

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

**В.В. Тугов, В.Р. Сабанчин**

# **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБЖИГА КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА**

Монография

Рекомендовано к изданию ученым советом федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

Оренбург  
2019

УДК 681.5:666.3  
ББК 32.965+35.41  
Т 81

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,  
зав. кафедрой автоматизации технологических процессов Лютов А.Г.;

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»,  
зав. кафедрой программного обеспечения и управления  
в технических системах Тарасов В.Н.

**Тугов В.В.**

Т81 Автоматизация процесса обжига керамического кирпича: монография / В.В. Тугов, В.Р. Сабанчин; Оренбургский гос. ун-т. - Оренбург: ОГУ, 2019. – 150 с.

ISBN

В монографии представлены результаты исследования по решению проблемы автоматизированного управления процессом обжига керамического кирпича в туннельной печи. Предложены математические модели процесса обжига керамического кирпича в туннельной печи как объекта автоматического управления с учетом расходов газозвдушной смеси, дымовых и нагретых газов. Доказана перспективность использования многомерного четкого регулятора с интервальной неопределенностью, позволяющая создавать энергоэффективную автоматизированную систему управления. В работе представлен комплекс математического, алгоритмического и программного обеспечения, позволяющий оценивать и совершенствовать режимы функционирования туннельных печей.

Материалы исследования будут полезны предприятиям производящих строительные материалы, могут быть полезны студентам, аспирантам, обучающиеся на технических направлениях, а также инженерно-техническим и научным работникам.

УДК 681.5:666.3  
ББК 32.965+35.41

© Тугов В.В.,  
Сабанчин В.Р., 2019  
© ОГУ, 2019

## Содержание

Список сокращений.....	4
Введение.....	6
1 Общая характеристика и анализ работы автоматизированных систем управления туннельными печами.....	9
1.1 Общая характеристика производства керамического кирпича.....	9
1.2 Анализ работы туннельной печи как объекта управления.....	19
1.3 Анализ недостатков работы туннельных печей при обжиге керамического кирпича.....	24
1.4 Анализ работы автоматизированных систем управления туннельными печами для обжига керамического кирпича.....	28
1.5 Основные характеристики многомерных четких логических регуляторов.....	36
2 Математическое описание туннельной печи как объекта автоматического управления.....	44
2.1 Математическое описание процесса обжига в туннельной печи как объекта автоматического управления по давлению газовой смеси с учетом расходов газовой смеси, дымовых и нагретых газов.....	44
2.2 Математическое описание процесса обжига в туннельной печи как объект автоматического управления по разрежению дымовых газов.....	52
2.3 Математическое описание процесса обжига в туннельной печи как объекта автоматического управления по давлению газовой смеси с учетом расхода нагретого газа.....	59
3 Исследование влияния технологических параметров на характеристики туннельной печи и разработка алгоритмов управления.....	62
3.1 Определение экстремальных соотношений между технологическими параметрами туннельной печи.....	62
3.2 Исследование влияния технологических параметров на характеристики туннельной печи обжига.....	68
3.3 Разработка алгоритма управления туннельной печью на основе логических регуляторов.....	84
3.4 Разработка алгоритма управления процессом обжига керамического кирпича в туннельной печи по давлению газовой смеси.....	100
4 Экспериментальные исследования разработанной автоматизированной системы управления процессом обжига в туннельной печи.....	105
4.1 Характеристика разработанной автоматизированной системы управления процессом обжига в туннельной печи.....	105
4.2 Разработка и настройка четкого регулятора.....	110
4.3 Описание модернизированной туннельной печи-сушилки.....	116
4.4 Экспериментальные исследования процесса обжига.....	122
4.5 Реализация автоматизированной системы в среде TraceMode 6.....	129
Заключение.....	139
Список использованных источников.....	140

