

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Автоматика и управление»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

д.т.н., профессор

_____ / Л.С. Казаринов

« ____ » _____ 2020 г.

Автоматизированная система разморозки полувагонов в транспортном цехе
Челябинского цинкового завода

Пояснительная записка
к выпускной квалификационной работе
ЮУрГУ – 270304.2020. 391 ПЗ ВКР

Руководитель проекта

к.т.н., доцент каф.АиУ

_____ / Барбасова Т.А.

« ____ » _____ 2020 г.

Автор работы

Студент гр. КЭ-418

_____ / Милевский И.С.

« ____ » _____ 2020 г.

Нормоконтролер

к.т.н., доцент каф.АиУ

_____ / Барбасова Т.А.

« ____ » _____ 2020 г.

Челябинск

2020

АННОТАЦИЯ

Милевский И.С. Автоматизированная система разморозки полувагонов в транспортном цехе Челябинского цинкового завода. – Челябинск: ЮУрГУ, ВШ ЭКН; 2020, 70 с., 31 ил., 7 табл., библиогр. список – 73 наим., 3 прил., 3 листа чертежей.

В выпускной квалификационной работе рассматривается автоматизация технологического процесса разморозки цинкового концентрата в транспортном цехе Челябинского цинкового завода на основе конвективного способа передачи тепла. Решены основные задачи, связанные с подбором отопительного механизма и выбором теплоносителя.

Была рассмотрена литература по типовой задаче обогрева руды. Составлены математическая модель обогревающего комплекса, структурная схема системы управления. Произведено моделирование системы управления температурой обогревающего устройства.

Реализация разработанной автоматизированной системы позволит сократить время размораживания грузовых вагонов и увеличить количество выпускаемой продукции. Моделирование системы управления и настройка регулировочных параметров обеспечивает качественное регулирование температуры воздухонагревателя.

					270304.2020.391 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Милевский			Автоматизированная система разморозки полувагонов в транспортном цехе Челябинского цинкового завода	Лит	Лист	Листов
Провер.		Барбасова					5	91
Н. Контр.		Барбасова				ФГАОУ ВО ЮУрГУ «НИУ»		
Утверд.		Казаринов						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ.....	9
1.1 Предприятия цинковой промышленности.....	9
1.2 Обзор литературы	10
1.3 Анализ и выбор метода размораживания	14
1.4 Постановка цели и задач работы	25
2 ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЕ	26
2.1 Воздухонагреватель	26
2.2 Датчики температуры	28
2.2.1 Температура в камере нагрева.....	28
2.2.2 Температура тормозных колодок.....	28
2.2.3 Температура контуров верхней и нижней циркуляции	28
2.2.4 Температура наружного воздуха.....	29
2.3 Клапаны.....	29
2.4 Вентиляторы и воздуховоды.....	31
2.5 Управляющее устройство.....	33
3 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ ВН	35
3.1 Расчет времени размораживания.....	35
3.2 Функциональная схема системы управления.....	39
3.3 Структурная схема системы управления.....	40
4 МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	43
4.1 Программное обеспечение	43
4.2 Составление схемы моделирования	48
4.3 Результаты моделирования системы.....	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	62
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	63
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	70

ВВЕДЕНИЕ

Практически каждое промышленное предприятие, использующее в качестве сырья полезные ископаемые, сталкивается с осложнениями в результате транспортировки в зимний период года и межсезонье. Грузы в результате длительной транспортировки при различных погодных условиях претерпевают оледенение.

Полезные ископаемые добываются в местах, где температура ниже 0 градусов, а также выпадают осадки. Затем грузовые полувагоны проезжают в теплых регионах страны или целый день под воздействием солнечных лучей, тогда в таком случае атмосферные осадки тают, образуется вода, которая просачивается в свободное пространство между фракциями груза. Ночью вода вновь оледеневает и образуется смесь груза и льда.

Особенно данная ситуация характерна для Российской Федерации, где полезные ископаемые добываются на севере страны. Сырье, поставляемое в полувагонах, приезжает вперемешку с атмосферными осадками, в результате чего становится непригодным для приема и отгрузки. Количество единиц готовой продукции, а также скорость производства готовой продукции предприятия снижается из-за ожидания поступления сырья в технологический процесс. Вследствие чего предприятие несет финансовые потери.

Именно поэтому решение данной задачи особо актуально на сегодняшний день. Прежде чем производить отгрузку оледенелого сырья, необходимо разморозить его, подготовив его к дальнейшему производственному процессу.

С целью решения вышеуказанной типовой задачи были разработаны специальные технологические отопительные комплексы по размораживанию грузовых вагонов, которые работают по принципам автоматического регулирования. Объектом управления в данной системе является нагревающий элемент, а регулируемым параметром – температура.

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Основной сложностью в управлении технологическим процессом размораживания груза является поддержание одинаковой температуры сырья по всему объему вагона.

Настоящая работа направлена на разработку автоматизированной системы разморозки полувагонов в транспортном цехе Челябинского цинкового завода с целью сокращения времени разгрузки замороженного сырья.

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		8

1 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Для разработки автоматизированной системы разморозки вагонов со смерзшимся грузом необходимо изучить технологический процесс. Для этого необходимо провести анализ и выбор существующих методов размораживания вагонов с грузом.

1.1 Предприятия цинковой промышленности

Россия находится на втором месте среди всех стран по запасам цинковых руд после Австралии. Хранящиеся в России запасы цинкового сырья оцениваются в 60,4 млн. тонн, что составляет 10 % от всех запасов цинка в мире.

Челябинский цинковый завод — самый крупный в России производитель цинка и единственный в стране поставщик металла с высокой чистотой. За 2019 год предприятие перешагнуло отметку в 200 тысяч тонн цинка готовой продукции [1]. Динамика роста наблюдается уже с 2016 года, когда на предприятии началась полномасштабная модернизация.

Реализация программ модернизации обеспечивают производство цинка качества SPECIAL HIGH GRADE, что подтверждается регистрацией Лондонской Биржей Металлов торговой марки CZP SHG (CHELYABINSK ZINC PLANT SPECIAL HIGH GRADE), гарантирующей чистоту металла не ниже 99,995 % по содержанию цинка [2]. Основной специализацией предприятия является производство цинка, также здесь производят цинковые сплавы, сульфат цинка, кадмий, индий и серную кислоту.

Расширение сырьевой базы призваны укрепить лидирующие позиции компании в цинковой отрасли России и максимально обеспечить растущие потребности отечественной промышленности в цинке высочайшего качества и сплавах на его основе.

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		9

Челябинский цинковый завод в своей деятельности руководствуется международными этическими нормами и стандартами ведения бизнеса. Социальная политика является составной частью корпоративной стратегии, направленной на устойчивое развитие компании в долгосрочной перспективе.

На ЧЦЗ в настоящее время проводится модернизация основного производства, которая позволит сбалансировать его плавильные и рафинировочные мощности и увеличить производительность предприятия до 200 тысяч тонн цинка в год.

Технологический процесс получения цинка начинается с разгрузки сырья. Предприятие закупает сульфидный цинковый концентрат [3], с содержанием цинка не менее 45 %. Сырье поступает в полувагонах вместимостью 69 тонн. Далее происходит отгрузка сырья в крытых складах обжигового цеха. В печах кипящего слоя происходит окисление цинкового концентрата при температуре 950 градусов по Цельсию за счет подачи воздуха [4].

Трудности возникают в зимний период времени, когда концентрат замерзает и фракции невозможно отгрузить в виде сыпучего материала [5–10]. Это наносит существенный экономический ущерб предприятию в виду уменьшения производства. В связи с этим возникает задача эффективной технической эксплуатации сырья: требуется разработать технологическое решение по разморозке оледенелого цинкового концентрата.

Автоматизация процесса разморозки сырья является одним из факторов роста производства готовой продукции на предприятии. Размораживание будет производиться непосредственно в полувагонах.

1.2 Обзор литературы

Для разморозки большого количества смерзшегося груза используют специальные технические устройства, далее тепляки [11; 12, с. 9]. Тепляки представляют собой специальное устройство, предназначенное для ускорения и оптимизации работы с грузом в зимний период и межсезонье. Устройство

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		10

представляет собой уникальный комплекс разогревающего типа, оснащенный всеми необходимыми для технологического процесса средствами и приборами контроля. Зачастую используется для разогрева груза и для последующей выгрузки на вагоноопрокидывателе или при помощи специальных устройств – грейферов.

Тепляки классифицируются различными способами: по вместимости полувагонов, типу сырья, предназначенному для разогрева, но самым значительным различием является выбранный метод разморозки. Методы разогрева строго зависят от типа теплоносителя, который участвует в технологическом процессе.

Основные виды теплоносителей:

- пар;
- теплый воздух (конвекция);
- инфракрасное излучение (электрические нагреватели);
- инфракрасное излучение (газовые нагреватели).

Одним из традиционных способов обогрева сырья являются паровые комплексы, которые используются на большинстве предприятий, занимающихся переработкой сырья. Тепляки, основанные на передаче тепла при помощи пара, представляют собой помещения, на стенах которых находятся регистры из гладких труб, по которым пускается пар [13]. Размораживание сырья происходит за несколько суток в зависимости от температуры и типа обогреваемого сырья. Зачастую такой способ используется для обогрева угля в области железнодорожного транспорта. Способ обладает значительным количеством серьезных недостатков:

- длительное время обогрева для достижения нужных результатов;
- огромное количества затрат энергии;
- невысокий показатель коэффициента полезного действия.

Длительность процесса размораживания охарактеризована невозможностью реализации полноценного покрытия всей площади поверхности отапливаемого помещения. В результате теплообмена в камере размораживания образуется конденсат, который вносит отрицательное воздействие на быстроедействие системы разморозки груза.

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		11

Конвективный метод также нашел широкое применение на практике. Комплексы на основе конвекционного метода состоят из внешнего изолированного помещения, мощных теплообменников, вентиляционными устройствами и специально разработанной системы управления технологическим процессом [13]. В качестве теплоносителя используется воздух, который нагревается в калориферах паром турбин. При помощи вентиляторов теплоноситель подается в разводящие каналы и через специальные сопла направляется на стенки кузовов полувагонов с сырьем.

В отличие от паровых комплексов системы размораживания груза, основанные на конвективных свойствах теплопередачи обладают значительно большим КПД и меньшим выделением влаги.

Вместо классических теплоносителей вроде воздуха и пара используется более экологичный и эффективный способ разогрева – электронагреватели. Принцип действия такого рода промышленных комплексов основан на инфракрасном излучении металлических элементов, под действием электрического тока, в светлом инфракрасном излучении [14–16].

Наиболее эффективным способом обогрева сырья в промышленности на данный момент является использования тепляков на основе инфракрасных газовых излучателей. Принцип работы таких устройств построен следующим образом: смесь газа и воздуха подводится в каналы керамической плитки, где процесс горения проходит таким образом, что пламя втягивается в каналы плитки [17].

При работе поверхность керамической плитки нагревается до температуры 850-900 °С, при этом интенсивность излучения крайне высокая при больших показателях скорости теплоотдачи [18]. Использование инфракрасных газовых нагревателей преобладает на рынке инженерных решений за счет экономической составляющей, так как, газ, как правило, дешевле электричества в 3-4 раза, за счет низкой сложности обслуживания нагревателей такого типа, из-за возможности гибкой настройки работы установки при наличии нескольких режимов работы нагревателя [19–20].

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		12

Так как сырье поступает в полувагонах необходимо строительство здания с проложенными через него железнодорожными путями. Вагоны загоняют внутрь и закрывают двери для улучшения теплоизоляции. Согласно [21] имеем следующие температурные ограничения:

- максимальная температура теплоносителя на входе в секцию – 160 °С;
- максимальная температура в секции – 90 °С;
- максимальная температура на тормозном цилиндре – 55 °С.

Тепляк должен обеспечивать разогрев сырья по объему вагона для возможности его разгрузки мостовыми кранами с навесным оборудованием в виде грейфера (рисунок 1.1) [22–23].



Рисунок 1.1 – Грейфер двухчелюстной

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		13

1.3 Анализ и выбор метода размораживания

Для создания любой автоматизированной системы и выбора оптимального метода обогрева требуется техническое задание, которое в свою очередь основывается на технических условиях. Для предприятия ПАО «ЧЦЗ» необходимо спроектировать автоматизированную систему, для решения существующей транспортной типовой задачи, указанной в пункте 1.1. По моему мнению оптимальным методом размораживания груза является конвективный способ разморозки сырья. Основные преимущества выбранного метода:

- дешевизна топлива;
- исключение возникновения пожароопасных ситуаций;
- хороший показатель эффективности.

Для конвективного способа разморозки сырья достаточно наличие одного воздухонагревателя, а для систем, основанных на инфракрасном излучении, количество нагревателей достигает десятков и сотен. В виду чего можно сделать вывод о том, что конвективный способ разогрева сырья более экономичный по сравнению со способом, основанном на инфракрасном излучении.

Процесс горения в выбранном методе происходит в изолированной камере смешивания воздуха и газ. Метод основан на переносе теплых воздушных масс по трубам воздуховодов, что уменьшает риск возникновения пожароопасных ситуаций в цехе.

Основным недостатком применения пара в качестве теплоносителя является повышенная влажность в камере разогрева, что приводит к низкому показателю эффективности системы.

Исходя из этого было принято решение о создании автоматизированной системы разморозки полувагонов в транспортном цехе Челябинского цинкового завода на основе конвективного способа размораживания.

Целью данной работы является сокращение времени отгрузки оледенелого цинкового концентрата. Наиболее важным фактором для данной системы является

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		14

время размораживания полувагона с грузом. Это позволит сделать вывод об эффективности выбранного способа.

Для определения времени разморозки необходимо составить уравнение теплового баланса. Из курса физики известно [24]:

$$Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол}}, \quad (1.1)$$

где $Q_{\text{отд}}$ – количество теплоты, отдаваемой системой, то есть тепловая мощность системы;

$Q_{\text{пол}}$ – количество теплоты, получаемое вагоном со смерзшимся грузом, которое расходуется на подогрев цинкового концентрата.

Теплопередача – это процесс передачи тепла от одной среды к другой, через разделяющую стенку [25]. Закон Ньютона-Рихмана в выражении (1.2), который описывает процесс теплообмена, утверждает, что плотность теплового потока на границе тел пропорциональна их разности температур [25]:

$$q = \alpha \cdot \Delta T, \quad (1.2)$$

где q – плотность теплового потока – разность характерных температур сред, между которыми происходит теплообмен, Вт/м² [26];

α – коэффициент пропорциональности [26].

Коэффициент пропорциональности – это плотность теплового потока при перепаде температур на 1 К, измеряется в Вт/(м² · К). Тепловой поток как вектор направлен перпендикулярно площадке поверхности, через которую он протекает. Коэффициент α это функция процесса теплоотдачи. Он зависит от [27–30]:

- вида теплоносителя и температуры;
- температуры напора, вида конвекции и режима течения;
- состояния поверхности и направления обтекания;
- геометрии тела, через которое проходит тепловой поток.

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		15

Функциональная запись имеет следующий вид:

$$\frac{d}{dx} \frac{\partial}{\partial S} Q = \alpha \cdot \Delta T. \quad (1.3)$$

Интегральная формулировка дифференциального уравнения (1.3) имеет вид [30–34]:

$$Q = \alpha \cdot \tau \cdot S \cdot \Delta T, \quad (1.4)$$

где Q – количество теплоты, отданное через площадку на границе тел, Вт · ч;

S – площадь, через которую проходит тепловой поток, м²;

τ – время прохождения теплового потока, ч;

ΔT – разность температур двух сред, °С.

Для системы, рассмотренной в работе, будет справедливо выражение:

$$Q_{\text{отд}} = \alpha \cdot \tau \cdot S \cdot \Delta T. \quad (1.5)$$

Коэффициент α , рассмотренный в формулах (1.2-1.5) расчетный, определяется экспериментально. Для его нахождения воспользуемся уравнением (1.6).

$$Q_{\text{в}} = Q, \quad (1.6)$$

где Q – количество теплоты, отданное через площадку на границе тел;

$Q_{\text{в}}$ – количество теплоты, расходуемой на нагрев приточного воздуха в воздухонагревателе.

Теплового поток, расходуемый на нагрев приточного воздуха, определим в выражении (1.7) [35–39].

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		16

$$Q_B = 0,278 \cdot V_B \cdot \rho_B \cdot c_B \cdot (t_{BK} - t_{BH}). \quad (1.7)$$

В выражении (1.7) приняты обозначения:

V_B – объемный расход воздуха, м³/ч;

ρ_B – плотность воздуха при температуре t_B , кг/м³;

c_B – удельная теплоемкость воздуха, при температуре t_B , кДж/(кг · К);

t_{BK} – конечная температура воздуха, °С;

t_{BH} – начальная температура воздуха, °С;

0,278 – коэффициент перевода из кДж/ч в Вт.

Исходя из уравнений (1.4, 1.6, 1.7) получим:

$$Q_B = Q,$$

$$0,278 \cdot V_B \cdot \rho_B \cdot c_B \cdot (t_{BK} - t_{BH}) = \alpha \cdot \tau \cdot S \cdot \Delta T. \quad (1.8)$$

Для теоретического расчета коэффициента α примем $\tau = 1$ ч. Получим выражение вида:

$$\alpha = \frac{0,278 \cdot V_B \cdot \rho_B \cdot c_B \cdot (t_{BK} - t_{BH})}{S \cdot \Delta T}, \quad (1.9)$$

где S – площадь обогреваемой поверхности, м².

Проанализировав физические параметры смерзшегося груза из ТЗ, сформируем уравнение теплового баланса груза:

$$Q_{\text{пол}} = q_{\omega} + Q_B + Q_{\text{п}} + Q_{\text{гр}}, \quad (1.10)$$

где q_{ω} – теплота льдообразования, Вт;

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

$Q_{\text{в}}$ – количество теплоты, необходимое для разогрева воды, Вт;

$Q_{\text{п}}$ – теплота парообразования, Вт;

$Q_{\text{гр}}$ – количество теплоты, необходимое для разогрева груза;

Для испарения льда в грузе необходимо сначала передать ему количество теплоты, расходуемой на плавление льда, затем нагреть получившуюся воду до температуры кипения воды и испарить воду. График плавления льда представлен на рисунке 1.2 [40–41].

На рисунке 1.2:

- участок АВ – плавление льда;
- участок ВС – нагревание воды;
- участок С – испарение воды.

