text{зад}}$  – заданное значение температуры;  $t_{\text{действ}}$  – действительная температура стенки цилиндра;  $t_{\text{изм}}$  – измеренная датчиком температура;  $\varepsilon$  – сигнал ошибки.

разница между измеренной и заданной температурой. Пунктирной линией выделен объект управления.

Чтобы регулирование нагрева производилось в автономном режиме, установим ПИ-регулятор. Он будет увеличивать или уменьшать расход газа в зависимости от измеренной температуры. ПФ такого регулятора:

\_\_\_\_\_

Здесь — постоянная времени, ————. Для каждой зоны регулятор будет иметь отличную от других постоянную  $T_1$ , которая будет определяться температурой нагрева именно в этой зоне. Запишем то же самое в виде дифференциальных уравнений:

\_\_\_\_\_ —

Зная передаточные функции, описывающие регулятор и объект управления, можно приступить к моделированию технологического процесса плавления пластмасс.

## ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

### 3.1 Выбор среды моделирования

Существует множество вариантов для моделирования процессов. Например, при наличии передаточных функций, можно построить модель в среде Simulink и получить переходные характеристики, сделать выводы о поведении всего процесса. Но если стоит задача не просто совершить теоретические расчеты, а внедрить разработку в производство, то загрузка модели в контроллер будет вполне оправданным. Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) в таком случае будет включать в себя модель объекта управления и систему управления нижнего уровня, которые реализуются как проекты в инструментальной системе Unity Pro, а также систему управления верхнего уровня, которая разрабатывается как SCADA-система в виде проекта в инструментальной системе Citect Studio. Последняя позволит наглядно отобразить результаты моделирования и разработать интерфейс работы оператора.

### 3.2 Выбор языка программирования

Для начала выберем язык программирования, с помощью которого будет осуществляться моделирование процесса нагрева и плавления. Международной электротехнической комиссией был разработан стандарт МЭК – 61131 - 3, который стандартизировал языки технологического программирования. Именно они поддерживаются большинством современных программируемых контроллеров. Согласно этому стандарту, существует пять основных сертифицированных языков программирования ПЛК. Они делятся на две группы в зависимости от логики программирования. Это логические и текстовые языки программирования. Дадим описание каждого из них.

1) LD (Ladder Diagram) – язык релейно-контактных схем (релейных диаграмм). Удобен в использовании для инженеров автоматизации, которые

работают на промышленных предприятиях. Программа, написанная на стандартизированном языке LD, представляет собой графический интерфейс, состоящий из логических операций, замкнутых и разомкнутых контактов. За логическую единицу и логический ноль принято наличие или отсутствие тока соответственно.

2) FBD (Function Block Diagram) — язык диаграмм функциональных блоков. Программа представляет собой логические цепи, выполняемые последовательно сверху вниз. На цепях могут быть размещены метки. Переход на метку меняет упорядоченный ход программы, что позволяет программировать условия и циклы;

3) SFC (Sequential Function Chart) — язык последовательных функциональных схем. Предназначен для написания программ последовательного управления технологическим процессом, используется для программирования автоматов.

4) IL (Instruction List) — представляет собой список инструкций и является ассемблероподобным языком. Применяется на производстве для программирования автоматизированных систем управления технологическим процессом и систем промышленной автоматизации

5) ST (Structured Text) — представляет собой структурированный текст, который является паскалеподобным языком. Удобен при написании больших программ и для работы с аналоговыми сигналами.

Если первые три языка программирования относятся к графическим, то IL и ST, как понятно из описания – текстовые. Наибольшее распространение в промышленности получили языки LD, ST и FBD. Ввиду того, что автоматизация плавления термопласта сложный процесс, написание программы может не ограничиться использованием какого-то одного. Поэтому при создании мо-

дели управления я использовала несколько секций на двух стандартизированных языка программирования – релейно-лестничной логики LD и структурированного текста ST.

### 3.2 Разработка алгоритмов и написание программы

Систему управления нижнего уровня будем реализовывать в системе Unity Pro, т.к. она была изучена в процессе обучения и отвечает всем требованиям, предъявляемым при проектировании модели горелки. С помощью неё будет осуществлено автоматическое управление ходом технологического процесса, а SCADA-система позволит графически отображать информацию о нагреве пластмасс, принимать команды от оператора, передавать их в систему управления нижнего уровня и тем самым вносить изменения в ход процесса в соответствии. Также она имеет возможности регистрировать заданные события, в том числе и аварийные.