## Список сокращений

АЛ – оператор обработки аварийных ситуаций

АРМ – автоматизированное рабочее место

АСУ – автоматизированная система управления

АСУТП – автоматизированная система управления технологическими процессами

АУ – автоматическое управление

БЛВ – блок логического вывода

БСП – блок совмещения присвоения

ВАК – высшая аттестационная комиссия

ГВС – газоздушная смесь

ГОСТ – государственный стандарт

Д – дискретные входные и выходные переменные

ДГ – дымовые газы

ДНФ - дизъюнктивная нормальная форма

ДФ – дефаззификатор

КСПП – компенсирующие системы продукционных правил

ЛР – логический регулятор

МВА – модуль аналогового ввода

МВУ – модуль вывода управляющий

МДВВ – модуль дискретного ввода/вывода

МНРсИН – многомерный нечеткий регулятор с интервальной неопределенностью

МЧЛР – многомерный четкий логический регулятор

НГ – нагретые газы

НИР – научно-исследовательская работа

НЛР – нечеткий логический регулятор

ОГУ – Оренбургский государственный университет

ОЗУ – оперативное запоминающее устройство

ООО – общество с ограниченной ответственностью

ОСПП – блок обработки ситуационных подпрограмм

ПИД – регулятор – пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор  
ПК – персональный компьютер  
ПрК – программируемый контроллер  
РСПП – регулирующие системы производственных правил  
РФ – Российская Федерация  
СДП – блок сканирования дискретных входных и выходных переменных  
СПП – ситуационные подпрограммы  
ТНР - типовые нечеткие регуляторы  
УСО – устройство сопряжения с объектом  
Ф – фаззификатор  
ФП – функция принадлежности  
ЧЛР – четкий логический регулятор  
ЧЛРСИН – четкий логический регулятор с интервальной неопределенностью  
ST (Structured Text) – структурированный текст  
SCADA – supervisory control and data acquisition (система диспетчерского управления и сбора данных)  
FBD – functional block diagram (функциональные блочные диаграммы)  
HMI (human-machine interface) –человеко-машинный интерфейс

## Введение

Одной из государственных программ Российской Федерации на 2015 – 2020 годы является «Обеспечение доступным жильем граждан Российской Федерации». Цель программы – повышение доступности и качества жилищного обеспечения населения, что привело к росту спроса и объема производства строительных материалов. Одним из основных строительных материалов для возведения жилых домов, зданий, сооружений является керамический кирпич, поэтому для достижения цели программы необходимо увеличить производство и качество кирпичей.

Проведенный анализ показал, что, как правило, технологии производства керамического кирпича остаются неизменными десятки лет, а применяемое при этом оборудование обладает достаточным ресурсом. Вместе с тем используемые автоматизированные системы управления (АСУ), предполагающие участие человека-оператора, устарели и не обеспечивают строгого соблюдения и требуемых технологических режимов.

Наиболее энергоемким и трудоемким процессом при производстве кирпича является обжиг, так как при этом формируются свойства кирпича, регламентирующие качество получаемого продукта. На процесс обжига приходится наибольшее количество брака (три и более процентов от общего количества выпускаемых изделий). Для предприятия при объеме выпуска кирпича 50 – 51 млн шт/год потери составляют порядка 1,5 – 1,75 млн шт/год. Производственные участки термической обработки керамического кирпича обладают высокой энергоемкостью, что обуславливает значительные экономические затраты на обжиг (например, в туннельной печи расход газовой смеси составляет около 30000 м<sup>3</sup>/сут на 138 тыс. штук/сут кирпичей). Поэтому снижение энергозатрат является одной из важных задач при производстве строительных материалов.

В качестве технологического оборудования для термической обработки кирпича в стране в основном применяются туннельные печи, доля которых

составляет свыше 60 %. Преимуществом туннельных печей является высокая производительность керамических кирпичей, благодаря высокой степени автоматизации.

Теоретические и прикладные аспекты по обжигу керамических изделий в туннельных печах исследовали российские и зарубежные ученые, такие как Зигель Р., Доброхотов Н.Н., Хауэлл Дж., Деликишкин С.И., Лундина М.Г., Семенюк И.М., Шайнман Е.Ш., Рылко А.В., Нохратян К.А. и др. Автоматизации технологических процессов производства строительных изделий, разработке методов управления технологическими объектами, повышению эффективности производства посвящены работы Хусаинова А.Н., Муравьевой Е.А., Гольцовой О.Б., Хавер С.В., Ракутиной Д.В., Сазоновой Т.В. и др.

Однако в этих работах, связанных с проблемой обжига керамического кирпича, исследования проводились недостаточно полно, до сих пор остаются непроработанными вопросы, связанные с взаимовлиянием основных регулируемых параметров (давление, разрежение, расход и температура) на характеристики туннельной печи как объекта автоматического управления.