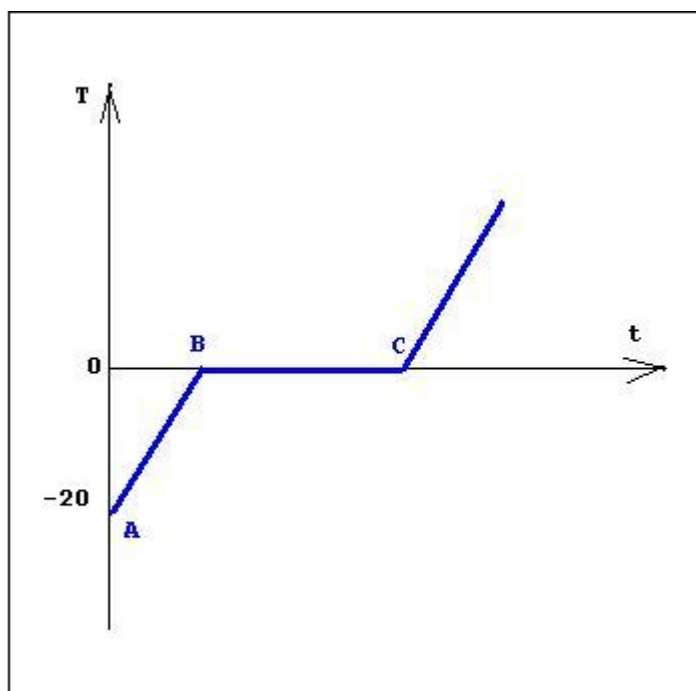


Рисунок 1.2 – График плавления льда

Теплота льдообразования рассчитывается по формуле [42]:

$$q_{\omega} = m_{\text{гр}} \cdot W \cdot r_{\text{л}}. \quad (1.11)$$

В выражении (1.11) приняты следующие обозначения:

$m_{гр}$ – масса груза, кг;

W – массовая доля воды в сырье;

r_l – удельная теплота льдообразования, Дж/кг.

Удельная теплота льдообразования при различных температурах приближенно вычисляют по формуле [43]:

$$r_l = r_l(0) + \lambda \cdot t_n, \quad (1.12)$$

где $r_l(0)$ – удельная теплота льдообразования при 0 °С, Дж/кг;

λ – удельная теплоемкость льда, Дж/(кг·К);

t_n – температура замороженного продукта, взятая по абсолютной величине, °К.

Количество теплоты, необходимое для нагрева воды рассчитывается по формуле [44]:

$$Q_B = c_{\text{воды}} \cdot m_B \cdot (t_{\text{к воды}} - t_{\text{н воды}}), \quad (1.13)$$

где $c_{\text{воды}}$ – теплоемкость воды, Дж/(кг·К);

m_B – масса воды, кг;

$t_{\text{к воды}}$ – температура испарения воды, °С;

$t_{\text{н воды}}$ – начальная температура воды, °С.

Теплота парообразования рассчитывается по формуле [45]:

$$Q_{\Pi} = m_B \cdot L_B, \quad (1.14)$$

где $m_{гр}$ – масса груза, кг;

L_B – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Количество теплоты, расходуемой на прогрев груза, рассчитывается по формуле (1.15).

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		19

$$Q_{\text{гр}} = c_{\text{гр}} \cdot m_{\text{гр}} \cdot (t_{\text{к гр}} - t_{\text{н гр}}), \quad (1.15)$$

где $c_{\text{гр}}$ – теплоемкость смерзшегося груза, Дж/(кг· К);

$m_{\text{гр}}$ – масса груза, кг;

$t_{\text{к гр}}$ – конечная температура груза, °С;

$t_{\text{н гр}}$ – начальная температура груза, °С.

Объединив выражения (1.1, 1.5, 1.10) получим уравнение теплового баланса, записанное в выражении (1.16).

$$q_{\omega} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{гр}} = \alpha \cdot \tau \cdot S \cdot \Delta T, \quad (1.16)$$

исходя из которого выразим τ :

$$\tau = \frac{q_{\omega} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{гр}}}{\alpha \cdot S \cdot \Delta T}. \quad (1.17)$$

Полученное время τ из выражения (1.17) характеризует эффективность выбранного метода. Чем меньше эта величина, тем быстрее производится разогрев смерзшегося груза и его последующая отгрузка.

Так как при исследовании методов отапливания смерзшегося груза был выбран конвективный метод, рассмотрим технологическую схему конвективного тепляка (рисунок 1.3) [46–50].

Система состоит из двух контуров: контур верхней и нижней циркуляции. Основной источник теплого воздуха – воздухонагреватель ВН. Принцип работы основан на [51]: на вход воздухонагревателя подается воздух, при помощи встроенного вентилятора В и газ СО, объемом которого управляет клапан регулирования газа – КЛГ. Продукты горения смешиваются с нагреваемым воздухом. Нагретый воздух подается напрямую на коллекторы верхней подачи теплоносителя при помощи вентилятора ВЗ.

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		20

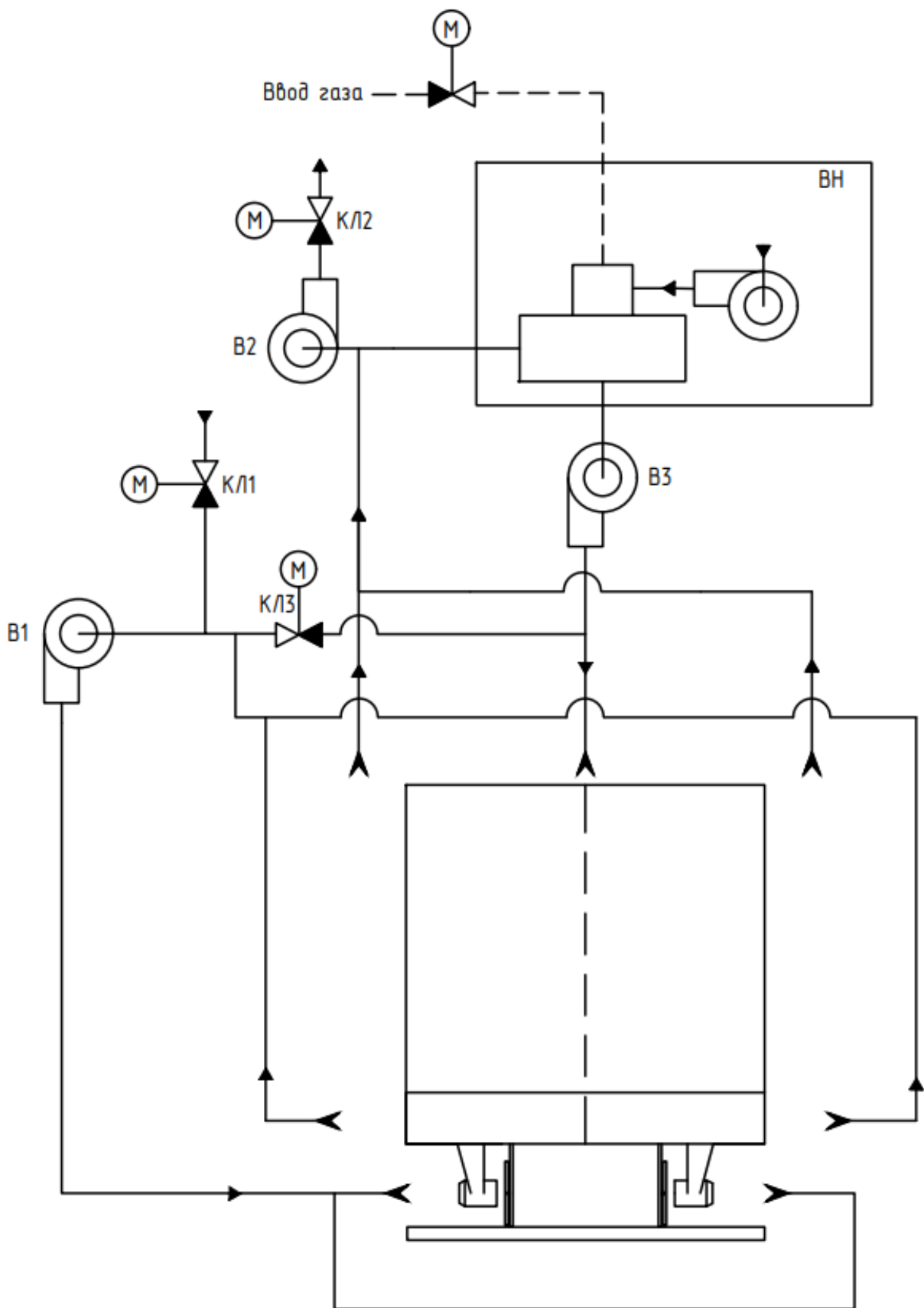


Рисунок 1.3 – Технологическая схема тепляка

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

270304.2020.391 ПЗ

Лист

21

Более наглядно принцип работы тепляка представлены в приложении А (рисунок 1.4).

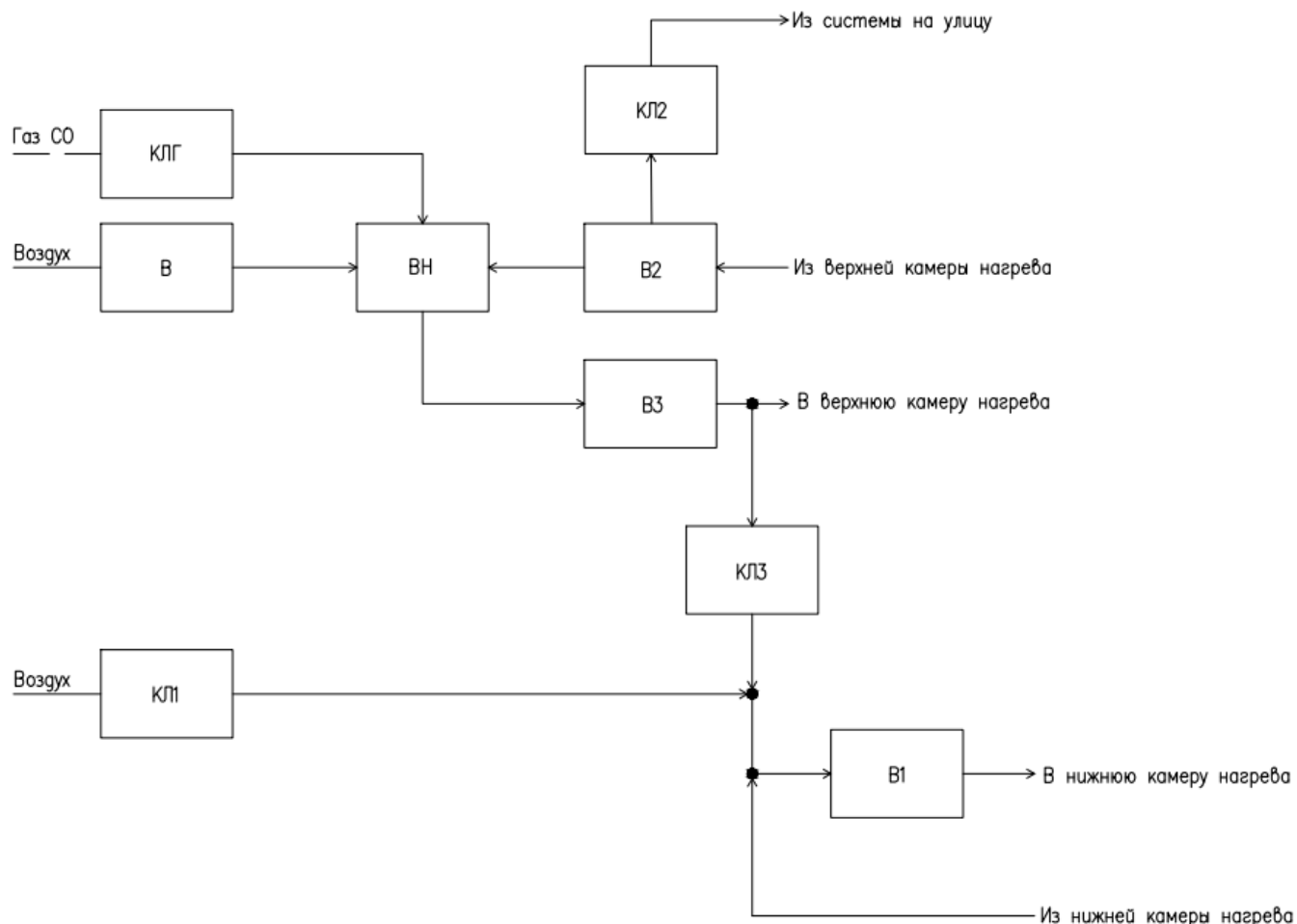


Рисунок 1.4 – Структурная схема тепляка

Вентилятор В1 забирает теплый воздух из нагревательной секции и подмешивает его с горячим воздухом от воздухонагревателя при помощи клапана КЛЗ и холодным воздухом при помощи клапана КЛ1.

Вентилятор В2 отвечает за выброс отработанных газов и теплоносителя, объем отходов ресурсов регулируется клапаном КЛ2. Вентилятор В2 также работает в режиме циркуляции: забирает воздух из боковых верхних коллекторов и подает его в воздухонагреватель.

Регулирование температуры воздухонагревателя основано на показаниях датчиков температуры в верхней камере нагрева. Максимальная рабочая

температура в камере 100 °С.

Температура теплоносителя на выходе из верхнего коллектора является управляющим параметром для воздухонагревателя. Регулирование температуры на нижней камере нагрева происходит на основе формирования управляющего сигнала на клапан КЛЗ.

Для моделирования системы управления воздухонагревателем необходимы физические параметры воздухонагревателя и исполнительного механизма регулирования клапана. Максимальный объемный расход газа, выраженный в долях для клапана регулирования газа, зависит от угла поворота задвижки самого клапана [52]. Зависимость объемного расхода от угла поворота представлена на рисунке 1.5 [53].

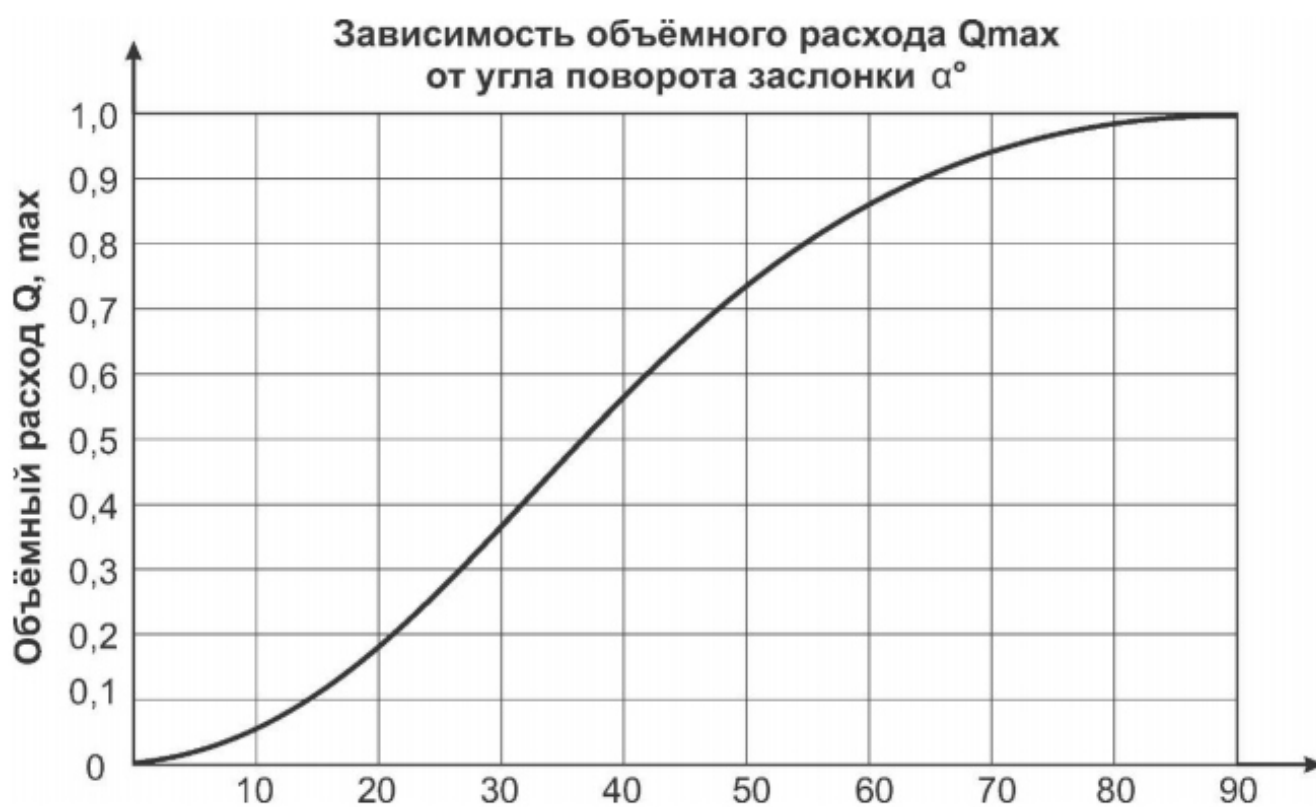


Рисунок 1.5 – Зависимость объемного расхода

Зависимость такого вида – гладкая монотонная возрастающая нелинейная функция, называемая сигмоидой [54].

Уравнение представлено в выражении (1.18) [54].

$$Q_{max} = \frac{1}{1 + e^{-\varphi}}, \quad (1.18)$$

где Q_{max} – объемный расход газа, м³/ч;

φ – угол поворота задвижки.

Теперь необходимо составить зависимость угла поворота от управляющего напряжения. Угол поворота задвижки изменяется от 0 до 90 градуса, а управляющее напряжение как правило аналоговый сигнал 0-10 В.

Зависимость угла поворота задвижки от напряжения представлена в формуле (1.19).

$$\varphi = k \cdot U, \quad (1.19)$$

где k – коэффициент преобразования, равный отношению максимального угла поворота к максимальному управляющему напряжению.

Физическая модель работы воздухонагревателя выражена из закона Дальтона для смеси газов и представлена в выражении (1.20) [55–56].

$$T_{возд} = \frac{T_{газа} \cdot G_{газа} + T_{возд} \cdot G_{возд}}{G_{возд} + G_{газа}}, \quad (1.20)$$

В выражении (1.20) приняты обозначения:

$T_{газа}$ – температура газа, используемого для нагревания воздуха, °С;

$T_{возд}$ – температура воздуха, °С;

$G_{газа}$ – объемный расход газа, м³/ч;

$G_{возд}$ – объемный расход воздуха, м³/ч.