Задача данной работы состоит в том, чтобы создать автоматическую систему нагрева и плавления термопласта в соответствии с выбранным видом (которые отличаются температурой плавления, плотностью и тд). Опишем алгоритм работы установки нагрева. Для упрощения моделирования допустим, что весь полимер в цилиндре нагревается равномерно.

При пуске производства:

1. Нажата кнопка пуска.
2. Открывается крышка для подачи гранулированной пластмассы, масса пластмассы увеличивается на условные 10 гр/сек. Датчик Подача загорается зелёным цветом.
3. При заполнении емкости, т.е. при достижении массой значения 350 гр, срабатывает датчик Весы 1, крышка закрывается, подача прекращается. Датчик Подача загорается красным цветом.

4. Как только масса достигает нужного значения, начинается подача газа (если это первый запуск), температура повышается до значения VT, проходя значения NT и PT (срабатывают соответствующие датчики).

5. При достижении высокой температуры (230 °C), расход газа уменьшается до минимально необходимого для поддержания PT, температура пластика начинает медленно снижаться (1 гр/с).

6. Если под клапаном находится тара, в которую нужно сливать жидкую пластмассу (т.е. сработал ДТ), то открывается клапан подачи жидкой пластмассы в форму – масса уменьшается с условной скоростью 50 гр/с. Датчик Клапан загорается зелёным.

7. При полном опустошении ёмкости нагревателя загорается датчик Весы 0. Клапан подачи жидкой пластмассы закрывается, открывается крышка для подачи гранулированной пластмассы. Датчик Подача загорается зеленым цветом, Клапан – красным.

Остановка производства:

1. При диагностике или любом другом виде анализа оборудования процесс может быть остановлен по нажатию кнопки «Завершение».

2. При неполадке на производстве процесс может быть остановлен по нажатию кнопки «Стоп».

При продолжении работы:

1. Процесс проходит автономно после успешного пуска.

2. Если процесс был остановлен нажатием кнопки «Завершение», его можно продолжить нажатием кнопки «Пуск».

Модель объекта управления реализована в нескольких секциях на языке релейно-лестничной логики LD и языке структурированного текста ST. Расскажем подробно о каждой составляющей этих блоков и дадим пояснения работы.

В Приложении 1 представлена часть секции, отвечающей за увеличение массы при открытии крышки на 10 гр/сек и незначительное уменьшение температуры на 1°C в секунду при выключенном нагревателе. Также в этой секции регулируется открытие крышки, клапана и работа нагревателя.