Таким образом, для построения современной АСУ процессом обжига, обеспечивающей минимальное количество брака, необходимо разработать математические модели и алгоритмы управления технологическим процессом, позволяющие обеспечить строгое соблюдение значений регулируемых параметров.

Представленная работа соответствует направлению госбюджетной НИР № 01200902662 «Анализ и синтез информационных и технических систем».

В первом разделе монографии рассмотрены основные технологические процессы и проблемы, связанные с производством керамического кирпича. В частности, подробно описан процесс обжига как наиболее сложный и экономически затратный. Проведена классификация печей, применяемых для производства кирпича. Рассмотрены наиболее эффективные технологии и АСУ, используемые для производства керамических кирпичей.

Во втором разделе представлено разработанное математическое описание туннельной печи как объекта АУ с учетом давления и расхода газовой смеси,

разрежения и расхода дымовых и нагретых газов. Для описания теплового состояния кирпича (сырца) при обжиге в туннельной печи определена научная задача. Составлены дифференциальные уравнения процесса обжига керамических изделий в туннельной печи как объекта автоматического управления. Разработаны структурные схемы моделей туннельной печи как объекта АУ, которые позволяют по каждому входному параметру определить передаточную функцию.

В третьем разделе представлены результаты исследования влияния технологических параметров на динамические характеристики туннельной печи и выполнена разработка алгоритмов управления на основе созданных математических моделей и с применением многомерного четкого регулятора. Для семиконтурного четкого регулятора с интервальной неопределенностью разработана специальная система продукционных правил, исключая взаимное влияние контуров регулирования.

В четвертом разделе представлена схема модернизированной туннельной печи, на которую получен патент на изобретение, а также разработанная АСУ процессом обжига керамического кирпича в туннельной печи. Разработана функциональная схема автоматизации туннельной печи обжига керамического кирпича, показывающая связь технологического процесса со средствами автоматизации. Также показаны результаты проведенных экспериментальных исследований с различными типами регуляторов процесса обжига, которые доказали адекватность разработанных моделей, а также эффективность использования многомерного четкого регулятора и интервальной неопределенностью (МЧРСИН). Средствами SCADA-системы Trace Mode 6 представлена реализованная АСУ туннельной печью.

# 1 Общая характеристика и анализ работы автоматизированных систем управления туннельными печами

## 1.1 Общая характеристика производства керамического кирпича

Одной из государственных программ Российской Федерации на 2015 - 2020 годы является «Обеспечение доступным жильем граждан Российской Федерации». Целью программы является повышение доступности жилья и качества жилищного обеспечения населения. По данным Росстроя, объем ввода жилой площади в России в период с 2005 по 2017 годы вырос с 45,5 млн кв.м до 129,5 млн кв.м. (рисунок 1.1), что привело к увеличению спроса на строительные материалы [1].