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		24

1.4 Постановка цели и задач работы

Целью выпускной квалификационной работы является сокращение времени отгрузки оледенелого цинкового концентрата на основе автоматизации разморозки полувагонов в транспортном цехе.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проведение обзора и выбор метода размораживания полувагонов с сырьем;
- изучение технологического процесса разморозки сырья;
- выбор технических средств автоматизации и оборудования;
- расчет времени размораживания при выбранном методе размораживания сырья;
- моделирование системы управления;
- настройка регулятора с использованием инженерных методов.

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		25

2 ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЕ

В первой части выпускной квалификационной работы был проведен обзор нескольких методов размораживания сырья и выбран наиболее эффективный.

Важным этапом разработки автоматизированной системы является выбор технических средств автоматизации и оборудования. Моделирование системы управления основано на параметрах паспортных данных выбранных технических средств и оборудования.

2.1 Воздухонагреватель

Объектом управления в данной системе является воздухонагреватель (ВН). Основными параметрами для выбора ВН являются [57]:

- КПД воздухонагревателя;
- номинальная тепловая мощность;
- максимальная температура на выходе;
- потребляемый объем газа.

Основой проектируемой системы выберем воздухонагреватель смесительного типа (см. рисунок 2.1). Воздухонагреватели газовые смесительные (ВГС) предназначены для подогрева воздуха путем смешивания нагреваемой среды с продуктами сгорания. Широко применяются в системах приточной вентиляции. Используются в цехах машиностроения, на металлургических комбинатах, а также в тепляках.

Под кожухом ВГС размещена камера горения на основе блочных горелок, снаружи располагается газопровод с регулирующей и запорной арматурой. Выберем модель Тепловой Т-250С [58]. Паспортные данные выбранной модели представлены в таблице 2.1.

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		26

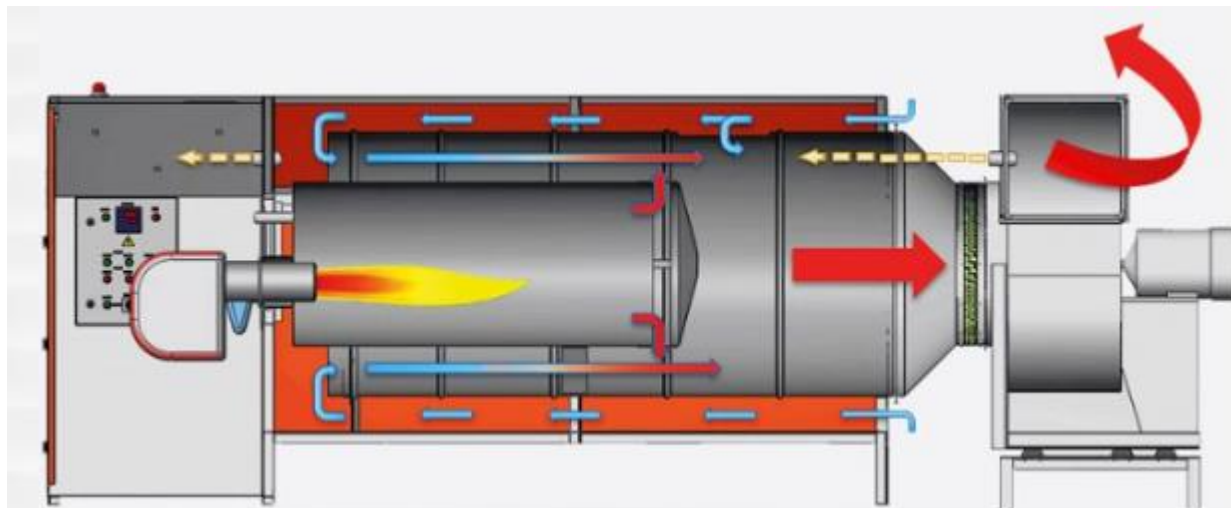


Рисунок 2.1 – Воздухонагреватель смешительного типа

Таблица 2.1 – Характеристики воздухонагревателя Т-250С

Тип воздухо нагревателя	Номинальная тепловая мощность, кВт	Напряжение питания, В	КПД, %	Макс. температура, °С	Макс. расход газа, м ³ /ч
Т-250С	250	380	98,5	180	27,3

Технические особенности:

- применение автоматических блочных горелок;
- датчик потока воздуха;
- центробежный вентилятор, осуществляющий выход воздуха слева, справа, вверх относительно воздухонагревателя;
- подмес теплого воздуха в камеру горения во время работы ВН;
- продукты горения смешиваются с нагреваемым воздухом;
- встроенный блок автоматики.

Реализация системы на основе воздухонагревателя смешительного типа позволит уменьшить расход природного газа, за счет подмеса теплого воздуха в камеру горения. Такой воздухонагреватель позволит реализовать циркуляцию теплоносителя по воздуховодам системы тепляка.

2.2 Датчики температуры

Для снятия температурных значений различных точек системы необходимо установить термопреобразователи сопротивления (ТПС) [59]. Рабочий температурный диапазон термопреобразователей по ТЗ $-50...+120$ °С. Выберем модель ТСМв-1088-011 [60]. Диапазон рабочей температуры $-50...+120$ °С. Выходной сигнал выбранных ТПС – аналоговый 4...20 мА.

2.2.1 Температура в камере нагрева

Для измерения температуры в камере нагрева воспользуемся шестью термопреобразователями сопротивления. Необходимо измерять температуру в нескольких точках по всей длине вагона с двух сторон. С целью управления равномерным обогревом, ТПС устанавливаются на одинаковой высоте относительно земли.

2.2.2 Температура тормозных колодок

Согласно техническому заданию, температура тормозных колодок полувагона не должна превышать 55 °С. С целью регулирования температуры тормозных колодок требуется наличие ТПС, устанавливаемого на колодки.

2.2.3 Температура контуров верхней и нижней циркуляции

Термопреобразователи сопротивления, устанавливаемые в контурах верхней и нижней циркуляции предназначены для снятия температуры отработанного теплоносителя. По значению температуры ТПС, установленных на тормозных колодках полувагона, происходит формирование управляющего воздействия на открытие/закрытие клапана нижнего контура. На основе показаний ТПС контура верхней циркуляции контроллер формирует управляющее воздействие на

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		28

открытие/закрытие клапана подачи газа в воздухонагреватель.

Контуры циркуляции работают следующим образом. Продукты горения газа смешиваются с воздухом и отапливают полувагон. Отработанный теплоноситель забирается из камеры разогрева и подается назад в систему. Теплоноситель из верхней камеры нагрева подается в воздухонагреватель, как более горячий, а теплоноситель из нижней камеры нагрева в вентилятор нижнего контура. Преимуществом работы системы циркуляции является снижение расхода газа.

2.2.4 Температура наружного воздуха

Для измерения температуры наружного воздуха предусмотрен датчик температуры наружного воздуха с целью формирования сигнала на клапан воздухонагревателя. Начальная температура воздуха учитывается при смешивании газа и воздуха. Для измерения температуры воздуха, поступающего в воздухонагреватель, подойдет канальный датчик наружной температуры STN-3 NTC, паспортные данные которого представлены в таблице 2.2 [61].

Таблица 2.2 – Технические характеристики датчика температуры STN-3 NTC

Тип датчика	Измерительный элемент датчика	Диапазон рабочей температуры, °С
STN-3	NTC 10 кОм	-50...+90

2.3 Клапаны

Для управления циркуляцией воздуха предусмотрены клапаны КЛ1, КЛ2, КЛ3. Клапан КЛ1 используется для забора холодного воздуха в контур нижней циркуляции теплоносителя. Клапан КЛ2 предназначен для отвода отходных ресурсов. Клапан КЛ3 управляет подачей горячего воздуха в контур нижней циркуляции от воздухонагревателя. Клапаны управляются при помощи электропривода. В ходе работы был выбран электрический исполнительный механизм МЭОФ-6,3/12,5-0,25Р-98 [62].

Таблица 2.3 – Технические характеристики электрического исполнительного механизма МЭОФ-6,3/12,5-0,25Р-98

Тип механизма	Номинальный крутящий момент, Н·м	Номинальное время закрытия/открытия, с	Макс. потребляемая мощность, Вт	Тип электродвигателя
МЭОФ	6,3	12,5	50	ДСОР68-0,25-150

Электропитание осуществляется от однофазной сети переменного тока с номинальным напряжением питания 220, 230, 240 вольт 50 герц или 220 вольт 60 герц. Режим работы – повторно-кратковременный реверсивный с частыми пусками S4 с частотой включений 1200 в час [63]. Такой частоты включений достаточно для поддержания необходимой температуры в контурах. Реверсирование электродвигателя механизма требует не менее 50 миллисекунд на переключение, что является достаточно быстрым переключением электродвигателя. Данный параметр влияет на скорость открытия/закрытия клапана.

Управление механизмом реализовано на реверсивном пускателе ПБР-2М [64]. Пускатель имеет два положения «открыто» и «закрыто». Концевые выключатели S1 и S2 открывают и закрывают клапан соответственно. Диаграмма работы выключателей представлена на рисунке 2.2.

Микро-выключатель	Контакт соединителя X1	Положение арматуры		
		открытое	промежуточное	закрытое
S1	5, 6			
	7, 8			
S2	9, 10			
	11, 12			

Рисунок 2.2 – Диаграмма работы выключателей

2.4 Вентиляторы и воздуховоды

Воздуховоды необходимая часть системы, обеспечивающая перемещение потоков воздуха в камеру размораживания. Выполняются как правило из оцинкованной стали с низкой теплопроводностью с целью уменьшения теплопотерь. Для изоляции воздуховодов от внешней среды применяют обшивку. Теплоизоляция воздуховодов выполняет следующие функции [65]:

- предотвращение образования конденсата как на внутренней, так и на наружной поверхностях воздуховода;
- обеспечение огнестойкости во избежание пожароопасных ситуаций;
- снижение уровня шума и вибраций;
- уменьшение теплопередачи между потоками воздуха в воздуховоде и внешней средой.

Для системы, рассматриваемой в данной работе, выберем воздуховоды из оцинкованной стали [66].

Для перемещения теплоносителя по воздуховодам требуется подобрать вентиляторы. Основным вентилятором в системе является В1. Выберем радиальный вентилятор ВЦ 4-75 №6,3 низкого давления, одностороннего всасывания [67]. Такой вентилятор применяется в системах вентиляции и воздушного отопления.

Таблица 2.4 – Технические характеристики ВЦ 4-75 №6,3

Тип вентилятора	Производительность, м ³ /ч	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт	Тип электродвигателя
ВЦ 4-75	7,3 – 17,3	1440	7,5	АИР132S4

Вентилятор имеет аэродинамические характеристики, представленные на рисунке 2.3. Они состоят из трех основных пунктов:

- шкала, характеризующей полное или общее давление, которое образуется во время работы вентилятора, когда ему приходится преодолевать сопротивление,

образованное воздушными потоками;

– шкала мощности вентилятора, которая зависит от мощности двигателя самого вентилятора;

– кривая КПД вентилятора, характеризующая динамическую или статическую работоспособность вентилятора.

Производительность вентилятора определяет объемный расход воздуха в системе, необходимый параметр как для расчета времени размораживания, так и для моделирования системы управления.

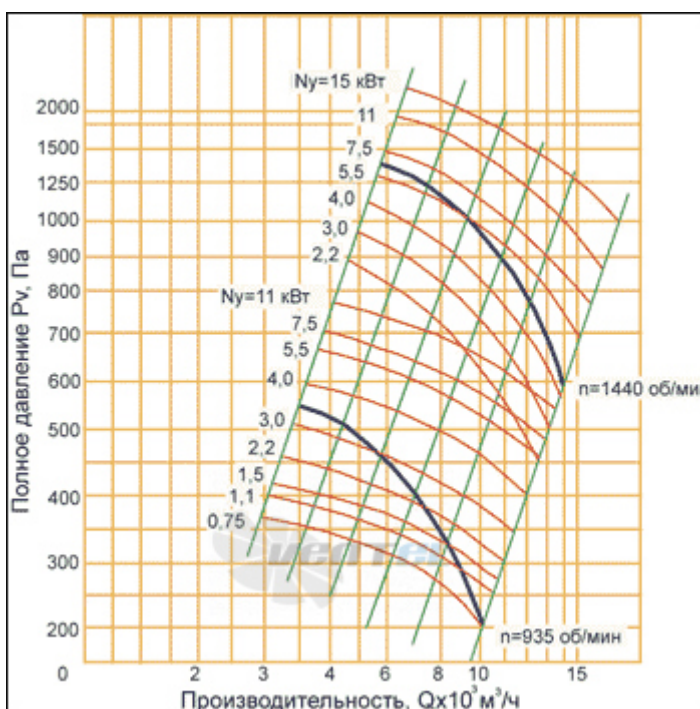


Рисунок 2.3 – Аэродинамические характеристики вентилятора ВЦ 4-75

Сопло на конечном участке воздуховодов предназначены для рассеивания теплоносителя в камере размораживания. Для равномерного распределения тепла предусматривается установка сопла на равноудаленном расстоянии друг от друга. Выполняются, как правило из той же стали, что и воздуховоды, что способствует уменьшению тепловых потерь.

2.5 Управляющее устройство

Для сбора и обработки сигналов со щитов, с датчиков в помещении тепляка и управления электроприводами клапанов внутри помещения используется программируемый логический контроллер Modicon M340 [68–69].

Промышленный контроллер Modicon M340 является наследником более старшего поколения контроллеров Schneider Electric – Premium и наиболее мощного контроллера в линейке – Quantum. Modicon M340 программируется посредством программного пакета Unity Pro, поддерживая все стандартные языки МЭК 61131-3 [70].

Промышленный контроллер имеет следующие технические характеристики по части ввода/вывода:

- дискретный ввод/вывод в модуле на 512 каналов;
- распределенный ввод/вывод с ограничениями в зависимости от типа среды передачи;
- на Ethernet Modbus/TCP посредством сетевого модуля (63 устройства с функцией сканирования ввода/вывода);
- на линию Modbus – 32 устройства.

Каналы специализированного применения внутри шасси:

- до 20 каналов (счетчик, управление движением, линия последовательной передачи данных);
- 2-канальные модули VMXENC0200RU (60 кГц) или 8-канальные модули VMXENC0800RU (10 кГц);
- 2-канальные (200 кГц) модули РТО (вывод последовательности импульсов) VMXMSP0200RU для сервоприводов;
- 2-канальный модуль VMXNOM0200RU или модуль VMXNO0200HRU с 1 последовательным каналом RTU;
- библиотека EFB для управления технологическим процессом.

Встроенные порты обмена данными:

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		33

– линия последовательной передачи данных (процесс или RTU): 1 в режиме ведущий/ведомый Modbus RTU/ASCII или в символьном режиме (неизолированные RS232/RS485; 0,3-38,4 кбит/с);

– 1 USB-порт программирования (для ПК) или порт подключения НМІ (человеко-машинный интерфейс);

Модули обмена данными:

– сеть Ethernet (максимальное количество – 2; тип модуля – сетевые модули BMXNOC0401RY или модуль BMXNOR0200HRU с 1 каналом Ethernet RTU);

– AS-интерфейс (максимальное количество – 2; тип модуля – ведущий модуль BMXEIA0100RU).

Объем внутренней памяти:

– RAM для внутреннего использования: 2048 Кбайт;

– программы, константы и символы: 1792 Кбайт;

– локализованные/нелокализованные данные: 128 Кбайт.

Объем карты памяти (на процессоре):

– резервные копии программы, констант и символов: стандартно 8 Мбайт;

– размещение и отображение пользовательских веб-страниц.

Источник питания шасси:

– модуль питания 24 В постоянного тока (изолированный), 24-48 В пост. Тока (изолированный) или 100-240 В пер. тока.

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		34

3 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ ВН

Во второй части системы были выбраны основные технические средства автоматизации и оборудование. Для составления структурной схемы системы требуются паспортные данные технических средств автоматизации и оборудования. Кроме того, некоторые данные из паспорта на прибор нужны для расчета времени размораживания.

Целью составления структурной схемы системы управления является представление каждого отдельного блока схемы в виде передаточной функции для реализации моделирования.

3.1 Расчет времени размораживания

Часть данных для расчета взята по табличным данным, остальная часть из технического задания.