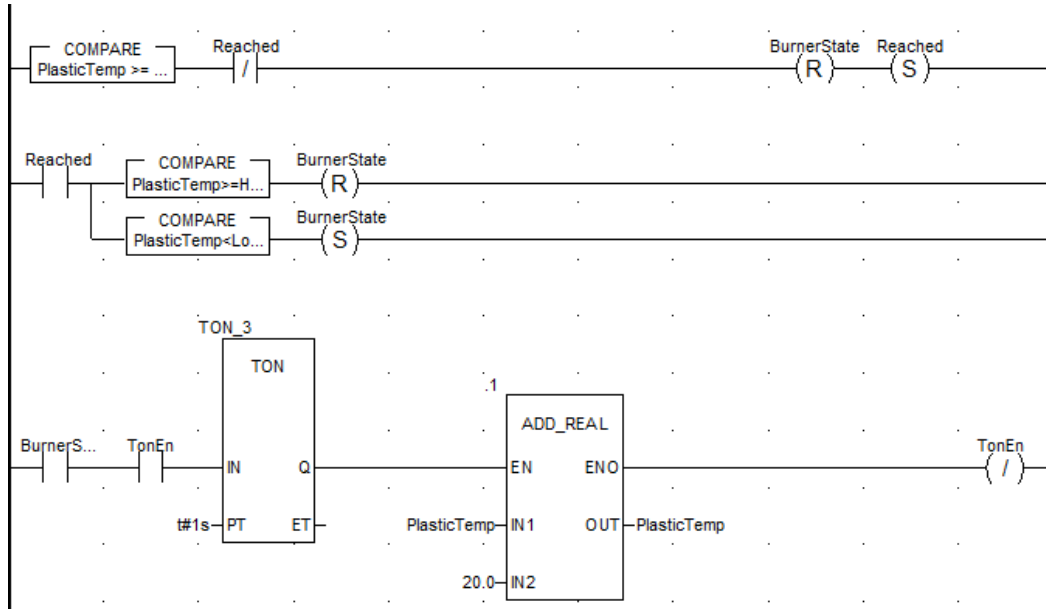


Рисунок 3.1 – Реализация поддержания рабочей температуры

На рис. 3.1 часть секции имитирует работу нагревателя. Задана максимальная температура пластмассы - 230°C. Нагреваясь до этой температуры, нагреватель переходит в режим поддержания рабочей температуры (PT) в диапазоне от 210°C до 230°C. При этом при нагреве температура повышается на 20°C в секунду.

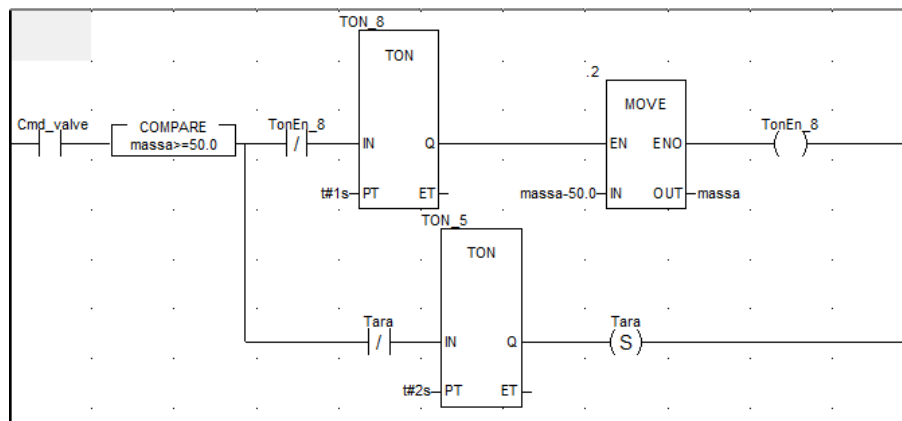


Рисунок 3.2 – Реализация заполнения тары жидкой пластмассой



На рис. 3.2 показана часть секции, реализующей заполнение формы расплавленным пластиком. Имитируя движение конвейера, датчик тары срабатывает каждые 2 секунды. При наличии тары под дозатором и открытом клапане, масса пластмассы в нагревателе уменьшается на 50 гр каждую секунду.

На рис. 3.3 представлены все пользовательские переменные, которые используются в модели объекта управления.

Name	Type	Value	Comm
AirTemp	REAL	20.0	
BumerState	BOOL		
Cmd_Valve	BOOL		
CmdCap	BOOL		
CmdInitModel	BOOL		
HighTemp	REAL	220.0	
LowTemp	REAL	210.0	
Massa	REAL	0.0	
PlasticTemp	REAL		
Reached	BOOL		
SecPulse	EBOOL		
Stop	BOOL		
tara	BOOL		
TonEn	BOOL		
TonEn_8	BOOL		
Vesy0	REAL	0.0	
Vesy1	REAL	350.0	

Рисунок 3.3 – Пользовательские переменные модели ОУ

Система управления реализована на языке структурированного текста ST. В Приложении 1 представлена реализация системы управления. Здесь задаются действия по нажатию кнопок «Стоп» и «Завершение», также уменьшение мощности горелки при достижении максимальной температуры 230°C.

### 3.3 Моделирование в SCADA-системе

Для визуализации технического процесса в данной работе было реализовано: операторский экран, экран технологического процесса, тренды уровня температуры с помощью инструмента Process Analyst, сигнал тревоги при

опасном уровне температуры или же при слишком низком её значении. На рис. 3.4 представлен экран с ТП.