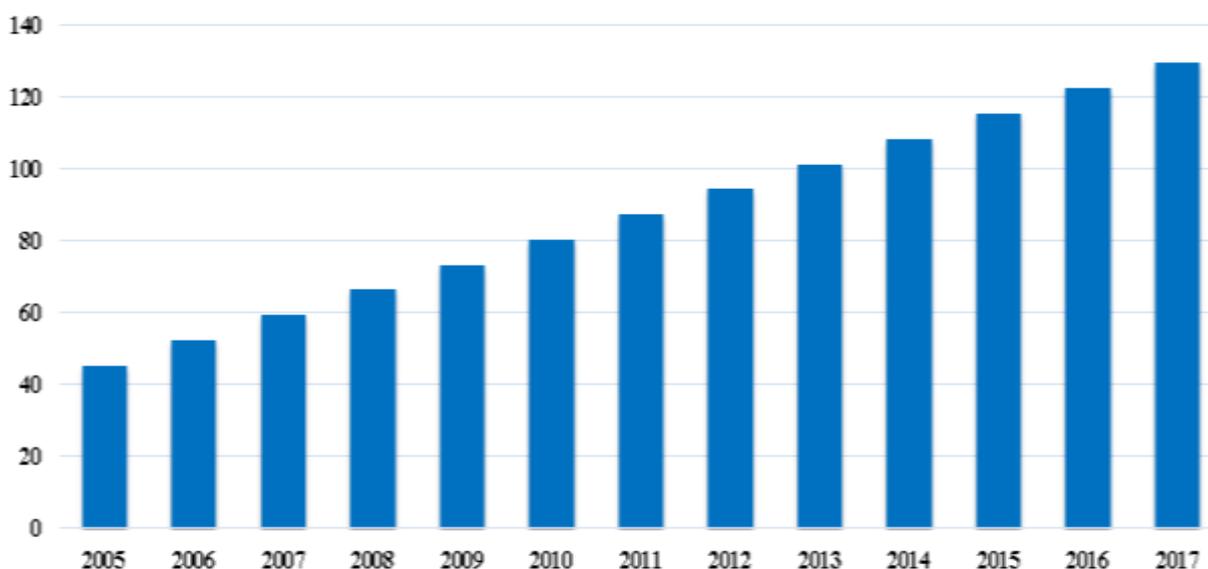


Рисунок 1.1 – Объем ввода жилой площади в России, млн. кв.м

Проведенный анализ различных источников показал [2], что основным строительным материалом для возведения жилых домов, зданий непроизводственного назначения (банки, офисы, торговые центры), другое (детские сады, школы, больницы) является кирпич (рисунок 1.2).

Из рисунка 1.2 можно сделать вывод, что наиболее часто кирпич используется для строительства жилых домов – 68 % от общего количества, для строительства зданий непроизводственного назначения – 19 %, другое – 13 %.

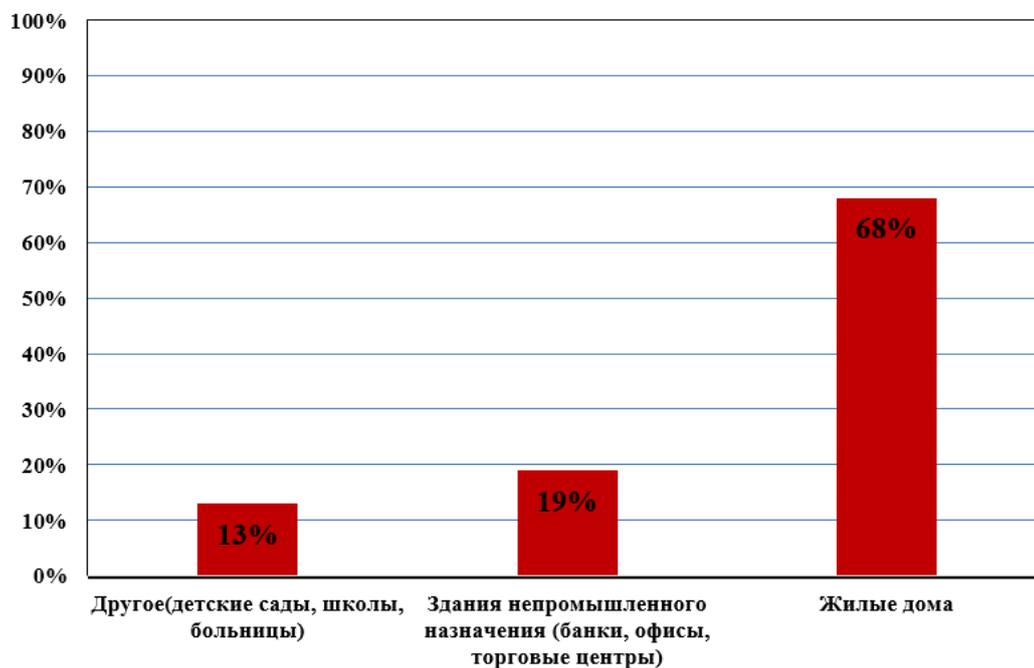


Рисунок 1.2 – Структура потребителей кирпича в зависимости от назначения строящихся зданий

Рассмотрим структуру рынка по видам строительного кирпича (рисунок 1.3). Из нее видно, что наибольшая доля рынка, на сегодняшний день, приходится на керамический строительный кирпич, который составляет 45 % от общего количества кирпича на рынке, силикатный и шлаковый кирпич – 36 %, а кирпичи других видов – 18 %.