Таблица 3.1 – Данные для расчета из ТЗ

Параметр	Значение
Масса груза $m_{гр}$, кг	65000
Массовая доля воды в грузе W	0,1
Расчетная средняя начальная температура груза $t_{н гр}$, °С	-20
Теплоемкость цинкового концентрата $c_{гр}$, Дж/(кг· К)	753
Температура размораживаемого материала после разогрева $t_{к гр}$, °С	5
Температура воздуха в камере нагрева $t_{вк}$, °С	100
Требуемое время размораживания τ , ч, не более	20
Максимальный расход газа $G_{газа max}$, м ³ /ч	1800
Перерегулирование σ , %, не более	50

Таблица 3.2 – Табличные данные по воздуху, льду для расчета

Параметр	Значение
Удельная теплота льдообразования при 0 °С, $r_{л}(0)$, Дж/кг	335000
Удельная теплоемкость льда λ , Дж/(кг· К)	0,1
Плотность воздуха при температуре $t_{в}$, $\rho_{в}$, кг/м ³	0,946
Удельная теплоемкость воздуха, при температуре $t_{в}$, $c_{в}$, кДж/(кг· К)	1,009
Удельная теплоемкость воды, при температуре $t_{к\text{ воды}}$, $c_{\text{воды}}$, Дж/(кг· К)	4220
Удельная теплота парообразования при 100 °С, $L_{в}(0)$, Дж/кг	2260000
Коэффициент преобразования энергии из Дж в Вт, Вт/Дж	0,000278

Аналитический метод расчета времени размораживания τ основан на выражении (1.15) из пункта 1.4. В пункте 1.4 было выяснено, что коэффициент α определяется аналитически, воспользовавшись выражением (1.9):

$$\alpha = \frac{0,278 \cdot V_{в} \cdot \rho_{в} \cdot c_{в} \cdot (t_{вк} - t_{вн})}{S \cdot \Delta T}$$

Однако для расчёта α данных из таблиц (3.1, 3.2) недостаточно. Необходимо определить объемный расход воздуха $V_{в}$ м³/ч и площадь, через которую проходит тепловой поток S м². Объемный расход воздуха для разрабатываемой системы равен производительности вентилятора из пункта 2.5. Определим его из аэродинамических характеристик, представленных на рисунке 2.2. При полном давлении $P_{в}=700$ Па, мощности вентилятора $N_{у}=5500$ Вт производительность вентилятора $V_{в}$ составит 15000 м³/ч. Площадь, через которую проходит тепловой поток нетрудно определить по выходному радиусу сопла, равному 0,5 м. Формула для расчета площади S :

$$S = \pi \cdot R^2,$$

$$S = 3,14 \cdot 0,5^2 = 0,785 \text{ м}^2.$$

Подставив все данные в выражение (1.9) получим:

$$\alpha = \frac{0,278 \cdot 15000 \cdot 0,946 \cdot 1,009 \cdot (100 + 10)}{0,785 \cdot (100 + 20)},$$

$$\alpha = 4647,9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Теплота льдообразования (Вт) рассчитывается по формуле (1.11, 1.12):

$$q_{\omega} = m_{\text{гр}} \cdot W \cdot (r_{\text{л}}(0) + \lambda \cdot t_{\text{н}}) \cdot 0,000278 \text{ Вт},$$

$$q_{\omega} = 65000 \cdot 0,1 \cdot (335000 + 2120 \cdot 293,15) \cdot 0,000278,$$

$$q_{\omega} = 1726974 \text{ Вт}.$$

Количество теплоты (Вт), необходимое для разогрева воды рассчитывается по формуле (1.13):

$$Q_{\text{в}} = c_{\text{воды}} \cdot m_{\text{в}} \cdot (t_{\text{к воды}} - t_{\text{н воды}}) \cdot 0,000278,$$

$$Q_{\text{в}} = 4220 \cdot 6500 \cdot (100 - 0) \cdot 0,000278,$$

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		37

$$Q_B = 761944 \text{ Вт.}$$

Теплота парообразования (Вт) рассчитывается по формуле (1.14):

$$Q_{\Pi} = m_B \cdot L_B \cdot 0,000278,$$

$$Q_{\Pi} = 6500 \cdot 2260000 \cdot 0,000278,$$

$$Q_{\Pi} = 4080555 \text{ Вт.}$$

Количество теплоты (Вт), расходуемой на прогрев груза, рассчитывается по формуле (1.15):

$$Q_{\text{гр}} = c_{\text{гр}} \cdot m_{\text{гр}} \cdot (t_{\text{к гр}} - t_{\text{н гр}}) \cdot 0,000278,$$

$$Q_{\text{гр}} = 753 \cdot 54500 \cdot (5 + 20) \cdot 0,000278,$$

$$Q_{\text{гр}} = 284989 \text{ Вт.}$$

Теперь можно рассчитать время размораживания груза τ из выражения (1.17):

$$\tau = \frac{q_{\omega} + Q_B + Q_{\Pi} + Q_{\text{гр}}}{\alpha \cdot S \cdot \Delta T},$$

$$\tau = \frac{1726974 + 761944 + 4080555 + 284989}{4647,9 \cdot 0,785 \cdot (100 + 20)},$$

$$\tau = 15,66 \text{ ч.}$$

Переведем в часы и минуты и получим время разогрева груза 15 часов и 40 минут, что удовлетворяет условиям ТЗ.

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		38

3.2 Структурная схема системы управления

Структурная схема системы управления представлена на рисунке 3.1 и в приложении Б.

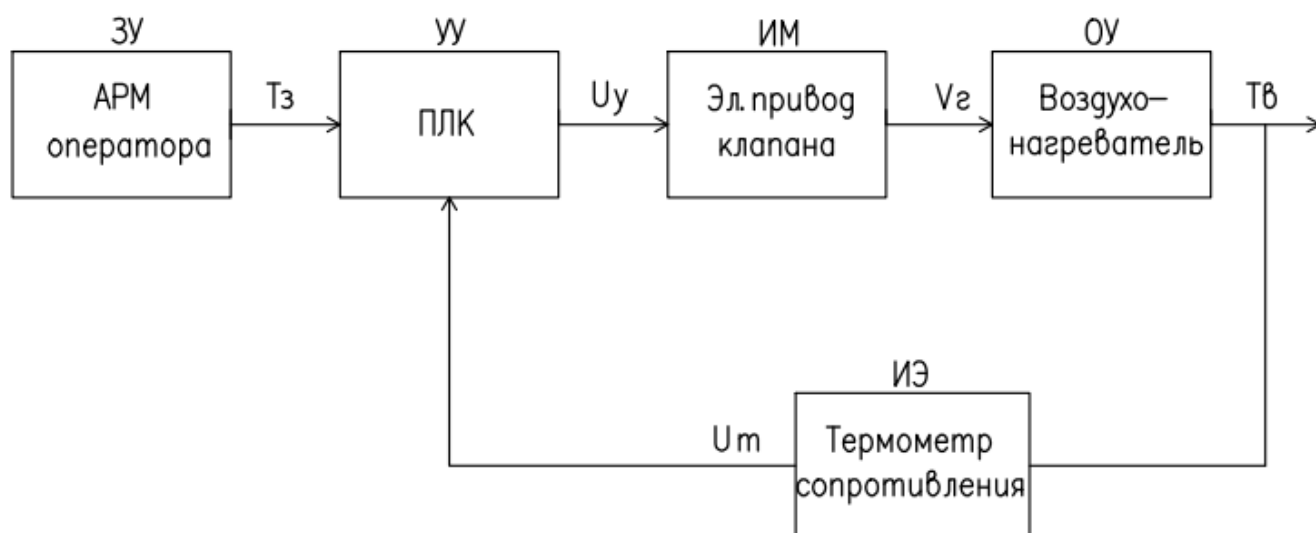


Рисунок 3.1 – Структурная схема системы управления

На рисунке 3.1 приняты обозначения:

ЗУ – задающее устройство;

УУ – управляющее устройство;

ИМ – исполнительный механизм;

ОУ – объект управления;

ИЭ – измерительный элемент.

Лицо, принимающее решение задает уставку температуры T_3 °С, которая является максимально допустимым значением температуры воздухонагревателя для данной системы. Управляющее устройство – программируемый логический контроллер (ПЛК), создает управляющее воздействие U_y В, на электропривод исполнительного механизма (ИМ) клапана. Исполнительный механизм изменяет величину объемного расхода газа, подаваемого по трубопроводу в объект управления (ОУ) – воздухонагреватель. Измерительный элемент (ИЭ) – термометр

сопротивления возвращает значение температуры воздуха T_B °С в ПЛК в виде сигнала U_m В.

3.3 Функциональная схема системы управления

Для построения структурной схемы системы управления необходимо дать некоторые пояснения. Сигнал с АРМ оператора подается единично-ступенчатый. Для данной системы этот сигнал представляет собой уставку температура воздухонагревателя (°С), которая равна максимальной температуре (°С) в камере нагрева.

Управляющее устройство реализовано в виде программируемого логического контроллера, которое необходимо для коррекции системы управления и обеспечения требуемых параметров согласно ТЗ. Типовым является ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор). Он включает в себя три составляющие: пропорциональную, интегральную и дифференциальную. Следовательно, данный регулятор имеет три настроечных параметра:

K_p – пропорциональная составляющая;

K_i – интегральная составляющая;

K_d – дифференциальная составляющая.

Пропорциональная составляющая служит для обеспечения требуемой точности системы, дифференциальная — для обеспечения необходимого качества переходного процесса, а интегральная, в свою очередь — для обеспечения нулевой статической ошибки обработки ступенчатого сигнала. Передаточная функция ПИД-регулятора представлена в выражении (3.1).

$$W_{yy}(s) = K_p + K_i \cdot \frac{1}{s} + K_d \cdot s. \quad (3.1)$$

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		40

Выходным сигналом ПЛК является напряжение $U_y = 0 - 10$ В. Для реализации необходима нелинейность в виде ограничения выходного сигнала контроллера. Исполнительный механизм – электрический исполнительный механизм управления задвижкой клапана, описан ранее в пункте 1.4. Зависимость объемного расхода газа от угла поворота задвижки клапана представлена графически на рисунке 1.3 и аналитически в выражении (1.18). Зависимость угла поворота от управляющего напряжения – линейная, представлена в выражении (1.19). Также механизм имеет задержку открытия/закрытия клапана t (см. пункт 2.3). Исходя из выражений (1.18-1.19) подставим вместо угла поворота управляющее напряжение и получим выражение (3.2):

$$\frac{Q_{max}}{U_y} = \frac{1}{1 + e^{-k \cdot U}}. \quad (3.2)$$

Передаточная функция исполнительного механизма представлена в выражении (3.3).

$$W_{им}(s) = \frac{G_{газа\ max}}{1 + e^{-k \cdot U}} \cdot e^{-t \cdot s}. \quad (3.3)$$

Объектом управления в системе является воздухонагреватель, физическая модель которого описана в пункте 1.4 в выражении (1.20). Так как существует задержка движения теплоносителя по трубопроводу, необходимо добавить к объекту управления элемент переменной задержки. Данный блок реализуется путем подачи на вход линейно нарастающего сигнала, который изменяет скорость поступления теплоносителя в коллекторы.

Передаточная функция представлена в выражении (3.4).

Функциональная схема системы управления представлена на рисунке 3.2 и в приложении В.

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		41

$$W_{Oy}(s) = \frac{T_{\text{возд}}(k)}{G_{\text{газа}}} = \frac{T_{\text{газа}} + \frac{T_{\text{возд}}(k+1) \cdot G_{\text{возд}}}{G_{\text{газа}}}}{G_{\text{возд}} + G_{\text{газа}}} \cdot e^{-t \cdot s}. \quad (3.4)$$

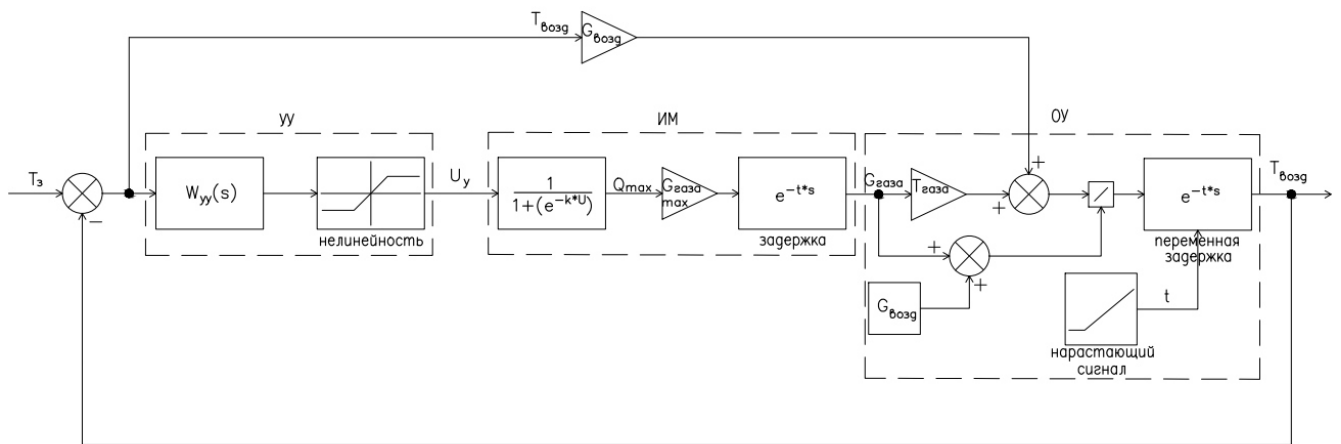


Рисунок 3.2 – Функциональная схема системы управления

На рисунке 3.2 приняты обозначения:

$W_{yy}(s)$ – передаточная функция ПИД-регулятора;

блок «нелинейность» – ограничение выходного сигнала контроллера;

блок «задержка» – задержка открытия/закрытия клапана;

$G_{\text{газа}}$ – максимальный объемный расход газа;

блок «нарастающий сигнал» – линейно-нарастающий сигнал изменения скорости поступления теплоносителя по воздухопроводу в коллекторы;

блок «переменная задержка» – задержка подачи теплоносителя в коллекторы.

Блоки задержки представлены в виде звена чистого запаздывания. Работает это следующим образом: при подаче единичного ступенчатого сигнала на данный блок выходной сигнал, численно равный входному сигналу появится через время t .

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В третьей части ВКР была построена структурная схема системы управления. Для этого были записаны передаточные функции каждого блока схемы.

Целью заключительной главы является выбор метода настройка регулятора, оценка переходных характеристик настроечного контура.

Результат проведения моделирования системы управления воздухонагревателем – наглядное представление работы выбранных технических средств автоматизации и оборудования.

4.1 Программное обеспечение

Существует множество программных сред реализации математических моделей посредством моделирования. Одной из них является среда графического программирования на основе прикладного пакета MATLAB – Simulink [71].

Simulink это основной инструмент для модельно-ориентированного проектирования в инженерно-прикладном пакете Matlab.

Инженеры и ученые используют Simulink для представления многодоменного моделирования и симуляции, так как в этой среде есть возможность повторного использования моделей как отдельных независимых частей, так и всей системы в целом. У Simulink присутствуют следующие основные возможности:

- моделирование системы по частям с использованием специальных инструментов и готовых блоков;
- разработка крупномасштабных моделей через компонентное представление с многократными системными компонентами и библиотеками;
- комбинирование моделей в одну систему даже если они были построены в другой среде;

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		43

– выполнение массовых симуляций в параллельном режиме на многоядерных ПК, компьютерных кластерах или облачных сервисах.

Также стоит отметить возможность анализа и оценивания ключевых параметров производительности, таких как перерегулирование, время регулирования и запасы устойчивости. Эти данные определяются при построении программой графиков частотных характеристик, переходных характеристик, а также корневого годографа. Для моделирования были применены библиотечные блоки Simulink.

Входным сигналом системы является единично-ступенчатый сигнал. В библиотеке блоков Simulink он называется Step и имеет следующие параметры (рисунок 4.1):

step time – время наступления перепада сигнала;

initial value – начальное значение ступеньки;

final value – конечное значение ступеньки;

sample time – шаг моделирования.

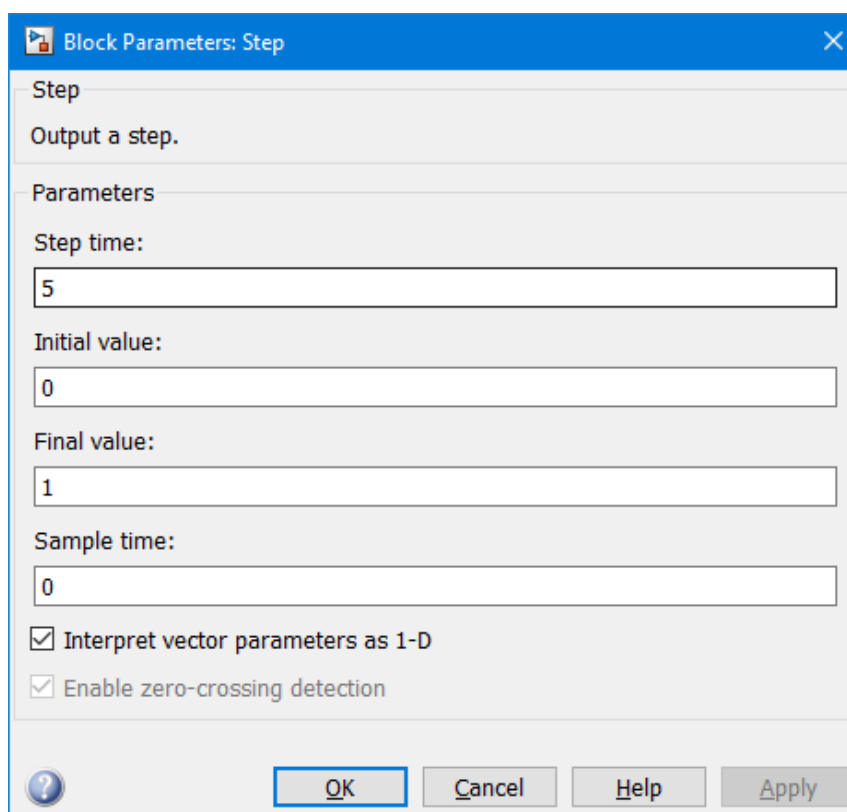


Рисунок 4.1 – Параметры блока Step

Управляющее устройство представлено в виде блока PID регулятора и нелинейности Saturation. Параметры блока ПИД регулятора представлены на рисунке 4.2.

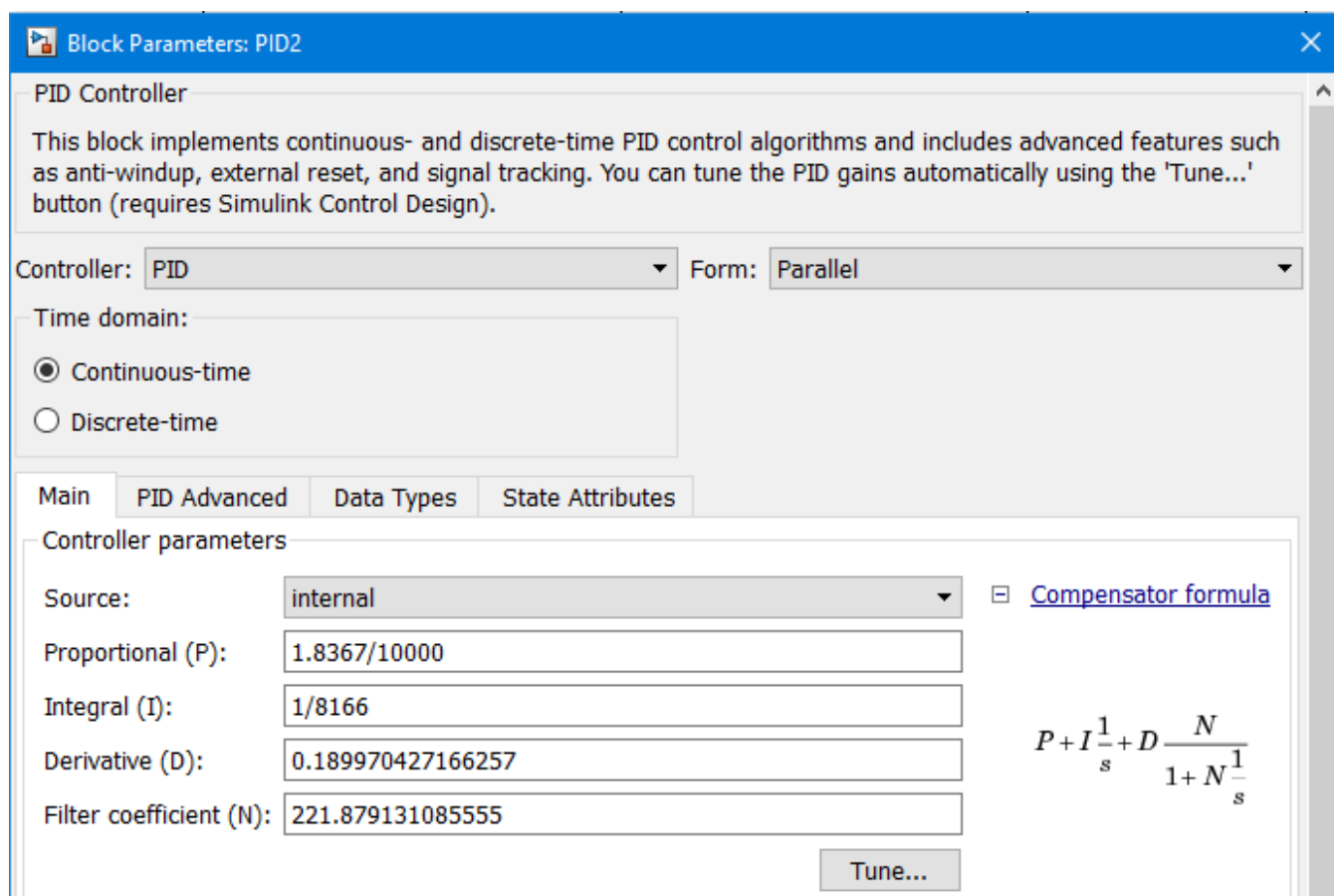


Рисунок 4.2 – Параметры блока PID

Здесь можно выбрать тип регулятора: P, I, PI, PD, PID. Каждый параметр соответствует названию: P – пропорциональный коэффициент; I – интегральный коэффициент; D – дифференциальный коэффициент. Справа от окна ввода параметров представлена формула компенсирования, в которой присутствует коэффициент фильтрации N. Он используется для фильтрации скачков от дифференциальной составляющей.