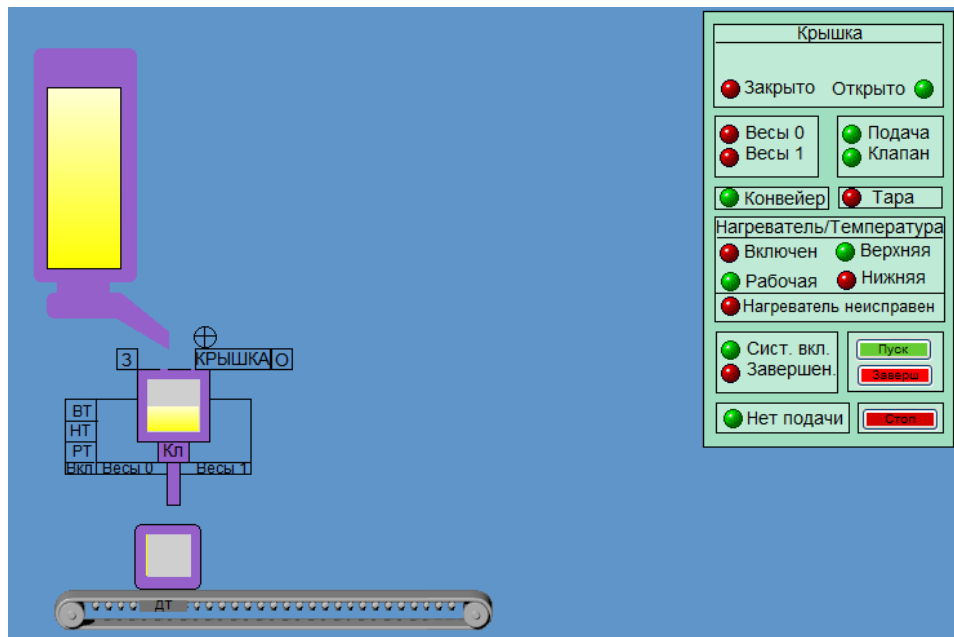


Рисунок 3.4 – Технический процесс на экране

На экране расположена схема технического процесса, три кнопки, отвечающими за запуск и остановку техпроцесса. Экран анимирован – на нем изменяется уровень пластмассы в форме, а также цвета датчиков в соответствии со значениями тэгов-переменных, получаемых из системы управления нижнего уровня. Ниже представлена операторская панель.

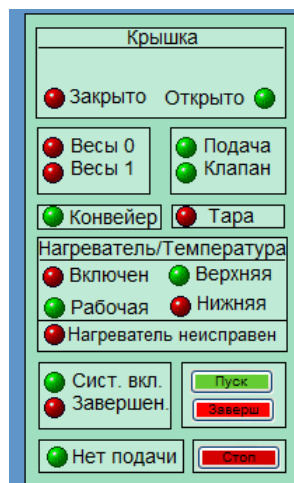


Рисунок 3.5 – Панель управления оператора

У оператора имеется доступ к кнопкам включения и выключения технического процесса. Также присутствует информационная панель о состоянии каждого датчика и текущем режиме работы.

Также в проекте SCADA присутствует экран трендов, реализованных с помощью Process Analyst (рис. .6).

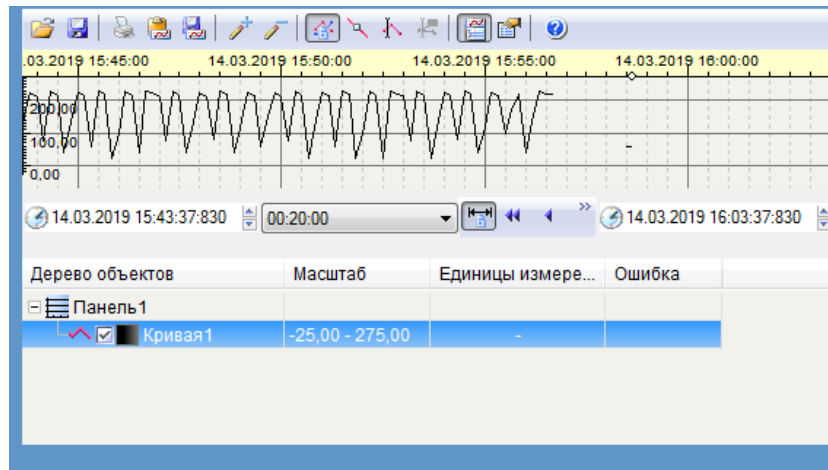


Рисунок 3.6 – Операторский экран трендов

На экране выводится температура пластмассы в зависимости от состояния нагревателя (расхода газа).

На рис. 3.7 представлен экран алармов. В нем фиксируются предупреждения о достижении температурой крайних значений.