Блок Saturation является нелинейностью в виде ограничения выходного значения контроллера 0-10 В. Параметры блока представлены на рисунке 4.3.

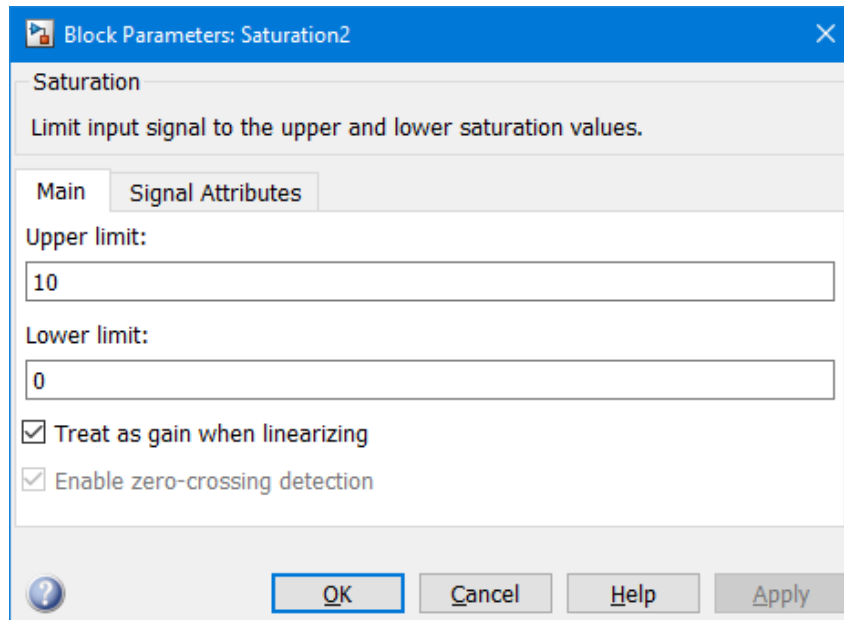


Рисунок 4.3 – Параметры блока Saturation

На рисунке 4.3:

upper limit – верхний уровень ограничения сигнала;

lower limit – нижний уровень ограничения сигнала.

Подсистема исполнительного механизма состоит из блоков: сигмоида, задержка. Блок сигмоиды имеет параметры, представленные на рисунке 4.4.

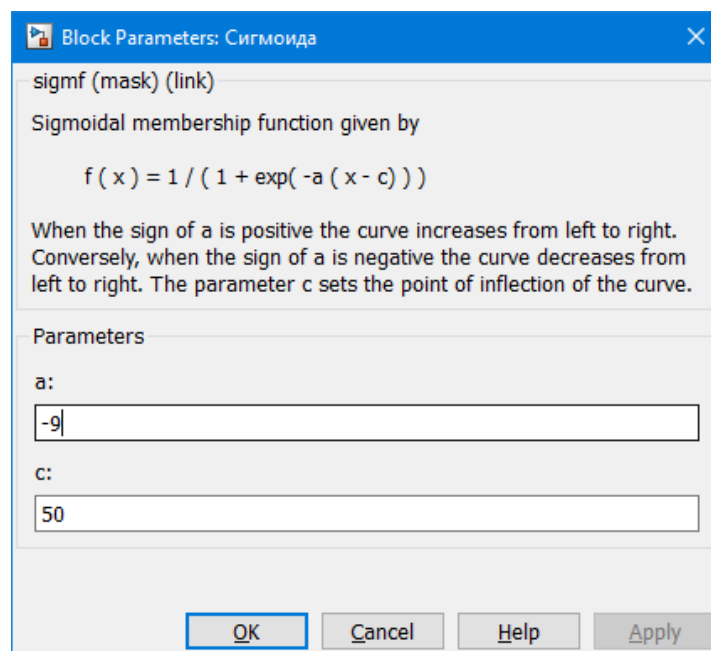


Рисунок 4.4 – Параметры блока сигмоида

На рисунке 4.4 параметр:

a – коэффициент преобразования;

c – коэффициент сдвига по оси времени.

Блок задержки в Simulink реализован на основе звена чистого запаздывания и имеет параметры, представленные на рисунке 4.5.

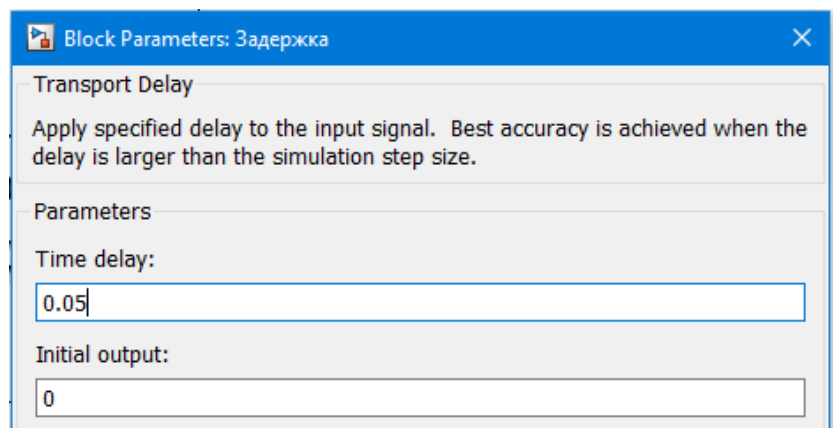


Рисунок 4.5 – Параметры блока задержка

На рисунке 4.5 параметр:

time delay – время запаздывания;

initial output – выходное значение.

Линейно-нарастающий сигнал в Simulink называется Ramp. Его параметры представлены на рисунке 4.6.

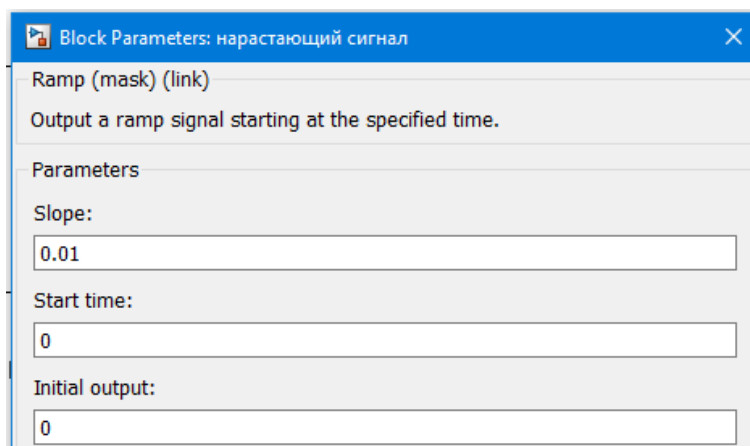


Рисунок 4.6 – Параметры блока Ramp

На рисунке 4.6 параметры:

slope – коэффициент нарастания сигнала;

start time – начальное время нарастания;

initial output – выходное значение.

Блок переменной задержки основан также на звене чистого запаздывания, отличие от обычной задержки в том, что уставка времени запаздывания может быть переменной.

4.2 Составление схемы моделирования

Структурная схема, на основе которой производилось моделирование аналогична структурной схеме из пункта 3.3 (рисунок 3.2). Структурная схема моделирования системы до введения регулятора представлена на рисунке 4.7.

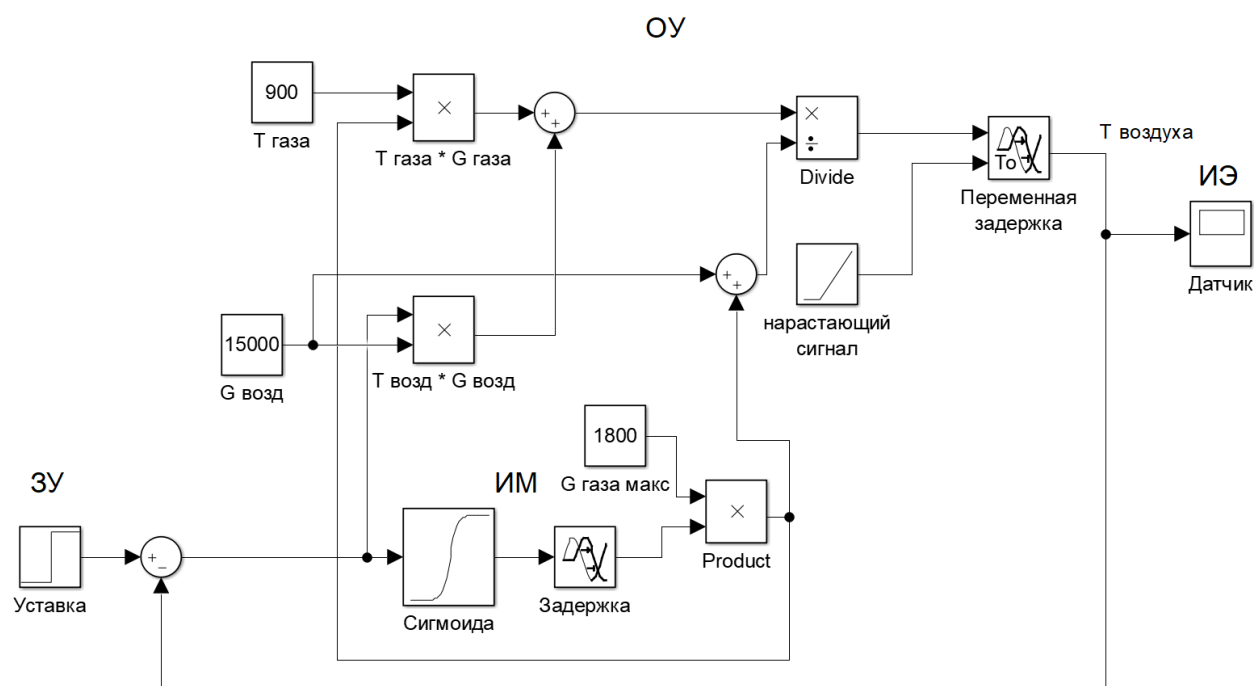


Рисунок 4.7 – Структурная схема моделирования до введения регулятора

Моделирование системы управления было произведено с учетом следующих замечаний:

$T_{\text{газа}}$ – температура горения газа CO – $900\text{ }^{\circ}\text{C}$;

$G_{\text{возд}}$ – объемный расход воздуха – $15000\text{ м}^3/\text{ч}$;

$G_{\text{газа макс}}$ – максимальный объемный расход газа по ТЗ – $1800\text{ м}^3/\text{ч}$;

уставка – максимальная температура воздуха для системы по ТЗ – $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для подсистемы исполнительного механизма (ИМ) параметры блока Сигмоида представлены на рисунке 4.8. Функция аналогична выражениям (1.18-1.19), но с поправкой на смещение по оси времени с помощью коэффициента c на 50. Это позволило получить сглаженную функцию изменения максимального расхода от напряжения управляющего сигнала. Блок задержка имеет параметр задержки, равным $0,05\text{ с}$, указанный в пункте 2.3.

Блок нарастающий сигнал представляет собой линейно-нарастающий сигнал в виде скорости поступления теплоносителя в клапаны в камере нагрева. Сигнал этого блока является вторым входным сигналом блока переменная задержка, который формирует задержку транспортного уровня воздухонагревателя. Первым входным сигналом является сигнал объекта управления – температуры теплоносителя.

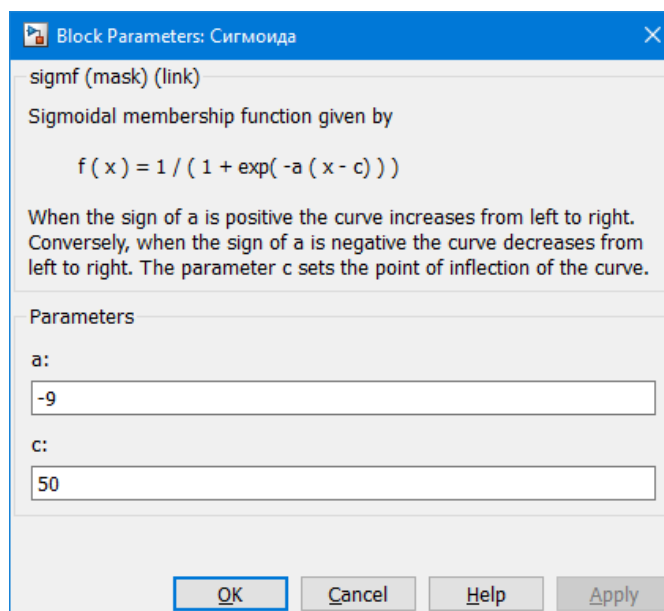


Рисунок 4.8 – Выбранные параметры блока сигмоида

Также необходимо выбрать метод моделирования и шаг дискретизации. Для

системы, рассматриваемой системы выбранный метод – метод Эйлера первого порядка. Шаг дискретизации фиксированный, составляет 0,001 (см. рисунок 4.9).

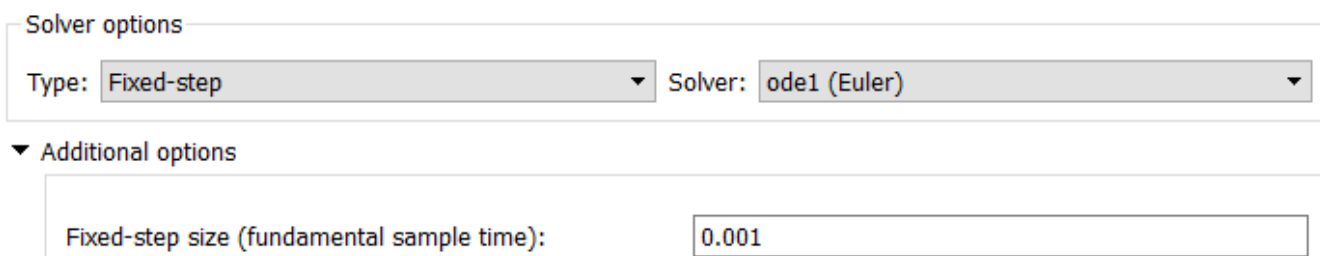


Рисунок 4.9 – Выбор метода моделирования и шага дискретизации

Структурная схема, с регулятором представлена на рисунке 4.10.

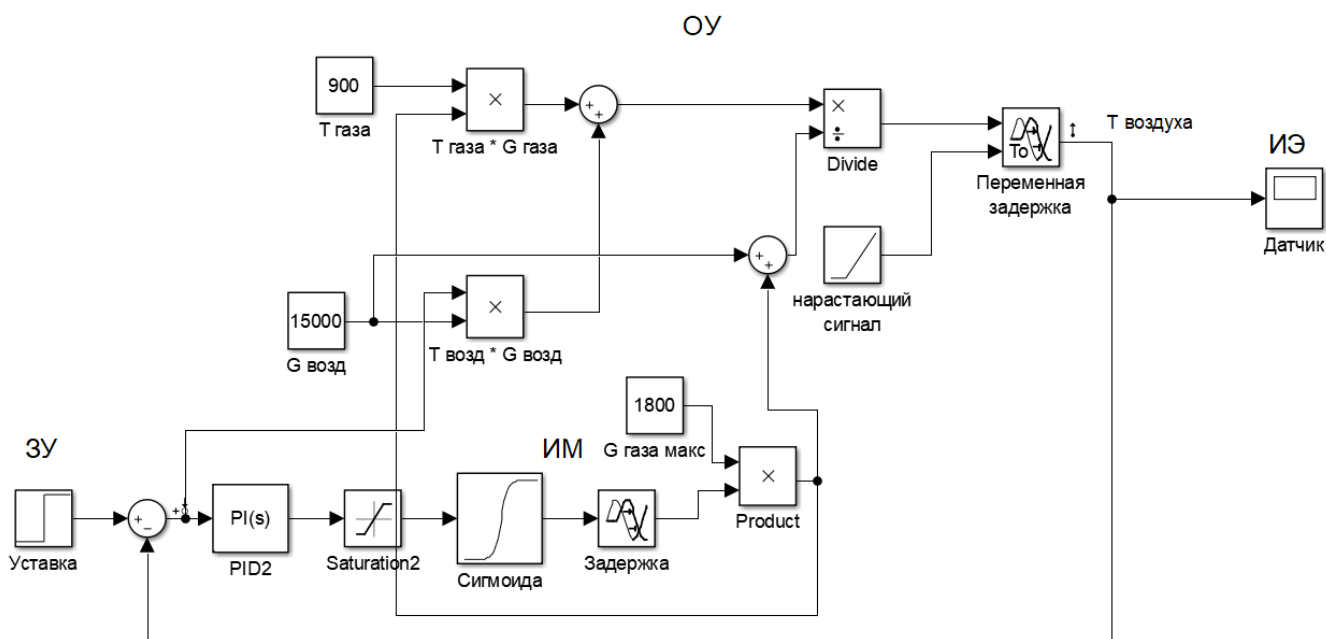


Рисунок 4.10 – Структурная схема моделирования с регулятором

4.3 Результаты моделирования системы

Выходным сигналом системы управления является температура воздуха. Переходная характеристика системы представлена на рисунке 4.11. Из переходной характеристики видно, что система управления колебательная, сигнал не достигает

заданного значения, следовательно необходимо вводить ПИ-регулятор.

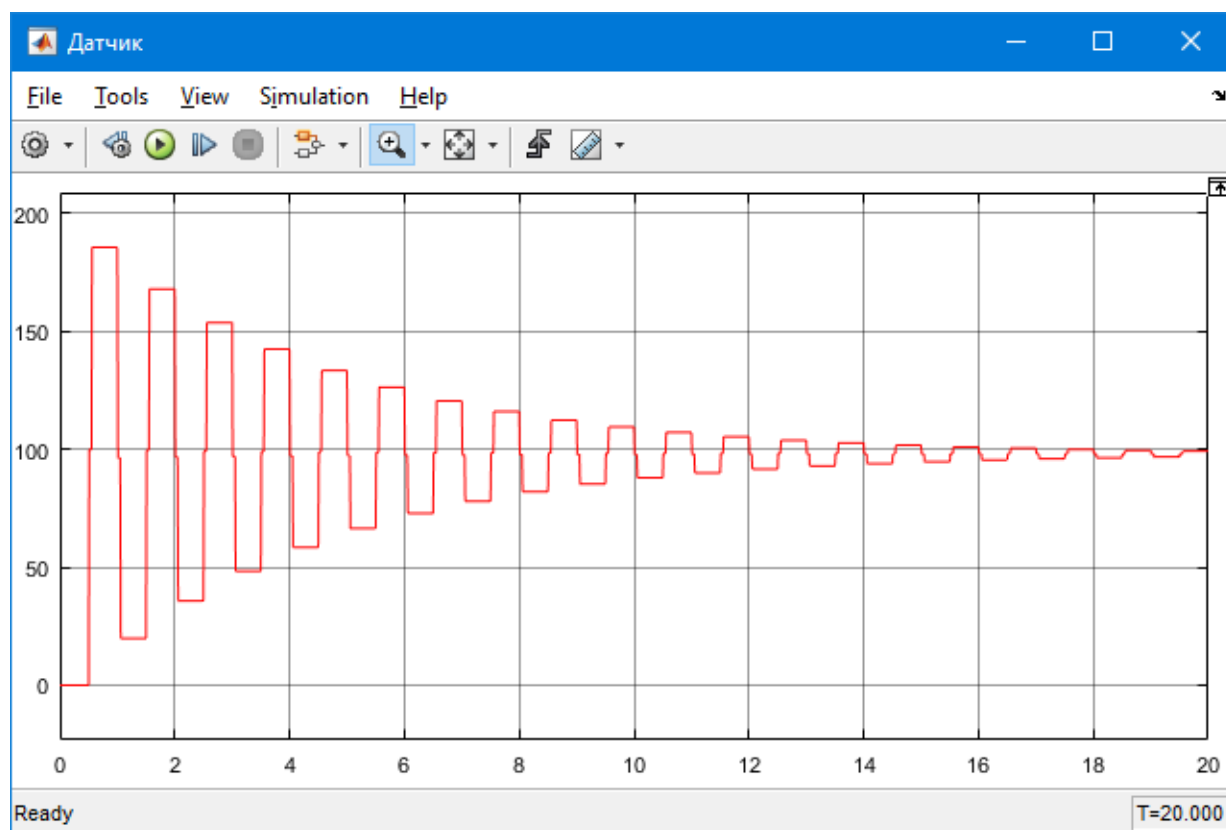


Рисунок 4.11 – Переходная характеристика системы до введения регулятора

Выбор ПИ-регулятора обоснован. Коэффициент P регулятора позволит уменьшить время установления сигнала, но уменьшение времени установления сигнала приводит к перерегулированию. Коэффициент I регулятора позволит обрабатывать входной сигнал точно, то есть интегратор накапливает ошибку и гасит ее. Однако время установления сигнала увеличится. Таким образом изменяя коэффициенты P и I , можно добиться стабильной работы системы. Касательно коэффициента D можно лишь сказать, что он внесет значительные колебания в переходный процесс, что не улучшит положение. К тому же, поиск D коэффициента является задачей пространственной, в то время как нахождение коэффициентов ПИ-регулятора является задачей на плоскости.

Существует множественное количество способов и методов настройки регулятора. Они позволяют подобрать наилучшие коэффициенты регулятора.

Инженерная настройка регулятора основывается на частных и частотных методах.

Одним из традиционных методов настройки регулятора является метод, основанный на нахождении параметров по номограммам [72]. Данный метод считается точным в теории автоматического регулирования. Существуют номограммы для определения настроек ПИ- и ПИД-регуляторов для объектов первого и второго порядка с запаздыванием. Достоинство данного метода – точность определения настроек регулятора, в связи с учетом нелинейной зависимости между параметрами настройки регулятора и величиной отношения величины запаздывания к постоянной времени объекта.

Номограммы для определения оптимальных параметров ПИ-регулятора представлены на рисунке 4.12. Суть метода состоит в нахождении:

$\tau_{об}$ – время, при котором сигнал достигает 5% от установившегося значения;

$T_{об}$ – одна третья от времени чистого запаздывания объекта;

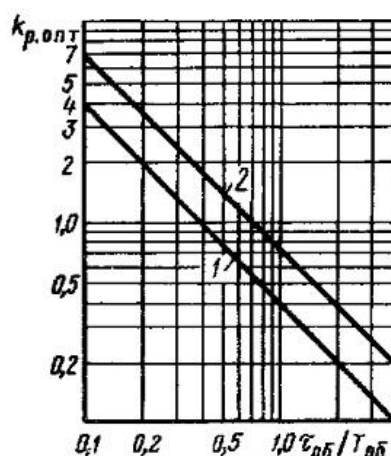


Рис. 7.27. Номограмма для определения оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора астатических объектов:
1 – $\psi = 1,0 \div 0,95$; 2 – $\psi = 0,95 \div 0,85$

Рисунок 4.12 – Номограмма для определения ПИ-регулятора

Для рисунка 4.13 справедливо:

$$\tau_{об} = 0,5 \text{ с,}$$

$$T_{об} = 0,17 \text{ с.}$$

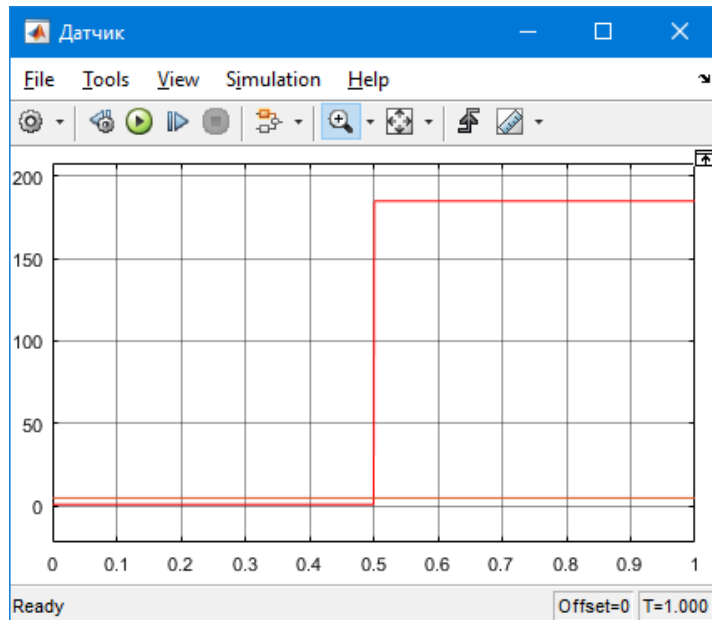


Рисунок 4.13 – Определение параметров П регулятора

Тогда коэффициент П по номограмме (см. рисунок 4.12):

$$k_p = 1, \text{ при } \frac{\tau_{об}}{T_{об}} = 0,34.$$

Коэффициент И регулятора определяется по номограммам, представленным на рисунке 4.14.

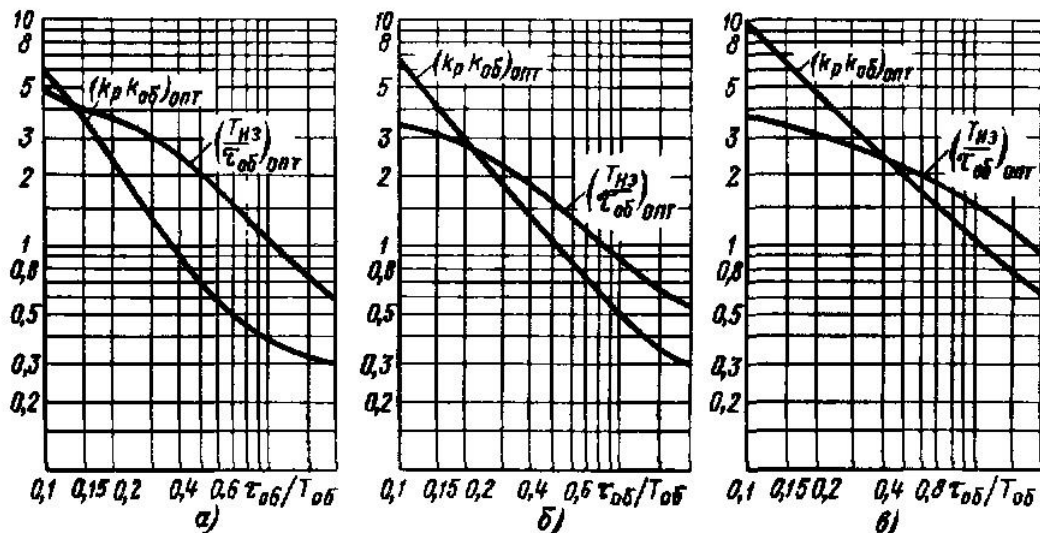


Рис. 7.25. Номограммы для определения оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора статических объектов:

а – $\psi = 1,0 \div 0,95$; б – $\psi = 0,95 \div 0,85$; в – $\psi = 0,85 \div 0,75$

Рисунок 4.14 – Номограммы для определения оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора

Пояснения к рисунку 4.14:

$$\tau_{об} = 0,5 \text{ с,}$$

$$T_{об} = 0,17 \text{ с;}$$

$k_p = 1$, оптимальный параметр П-регулятора;

$k_{об} = 1$, передаточный коэффициент объекта.

Тогда, при $\frac{\tau_{об}}{T_{об}} = 0,34$:

$$\tau_{из} = \tau_{об} \cdot 2,75. \quad (4.1)$$

В выражении (4.1) $\tau_{из}$ – время изодрома, то есть обратная величина коэффициенту И регулятора, тогда:

$$k_{и} = \frac{k_p}{\tau_{из}} = \frac{1}{2,75 \cdot 0,17} = 2,14. \quad (4.2)$$

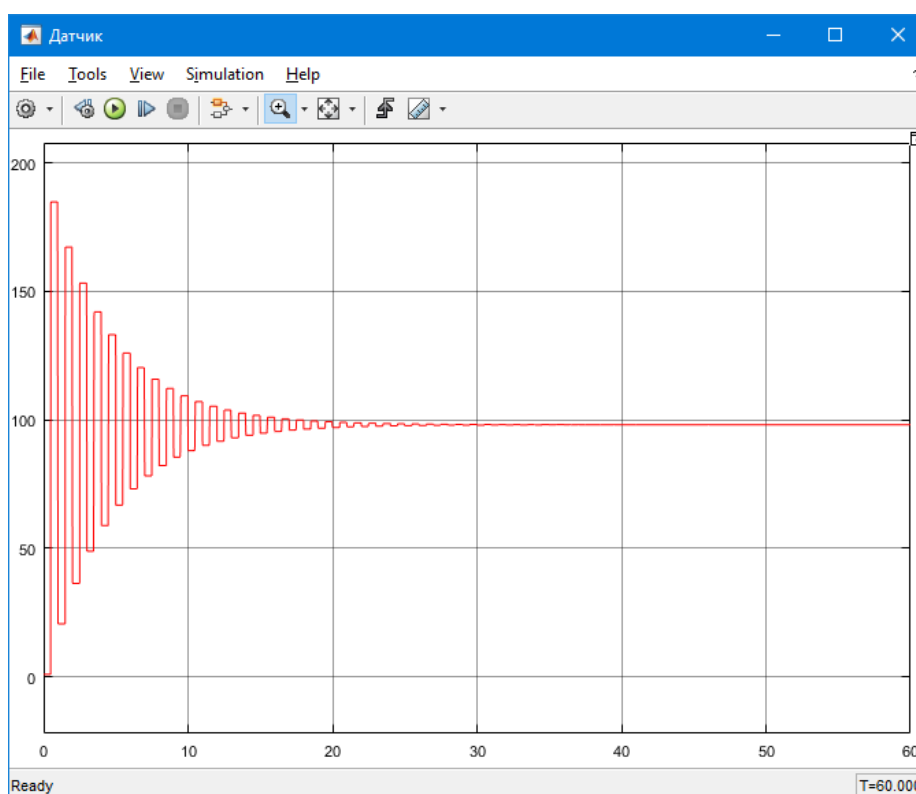


Рисунок 4.15 – Результат моделирования системы с учетом оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора по номограммам

Результаты моделирования системы с параметрами регулятора настроенному по номограммам приведены на рисунке 4.15.

В результате моделирования системы получилась колебательная система с долгим переходным процессом и большим перерегулированием.

Еще одна методика подбора коэффициентов регулятора основана на инженерном методе настройки регулятора Зиглера-Никольса [73]. Суть метода основана на построении касательной к приращению переходной характеристики (рисунок 4.16). Для нахождения коэффициентов регулятора необходимо определить параметры «а» и «L», где «а» это значение ординаты точки пересечения касательной с осью выходного параметра $y(t)$, а «L» это абсцисса точки пересечения касательной с осью времени t .

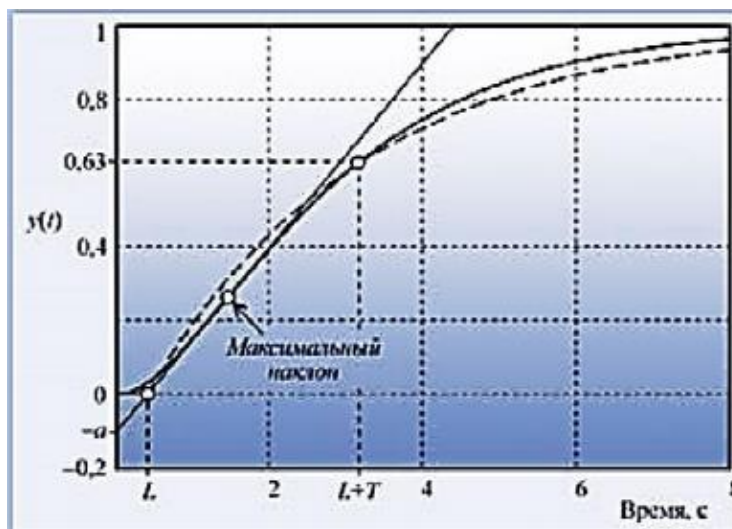


Рисунок 4.16 – Параметры для метода Зиглера-Никольса

Исходя из рисунка 4.17 видно, что нарастание переходной характеристики линейно, значит уравнение касательной можно определить по крайним точкам графика:

$$y = k \cdot x - a. \quad (4.3)$$

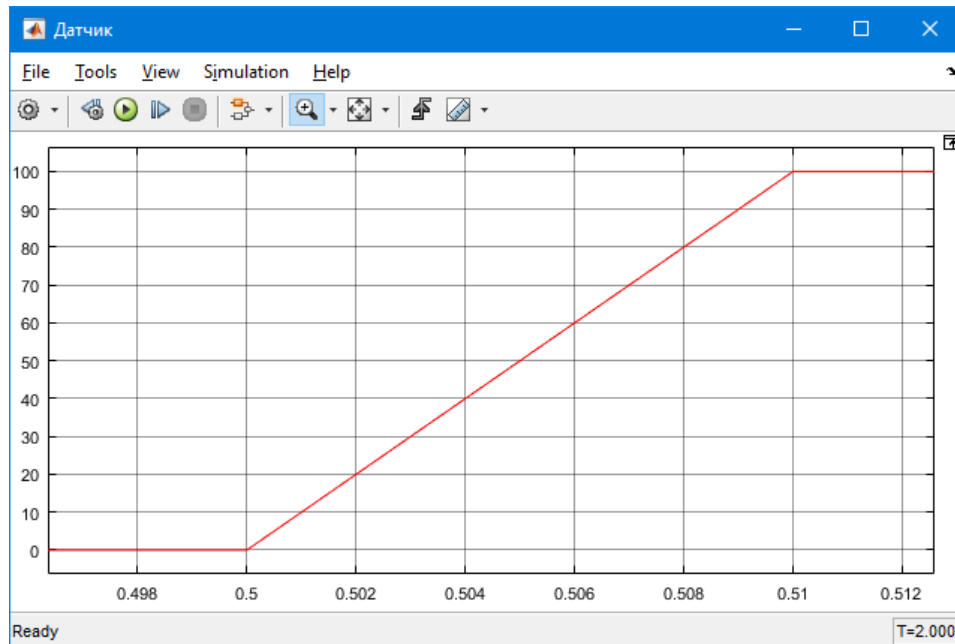


Рисунок 4.17 – График нарастания переходной характеристики

В формуле 4.3 приняты обозначения:

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \quad (4.4)$$

$$a = y_2 - k \cdot x_2.$$

Подставив значения из графика 4.17, получаем:

$$k = \frac{100 - 0}{0,51 - 0,5} = 10000, \quad (4.5)$$

$$a = 10000 \cdot 0,51 - 100 = 5000.$$

Коэффициент «L» легко определяем из графика 4.17. Он равен 0,5.

Формулы для расчета параметров ПИ-регулятора по методу Зиглера-Никольса представлены в выражении 4.6.

$$K_{\Pi} = \frac{1}{a} = 0,0002, \quad (4.6)$$

$$K_{И} = \frac{K_{\Pi}}{3L} = 0,00013.$$

Применяя полученные настройки ПИИ-регулятора, получаем переходную характеристику (см. рисунок 4.18).