Дата	Время	Дескриптор	Имя	Состояние	Комментар
14.03.2019	15:59:32	Temp_Alarm	Уровень температуры	Низкий	

Рисунок 3.7 – Экран предупреждений

Пример работы системы приведён на рисунке 3.7.

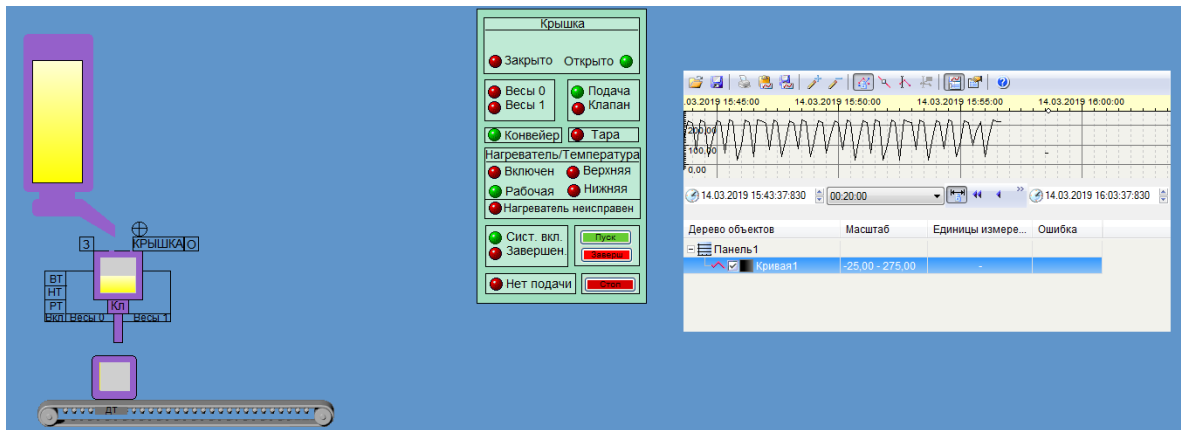


Рисунок 3.7 - Операторский экран и схем ТП во время работы АСУ ТП

Здесь показан главный операторский экран и экран с техническим процессом системы SCADA во время работы. Видно, что в данный момент происходит засыпание гранулированной пластмассы в емкость нагревателя, при этом температура его находится в режиме РТ, что говорит нам о том, что это не первый рабочий цикл. Крышка при засыпании открыта – об этом свидетельствует датчик. Также по датчикам можно убедиться, что система включена, подача осуществляется, конвейер работает. Техпроцесс осуществляется в нормальном режиме.

Процесс тестирования работы как системы управления, так и объекта управления проводится с помощью анимационной таблице Unity Pro. Это позволяет в режиме реального времени видеть значения переменных, а также изменять их для запуска, остановки и других необходимых действий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе было проведено исследование области литья пластика и создана математическая модель процесса, даны пояснения к ней. В процессе изучения технологического процесса были рассмотрены существующие способы литья пластмасс. Для рассмотрения был выбран способ литья пластика под давлением. Также проведено ознакомление с возможными методами нагрева пластика, что является важнейшим этапом в процессе литья. В частности, было рассмотрено устройство эжекционной горелки. Создана математическая модель процесса нагрева, выбран способ измерения температуры при использовании шнекового экструдера.

Составленные математические модели плавления полимера и работы горелки позволили выбрать тип регуляторов и создать систему автоматического управления с местными обратными связями по температуре. С некоторыми допущениями, при помощи инструментов Unity Pro и Citect SCADA была создана и отлажена система управления технологическим процессом литья пластмасс. Визуализация и управление техпроцессом осуществлялось с помощью проекта в SCADA-системе. Выполнено отображение не только процесса нагрева пластика, но и всего цикла литья пластмасс.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом

ВТ – высокая температура

ДТ – датчик тары

МЭК – Международная электротехническая комиссия

НТ – низкая температура

ОУ – объект управления

ПА-6 – полиамид 6

ПА-66 – полиамид 66 (нейлон)