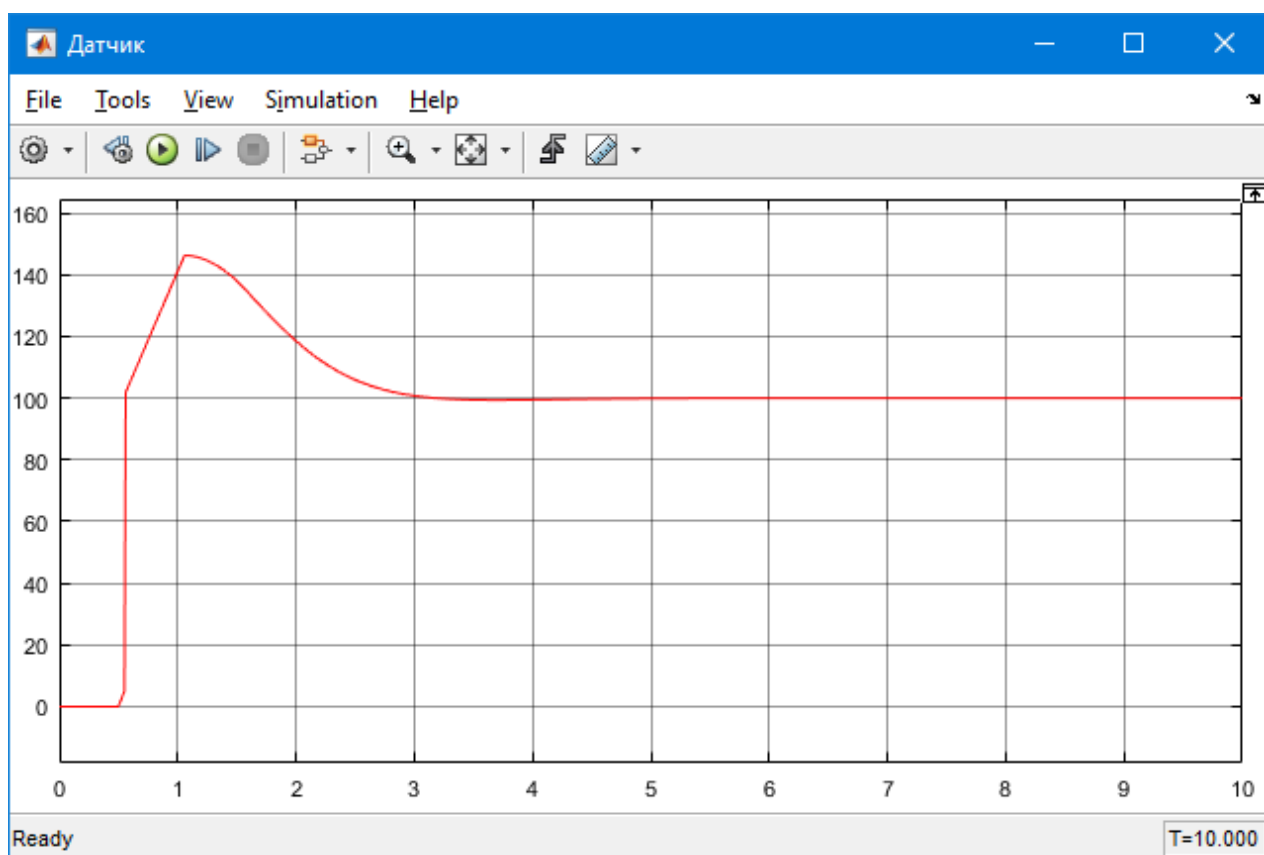


Рисунок 4.18 – Переходная характеристика настроенного регулятора

На рисунке 4.18 плавная переходная характеристика, время регулирования меньше 3 секунд, а перерегулирование меньше 50 %. По регламенту технического задания система удовлетворяет заданным техническим условиям, однако следует рассмотреть еще один метод.

Третий метод определения параметров регулятора – прикладной. В блоке регулятора PID есть функция autotune. С помощью данной функции программа

автоматически определяет параметры регулятора для системы. Графический интерфейс функции представлен на рисунке 4.19.

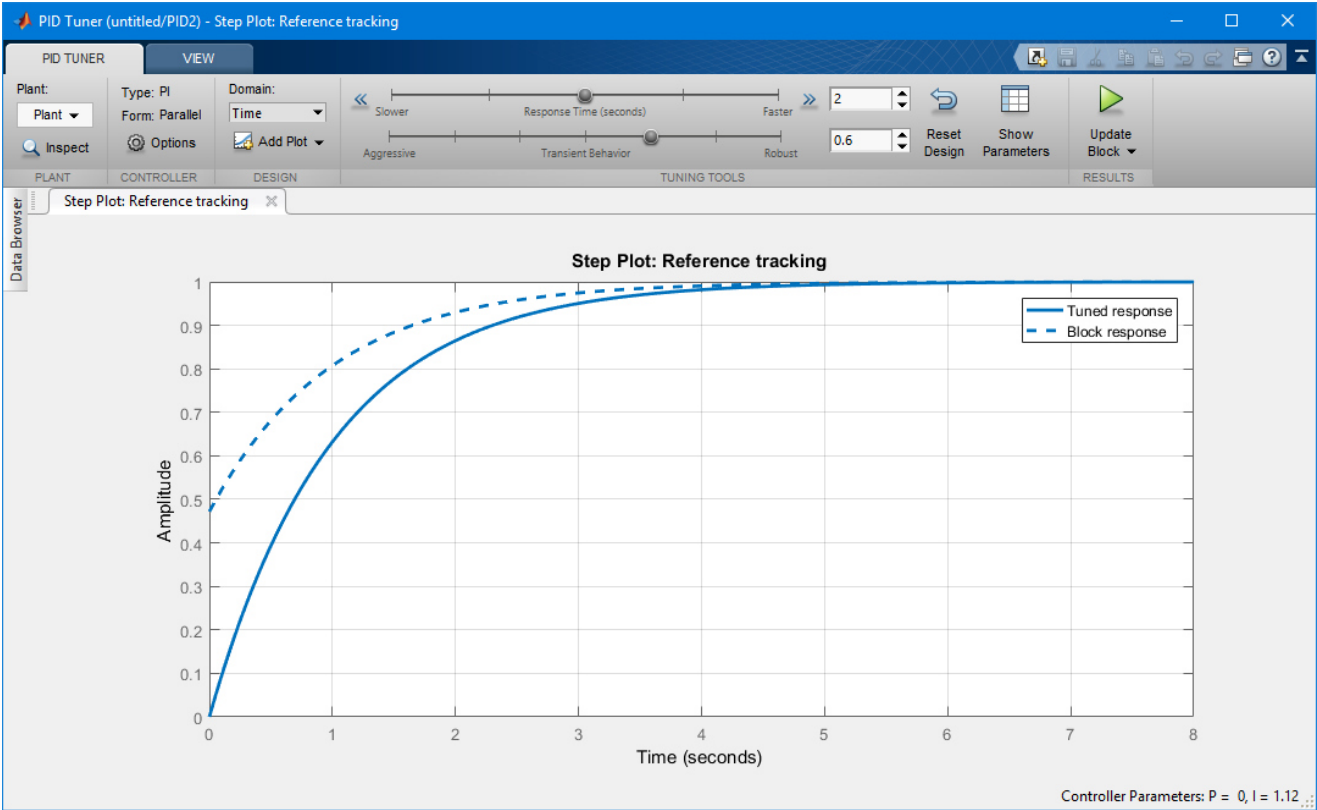


Рисунок 4.19 – Автоматический подбор параметров ПИД-регулятора в среде моделирования Simulink

При помощи ползунка Response Time можно настраивать быстроту переходного процесса, а при помощи Transient Behavior – поведение переходного процесса вдоль оси ординат (перерегулирование переходного процесса, колебательность).

После настройки ПИД-регулятора этими ползунками, при нажатии кнопки Update Block параметры регулятора вставляются автоматически. Результат моделирования системы по методу автонастройки регулятора приведен на рисунке 4.20.

Для подведения итога приведем критерии оценивания методов. Перерегулирование, определяемое величиной первого скачка графика, это отношение разности максимального значения переходной характеристики и ее

установившегося значения к величине установившегося значения. Измеряется в процентах.

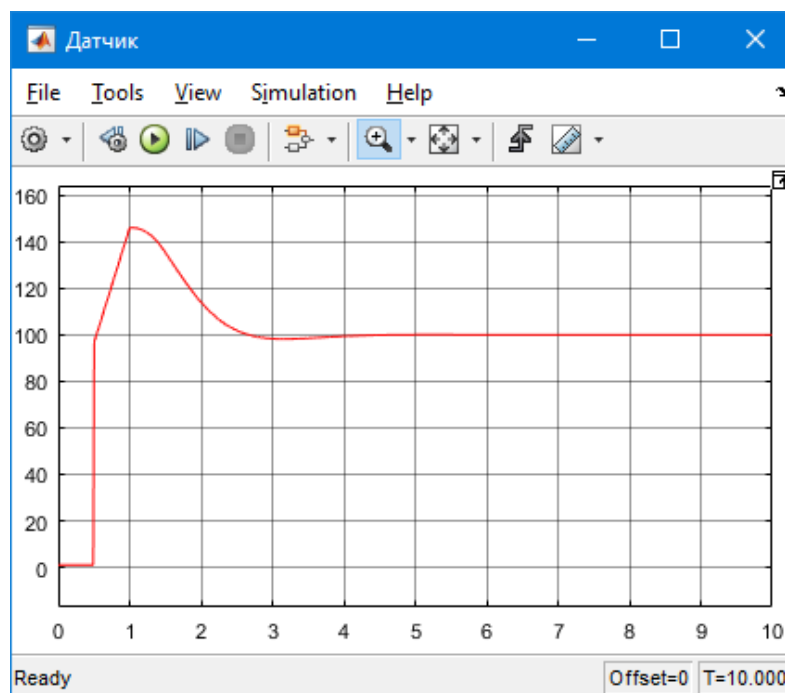


Рисунок 4.20 – Моделирование системы при автоматической настройке регулятора

Время переходного процесса характеризует быстродействие системы, определяется по временному коридору как пересечение графика в точке 1,05 и 0,95 от установившегося значения. То есть это та точка, после которой график не выходит из временного коридора.

Установившаяся ошибка система – разница между желаемым и реальным значением установившегося сигнала при времени, стремящемся к бесконечности. Подведен итог в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты полученных настроек регулятора

Параметр	Номограммы	Зиглера-Никольса	Автонастройка
Перерегулирование, %	75	41	43
Время регулирования, с	18	2,6	2,4
Уст. ошибка системы	2	0	0

Исходя из результатов, представленных в таблице 4.1, можно сделать несколько выводов. Во-первых, наилучшим методом подбора коэффициентов регулятора оказался метод Зиглера-Никольса. По регламенту ТЗ установлено: время перерегулирование не более 50%, а значит именно метод Зиглера-Никольса наиболее точен для данной системы. Во-вторых, метод автоматической настройки дал более хороший показатель времени регулирования, но это не означает, что он достаточно точный. Инженер АСУТП должен уметь настраивать регулятор при помощи численных и частотных методов с целью достижения наилучших параметров системы. В-третьих, метод настройки по номограммам дал плохие показатели оценки качества системы. Связано это с порядком астатизма системы. Данная система статичная, так как отсутствует интегратор. Метод настройки по номограммам превосходно работает для систем первого и второго порядка астатизма системы. Поэтому при разработке систем автоматизированного управления данный метод является наиболее эффективным по сравнению с другими.

Зачастую при использовании инженерных методов нахождения коэффициентов регулятора, специалист АСУТП достигает лучших коэффициентов регулятора при помощи ручной настройки. Поочередно изменяя коэффициенты в большую или меньшую сторону, получили переходную характеристику (рисунок 4.21).

Определим характеристики системы:

- перерегулирование составило 6%;
- время регулирования – 2,5 секунды,
- установившаяся ошибка системы – 0.

Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что любой метод подбора коэффициентов регулятора требует ручной донастройки.

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		60

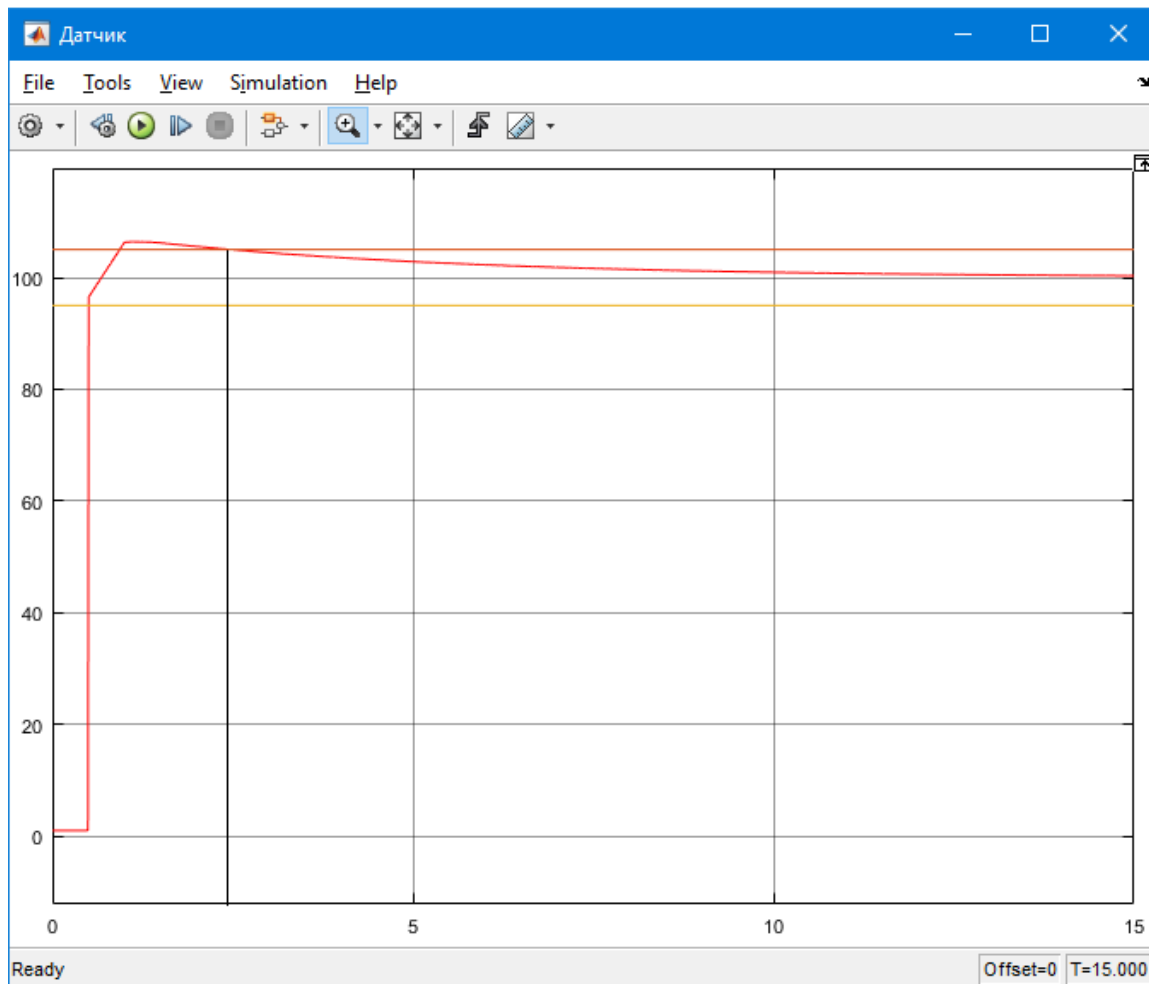


Рисунок 4.21 – Переходная характеристика контура, настроенного на оптимальные параметры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматривается автоматизация технологического процесса разморозки цинкового концентрата в транспортном цехе Челябинского цинкового завода. Размораживание груза является важным этапом технологического процесса производства. Количество выпускаемой готовой продукции напрямую зависит от количества поступаемого сырья.

В работе рассмотрены эффективные метода разморозки сырья. В основу автоматизации технологического процесса положен конвективный метод размораживания полувагонов с грузом. Данный метод базируется на применении физических свойств конвекции воздуха.

Объектом управления рассмотренной автоматизированной системы является воздухонагреватель смесительного типа, а регулируемым параметром – температура воздуха. Были выбраны технические средства автоматизации и оборудование. По физическим уравнениям конвективного теплопереноса было рассчитано время размораживания груза.

На основе выбранного оборудования была построена структурная схема системы управления температурой воздухонагревателя. Применение инженерных методов подбора коэффициентов ПИД-регулятора позволило улучшить качественные и количественные характеристики переходного процесса системы управления.

Реализация разработанной автоматизированной системы позволит сократить время размораживания грузовых вагонов и увеличить количество выпускаемой продукции. Моделирование системы управления и настройка регулировочных параметров предоставляет качественное регулирование температуры воздухонагревателя.

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		62

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Продукция ПАО «Челябинский цинковый завод». – <http://www.zinc.ru/activity/produksiya/>.
- 2 «Челябинский цинковый завод». О компании. – <http://www.zinc.ru/about/o-nas/>.
- 3 ГОСТ Р 54922-2012. Концентраты цинковые. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2014. – 46 с.
- 4 УГМК. Цветная металлургия. – https://www.ugmk.com/activity/primary_production/tsvetnaya-metallurgiya/.
- 5 Особенности перевозки влажных сыпучих грузов в зимний период - <https://dprom.online/mtindustry/osobennosti-perevozki-vlazhnyh-sypuchih-gruzov-v-zimnij-period/>.
- 6 Иванов, Н.С. Теплофизические свойства мерзлых горных пород / Н.С. Иванов, Р.И. Гаврильев. – М.: Наука, 1965. – 74 с.
- 7 Иванов, Н.С. Тепло и массоперенос в мерзлых горных породах / Н.С. Иванов. – М.: Наука, 1969. – 204 с.
- 8 Иванов, Н.С. Обоснование метода изучения температурной зависимости коэффициента теплопроводности промерзающих образцов грунта / Н.С. Иванов // Методы определения тепловых свойств горных пород: сб. науч. тр. – М.: Наука, 1970. – С. 59–62.
- 9 Ялоха-Коха, Х. Исследование способов размораживания и предупреждения смерзаемости сыпучих грузов в ПНР // Промышленный транспорт, – 1972. – № 9. – С. 14–15.
- 10 Кологривов, М.М. Определение тепловой мощности для разогрева замерзлых насыпных грузов / М.М. Кологривов, Сагала Т.А. // НТП и эффективность производства: сб. науч. тр. – О: Изд-во ОНАПТ, 2016. – С. 50–59.
- 11 Перевозка смерзающихся грузов: справочник / И.И. Батраков, Ю.А. Носков, В.Н. Харламов, В.А. Шкурин. – М.: Транспорт, 1988. – 208 с.
- 12 Наумов, С.С. Углеразмораживающий гараж / С.С. Наумов, Г.Г. Наумов

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		63

// Промышленный транспорт. – 1974. – № 2. – С. 12.

13 Основные технологические решения по эффективной разгрузке смерзшегося груза из железнодорожных полувагонов / Г.А. Сармурзин, А.К. Каракаев, Х.З. Бейсенова, Р.Ю. Зарипов // Наука и техника Казахстана. Серия «Механика и машиностроение». – 2017. – № 3-4. – С. 94–95.

14 О преимуществах инфракрасных обогревателей по сравнению с конвективными / Ю.Ю. Зеленкова, Б.Г. Сапожников, М.В. Зеленков, С.В. Звягин. // Леса России и хозяйство в них №2: сб. науч. тр. – Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2013. – С. 66–68.

15 Болотских, Н.Н. Энергоэффективный инфракрасный трубчатопанельный газовый обогреватель / Н.Н. Болотских // Альтернативные источники энергии: сб. науч. тр. – Харьков: Изд-во ХНУСиА, 2013. – С. 35–40.

16 Ициксон, Б.С. Инфракрасные газовые излучатели / Б.С. Ициксон, Ю.Л. Денисов. – М.: Недра, 1969. – 208 с.

17 Леконт, Ж.К. Инфракрасное излучение / Жорж Леконт; пер. с фр. С. Соловьева. – М. Москва, 1958. – 528 с.

18 Левитин, И.Б. Применение инфракрасной техники в народном хозяйстве / И.Б. Левитин. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 264 с.

19 Марголин, И.А. Основы инфракрасной техники / И.А. Марголин, Н.П. Румянцев. – М.: Воен.изд-во МО СССР, 1957. – 308 с.

20 Березьянская, Ю.В. Электрические инфракрасные обогреватели // С.О.К.: электронная версия журнала. 2010. № 139. – <http://www.c-o-k.ru/showtext/?id=1667>.

21 ГОСТ 22235-2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ. – М.: Стандартинформ, 2019. – 39 с.

22 Кравченко, В.М. Из опыта эксплуатации грейферов / В.М. Кравченко, В.А. Сидоров, В.В. Буцукин // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия 2. – 2012. – Вып 3. – С. 265-268.

23 Адамов, Е.И. Совершенствование методов определения и снижения

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		64

потерь от пылеобразования при перегрузке сыпучих грузов грейферными кранами и перегружателями: автореферат дис. ... д-ра техн. Наук / Е.И. Адамов. – Н.: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2010. – 23 с.

24 Ландау, Л.Д. Курс теоретической физики / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц // Т. 6. Гидродинамика. – М.:Наука, 1988. – 736 с.

25 Алексенко, Е.А. Слоистая конвекция марангони при учете теплообмена по закону Ньютона-Рихмана / Е.А. Алексенко, А.В. Горшков, Е.Ю. Просвирыков // Химическая физика и мезоскопия. Серия «Физика». – 2015. – Вып. 2. – № 1. – С. 37–50.

26 Остроумов, Г.А. Свободная тепловая конвекция в условиях внутренней задачи / Г.А. Остроумов. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1952. – 286 с.

27 ГОСТ 25380-2014. Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции. – М.: Стандартиформ, 2015. – 14 с.

28 Гершуни, Г.З. Устойчивость конвективных течений / Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкий. – М.:Наука, 1989. – 355 с.

29 Гершуни, Г.З. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости / Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкий. – М.:Наука, 1989. – 320 с.

30 Кригель, А.М. О применимости приближения свободной конвекции к атмосферной турбулентности / А.М. Кригель // Вестник Ленинградского гос. университета. Серия 7. – 1991. – Вып.2(14). – С.107–110.

31 Гончаренко, Ю.Б. Повышение эффективности работы радиационно-конвективных устройств угольных терминалов: автореферат дис. ... д-ра техн. наук / Ю.Б. Гончаренко. – М.: Изд-во ДВФУ, 2004. – 19 с.

32 Кригель, А. М. Вопросы термодинамики турбулентной конвекции. / А.М. Кригель // ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Серия «Техническая физика». – 2016. – Вып. 11. – № 86. – С. 136–139.

33 Григорьев, Б.А. Тепломассообмен: учебное пособие / Б.А. Григорьев,

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		65

Ф.Ф. Цветков. – 2-е изд. – М.: МЭИ, 2005. – 550 с.

34 Дульнев, Г.Н. Основы теории тепломассообмена: учебное пособие / Г.Н. Дульнев, С.В. Тихонов. – М.: СПбГУ, 2010. – 93 с.

35 Григорьев, В.А. Теоретические основы теплотехники: справочник / под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.

36 Сидоров, А. Ф. Об одном классе решений уравнений газовой динамики и естественной конвекции / А.Ф. Сидоров // Численные и аналитические методы решения задач механики сплошной среды: сб. науч. тр. – Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1981. – С. 101-117.

37 Остроумов, Г.А. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи / Г.А. Остроумов Л.: Изд-во техн.-теорет. лит., 1952. – 256 с.

38 Добровольский, В.П. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Детали машин»: учебное пособие / В.П. Добровольский. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. – 15 с.

39 Волков, С.Н. Вентиляция и отопление: учебное пособие / С.Н. Волков. – Кострома: Изд-во ФГОУ ВПО Костромская ГСХА, 2009. – 80 с.

40 График плавления льда. – <http://www.nado5.ru/e-book/grafik-plavleniya>.

41 Курс физической химии / Я.И. Герасимов, В.П. Древинг, Е.Н. Еремин, А.В. Киселев, В.П. Лебедев, Г.М. Панченков, А.И. Шлыгин; под рбщ. ред. Я.И. Герасимова. – Т. 1. – М.: Химия, 1964. – 626 с.

42 Демин, О.В. Теплозащита зданий: учебное пособие / О.В. Демин. – Тамбов: ТГТУ, 2004. – 106 с.

43 Свистунов, В.М. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов агропромышленного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства: учебное пособие / Свистунов В.М., Пушняков Н.К. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехника, 2016. – 429 с.

44 Кибец, И.Н. Физика: Справочник / И.Н. Кибец, В.И. Кибец. – Харьков: Изд-во Феникс, 1997. – 479 с.

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		66

45 Левинский, А.И. Связь плотности жидкости и пара с энтальпией испарения / А.И. Левинский //Журнал физической химии. – Т. 80, № 6. – С. 1048–1049.

46 Минеев, С.П. Основные технологические решения по эффективной разгрузке смерзшегося груза из железнодорожных полувагонов / С.П. Минеев, А.А. Прусова. – Днепропетровск: Изд-во ИГТМ НАН Украины, 2012. – 6 с.

47 Минеев, С. П. Вибрационное и волновое рыхление агрегированной сыпучей горной массы / С. П. Минеев, А. Л. Сахненко, С. А. Обухов. – Д.: Дніпро, 2005. – 212 с.

48 Комплекс для выгрузки угля из полувагонов. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22706030>.

49 Батицкий, В.А., Автоматизация производственных процессов и АСУ ТП в горной промышленности / В.А. Батицкий, В.И. Куроедов, А.А. Рыжков. – М.: Недра, 2001. – 303 с.

50 Коваленко, М.В. Разработка нового способа борьбы со смерзанием угля в полувагонах в зимний период времени / Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: научн.-техн. конференция студентов и аспирантов, 1–15 апреля 2016 г. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2016. С. 259–260.

51 Принцип работы смесительного воздухонагревателя. – <http://www.anxing.ru/catalog/vns/description-vns/principles-old/>.

52 Заслонки регулирующие серии ЗР с электромеханическим приводом. – https://termobrest.nt-rt.ru/images/manuals/7-2__080-A_ZR_+B.pdf.

53 Чиняев, И.Р. Методика расчёта характеристик запорно-регулирующих задвижек / И.Р. Чиняев. – М.: Энергоиздат, 1991. – 27 с.

54 Mitchell, T.M. Machine Learning / T.M. Mitchell. – New York, 1997. – 432 с.

55 Температура смеси газов. – <https://mash-xxl.info/page/1510991642381680-09245215092228022213113140196016>.

56 Закон Дальтона. – http://www.femto.com.ua/articles/part_1/0909.html.

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		67

57 ГОСТ 31848-2012 Оборудование промышленное газоиспользующее. Воздухонагреватели. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2013. – 12 с.

58 Воздухонагреватели смесительные Тепловей. – <http://teplovey.ru/products/vozd-smes/>.

59 ГОСТ 6651-94 Термопреобразователи сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 64 с.

60 Термопреобразователи сопротивления. – <https://vakuummash.ru/catalog/datchiki-temperature/tsmtsp-tsmtsp-ex/tsmvtspv-1088-01-011>.

61 STN-3 наружный датчик. – http://severru.ru/index.php/ventilyatsiya/avtomatika/avtomatika-datchiki/dat_temp/nar-dat-stn-2095-detail.

62 Механизм исполнительный электрический однооборотный МЭО(Ф). – <http://www.zeim.ru/production/docs/re/48-10-2017.pdf>.

63 ГОСТ ИЕС 60034-1-2014. Машины электрические вращающиеся. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики. – М.: Стандартинформ, 2015. – 106 с.

64 Пускатель бесконтактный реверсивный ПБР-2М. – <http://www.zeim.ru/production/docs/d/10180.pdf>.

65 Ромейко, М.Б. О применении отражающей изоляции в системах вентиляции и кондиционирования / М.Б. Ромейко. – Самара: Изд-во МГСУ, 2015. – С. 331-335.

66 ГОСТ 16523-97. Прокат тонколистовой из углеродистой стали качественной и обыкновенного качества общего назначения. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2009. – 23 с.

67 Вентилятор ВЦ 4-75 №6,3 радиальный. – <https://www.lufte.ru/product/ventiljator-vc-4-75-63-radialnyj-nizkogo-davlenija/>.

68 ПЛК промышленный Modicon M340. – <https://www.se.com/ru/ru/product-range-presentation/1468-modicon-m340/>.

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		68

69 Технический справочник Шнейдер Электрик. – https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=Panorama_SE_2019_web.pdf&p_Doc_Ref=МКР-CAT-TECHDIG-19.

70 ГОСТ Р МЭК 61131-3-2016 Контроллеры программируемые. Часть 3. Языки программирования. – М.: Стандартинформ, 2016. – 338 с.

71 Norton P.R Infrared image sensors // Optical Engineering. 1991, V.30, №11. P. 1649-1663.

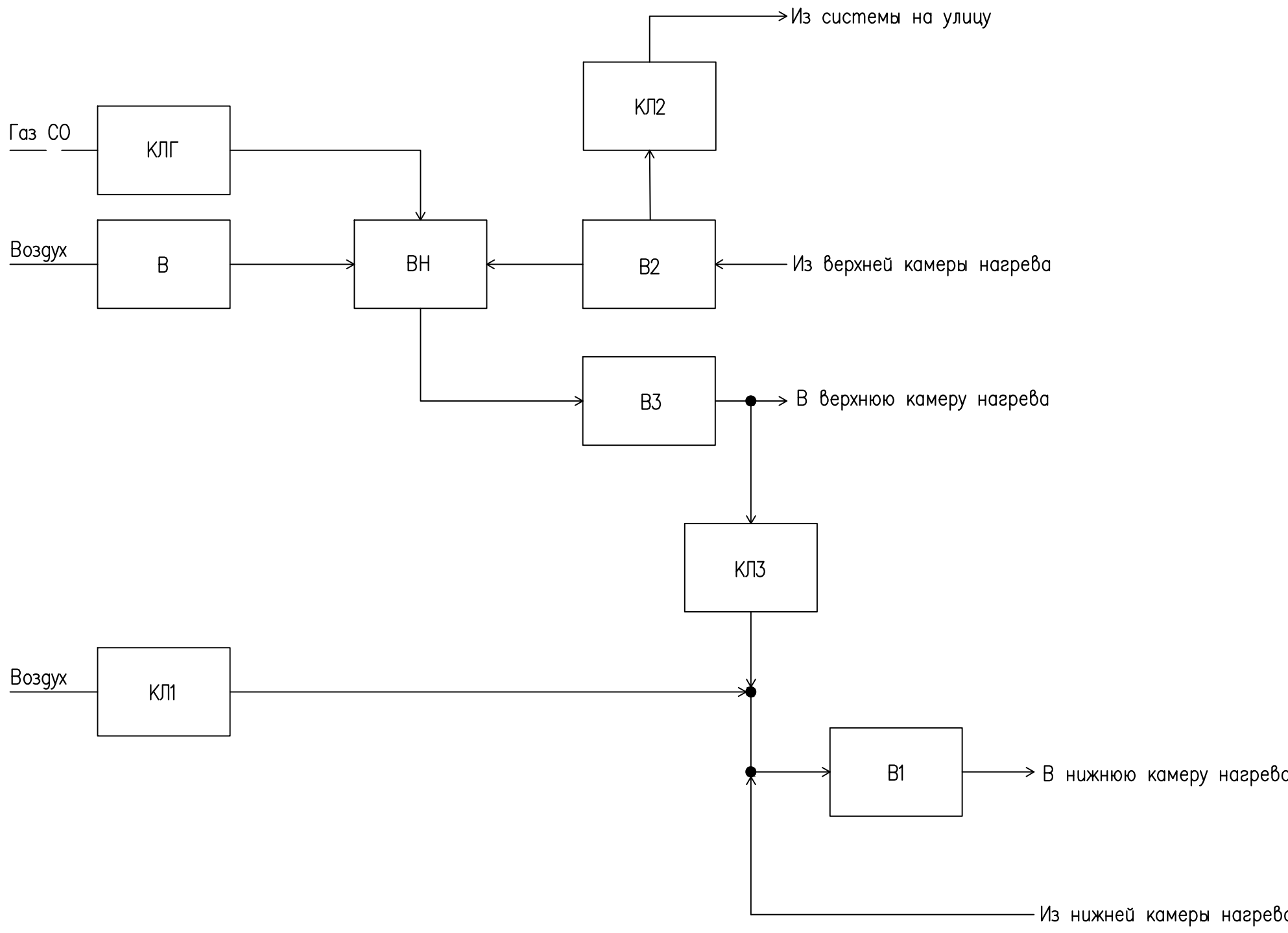
72 Ключев, А.С. Двухпозиционные автоматические регуляторы и их настройка / А.С. Ключев. – М.: Издательство «Энергия», Библиотека по автоматике, 1967. – 103 с.

73 Безхмельнов, В.Д. Использование методов настройки и автоподстройки систем автоматического управления / В.Д. Безхмельнов, В.И. Солнцев, Ж.С. Сухов / Электронный научно-технический журнал. – 2017. – С. 17-25.

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		69

ПРИЛОЖЕНИЯ

					270304.2020.391 ПЗ	Лист
						70
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		



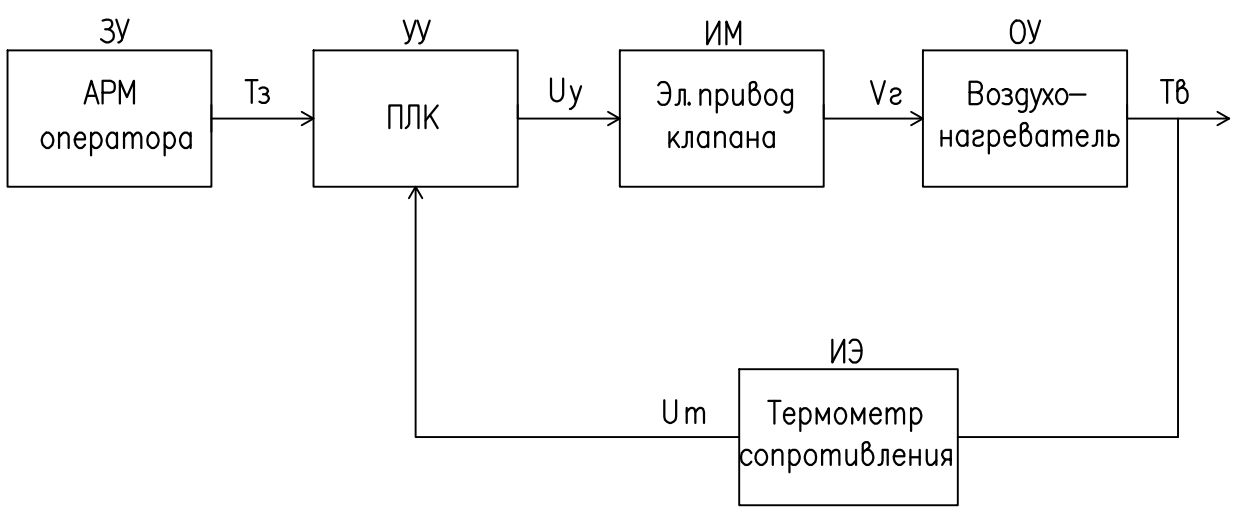
КЛГ – клапан, регулирующий подачу газа
 В – вентилятор, забирающий воздух с улицы
 ВН – воздухонагреватель
 КЛ1 – клапан 1
 КЛ2 – клапан 2
 КЛ3 – клапан 3
 В1 – вентилятор 1
 В2 – вентилятор 2
 В3 – вентилятор 3

ВЫПОЛНЕНО В СТУДЕНЧЕСКОЙ ВЕРСИИ ПРОГРАММЫ AUTODESK

ВЫПОЛНЕНО В СТУДЕНЧЕСКОЙ ВЕРСИИ ПРОГРАММЫ AUTODESK

Инф. N подл.	Взам. инв. N
Подпись и дата	

						270304.2020.391.01 С1			
						Автоматизированная система разморозки полувагонов в транспортном цехе Челябинского цинкового завода			
Изм.	Кол.уч.	Лист	Наок	Подпись	Дата		Стадия	Лист	Листов
						Тепляк. Структурная схема.			1
Разработал		Милевский		<i>[Signature]</i>			ФГАОУ ВО ЮУрГУ «НИУ»		
Проверил		Барбасова							
Н. контр.		Барбасова							
Утвердил		Казаринов							



- ЗУ – Задающее устройство
- УУ – Управляющее устройство
- ИМ – Исполнительный механизм
- ОУ – Объект управления
- ИЭ – Измерительный элемент

ВЫПОЛНЕНО В СТУДЕНЧЕСКОЙ ВЕРСИИ ПРОГРАММЫ AUTODESK

ВЫПОЛНЕНО В СТУДЕНЧЕСКОЙ ВЕРСИИ ПРОГРАММЫ AUTODESK

Инв. N подл.	Изм.	Кол.уч.	Лист	Изм.	Подпись	Дата	270304.2020.391.02 С1		
							Автоматизированная система разморозки полубагонов в транспортном цехе Челябинского цинкового завода		
Инв. N подл.	Разработал	Милевский			<i>[Signature]</i>		Стажера	Лист	Листов
	Проверил	Барбасова							1
	Н.контр.	Барбасова					ФГАОУ ВО ЮУрГУ «НИУ»		
	Утвердил	Казаринов							
							Система управления. Структурная схема.		