ПВХ – поливинилхлорид

ПК – поликарбонат

ПЛК – программируемый логический контроллер

ПММА – органическое стекло

ПС – полистирол

ПП – полипропилен

ПФ – передаточная функция

ПЭВП – полиэтилен высокой плотности

ПЭТФ – полиэтилентерефталат

РТ – рабочая температура

ТЭН – трубчатый электронагреватель

FBD – Function Block Diagram

IL – Instruction List

LD – Ladder Diagram

SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition

SFC – Sequential Function Chart

ST – Structured Text

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бабакова Н.А., Воронов А.А., Воронова А.А. и др. Теория автоматического управления: Учебн. Для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления / Н.А. Бабаков, А.А. Воронова, А.А. Воронов и др.; под ред. А.А. Воронова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1986. 367 с.
2. Горин А.С. Повышение энергоэффективности индукционного нагрева при производстве пластмассы : магистерская диссертация / А.С. Горин; [Место защиты: Тольяттинский государственный университет]. – Тольятти, 2017. – 94 с.
3. Давыдов В.Г., Хохловский В.Н.: «Система супервизорного управления Citect SCADA».
4. Донской А. В., Куляшов С. М. Электротермия : Государственное энергетическое издательство, 1961. С 20, 255.
5. Литьё пластика – типы производства пластмассовых изделий [Электронный ресурс]: URL: <https://electro-nagrev.ru/primenienie/nagrevateli-dlya-obrabotki-polimerov/litie-plastica-tipy-proizvodstva-plastmassovih-izdeliy/>
6. Ляпков А. А. Технология переработки полимерных материалов [Электронный ресурс] : курс лекций / А. А. Ляпков; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). - Томск: Изд-во ТПУ, 2010.
7. Производство пластмассы (пластика) [Электронный ресурс] <https://moybiznes.org/proizvodstvo-plastika>
8. Пугачев В.И., Петриченко В.Г. Разработка математической модели процесса подогрева воздуха для сушки зерна / В.И. Пугачев, В.Г. Петриченко // Научный журнал КубГАУ. – 2012. - №75(01).
9. Руководство пользователя по программированию ПЛК в CodeSys 2.3



10. Сорокин А. Г. Разработка системы индукционного нагрева для производства пластмассы методом литья : диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.10 / Сорокин Алексей Григорьевич; [Место защиты: Сам. гос. техн. ун-т].- Самара, 2007.- 107 с.: ил. РГБ ОД, 61 07-5/5489
11. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. Пер. с англ. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
12. Теплопроводность пластиков и пластмасс, плотность пластмассы – физические свойства полимеров. [Электронный ресурс]: URL: <http://thermalinfo.ru/svojstva-materialov/plastmassa-i-plastik/teploprovodnost-plastikov-i-plastmass-fizicheskie-svojstva-polimerov>
13. Терморегуляция процесса экструзии / Пластикс. - 2012. - №4 (110). – С. 46-50.
14. Экструзия. Экструдеры. Экструзионные линии. [Электронный ресурс]: URL: [http://ence-gmbh.ru/polymer\\_description\\_and\\_processing/extruding\\_machines/](http://ence-gmbh.ru/polymer_description_and_processing/extruding_machines/)

## Листинги программ

```

SecPulse := %S6;
If CmdCap and (massa < 350.0) AND RE(SecPulse) then
  (* каждую секунду увеличиваем массу сухого пластика на 5 гр до достижения 350 гр*)
  massa := massa + 10.0;
end_if;

If CmdInitModel then
  (* В этой модели объекта управления зафиксируем температуру окружающего воздуха *)
  PlasticTemp := AirTemp;
  CmdCap := true;
  CmdInitModel := false;
end_if;

If (massa >= vesy1) and (CmdCap) then
  CmdCap := false;
  Cmd_Valve := true;
  BurnerState := true;
  PlasticTemp := AirTemp;
end_if;

if (massa <= 50.0) and (Cmd_Valve) then
  Tara := false;
  Cmd_Valve := false;
  CmdCap := true;
  PlasticTemp := AirTemp;
end_if;

If RE(SecPulse) AND (PlasticTemp > AirTemp) then
  PlasticTemp := PlasticTemp - 1.0; (* каждую секунду уменьшаем температуру нагревателя до температуры окружающей среды.)
end_if;

If (PlasticTemp >= HighTemp) then
  BurnerState := false;
end_if;

If Stop then
  CmdCap := false;
  BurnerState := false;
  Cmd_Valve := false;
  Stop := false;
end_if;

```