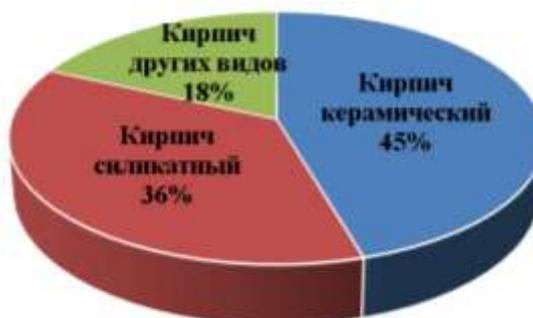


Рисунок 1.3 – Структура рынка по видам строительных материалов

Основными технологическими процессами производства керамических кирпичей являются: добыча глины, подготовка компонентов, корректирующих свойства природного материала, получение массы (шихты) с помощью дозирования компонентов в должном соотношении, обработка и подготовка массы для дальнейшего получения полуфабриката сырца, пластический способ и полусухой способ прессования (экструзионное), сушка, обжиг и охлаждение керамического кирпича.

Виды и свойства полученного сырья, а также технологические процессы производства керамического кирпича различаются большим многообразием.

Глины для производства керамического кирпича добывают открытым способом в специальных карьерах. Характеристика глины зависит от содержания в ней глинозёма (окись алюминия)  $Al_2O_3$ , они содержатся в пределах (10 - 15 %). Имеются также: окись железа  $Fe_2O_3$  (2,2 - 3,8 %), двуокись титана  $TiO_2$  (0,65 - 0,67 %), окись магния  $MgO$  (0,3 - 0,6 %), окись кремния  $SiO_2$  (60 - 75 %), окись щелочных металлов  $Na_2O$  (0,09 - 0,12 %), окись кальция  $CaO$  (0,4 - 0,5 %) и от их количества и содержания зависят технологические свойства глины.

При добыче глины выделяют три основные карьерные работы:

1. Подготовительные работы – удаление кустарников, пней, устройство дорожных покрытий.
2. Вскрышные работы – удаление растительного слоя и проведение выработок, обеспечивающих доступ к глинам.
3. Добычные работы – выемка глины из массива и погрузка ее на транспортные средства.

Основным способом добычи глины является валовая добыча, при которой глину получают без выделения отдельных пластов сырья. В некоторых случаях используют способ селективной добычи.

Для улучшения природных свойств глины и уменьшения общей усадки широко применяют добавки (до 35 %).

В качестве добавок используются: уголь – для улучшения обжига кирпича; пиритные огарки – для улучшения сушки кирпича; бентонит – для улучшения пластичности кирпича.

Для формования (прессования) керамического кирпича применяются два способа:

- пластический способ прессования (метод штампования);
- полусухой способ прессования (метод экструзии).

Способы формования различаются по количеству влаги, содержащейся в формовочной массе.

Основными показателями керамического кирпича являются плотность, прочность, влагопоглощение (водостойкость) и морозостойкость.

Рассмотрим особенности и способы формования при различных технологических процессах производства керамического кирпича.

Последовательность технологических этапов полусухого прессования кирпича представлена на рисунке 1.4.

Полусухой способ прессования подразумевает сушку сырья до влажности 6 – 10 %, измельчение до должного зернового состава, смешивание для усреднения влажности и в виде сыпучей массы, под давлением 30 МПа, поштучно сырье прессуют на револьверном прессе. Для снижения массы кирпича, при полусухом прессовании, его делают с пустотами. Из-за малой влажности и поштучного формования кирпич полусухого прессования имеет ровные размеры и форму.

Преимуществом рассматриваемого метода является непосредственная укладка спрессованного кирпича-сырца на печные вагонетки с дальнейшим высушиванием в туннельных сушилках или обжиг без предварительной досушки. По сравнению с методом пластического формования, механизация производства осуществляется более простая. Несмотря на преимущества, в целом полусухой способ прессования имеет следующие недостатки: повышенное пылеобразование в процессе производства, для устранения этого включаются системы пылеулавливания, а в них отсутствуют необходимая гомогенизация и переработка сырья. Поэтому

полученные изделия имеют пониженную прочность и морозостойкость, а также длительный процесс сушки сырца (примерно 1-3 суток).

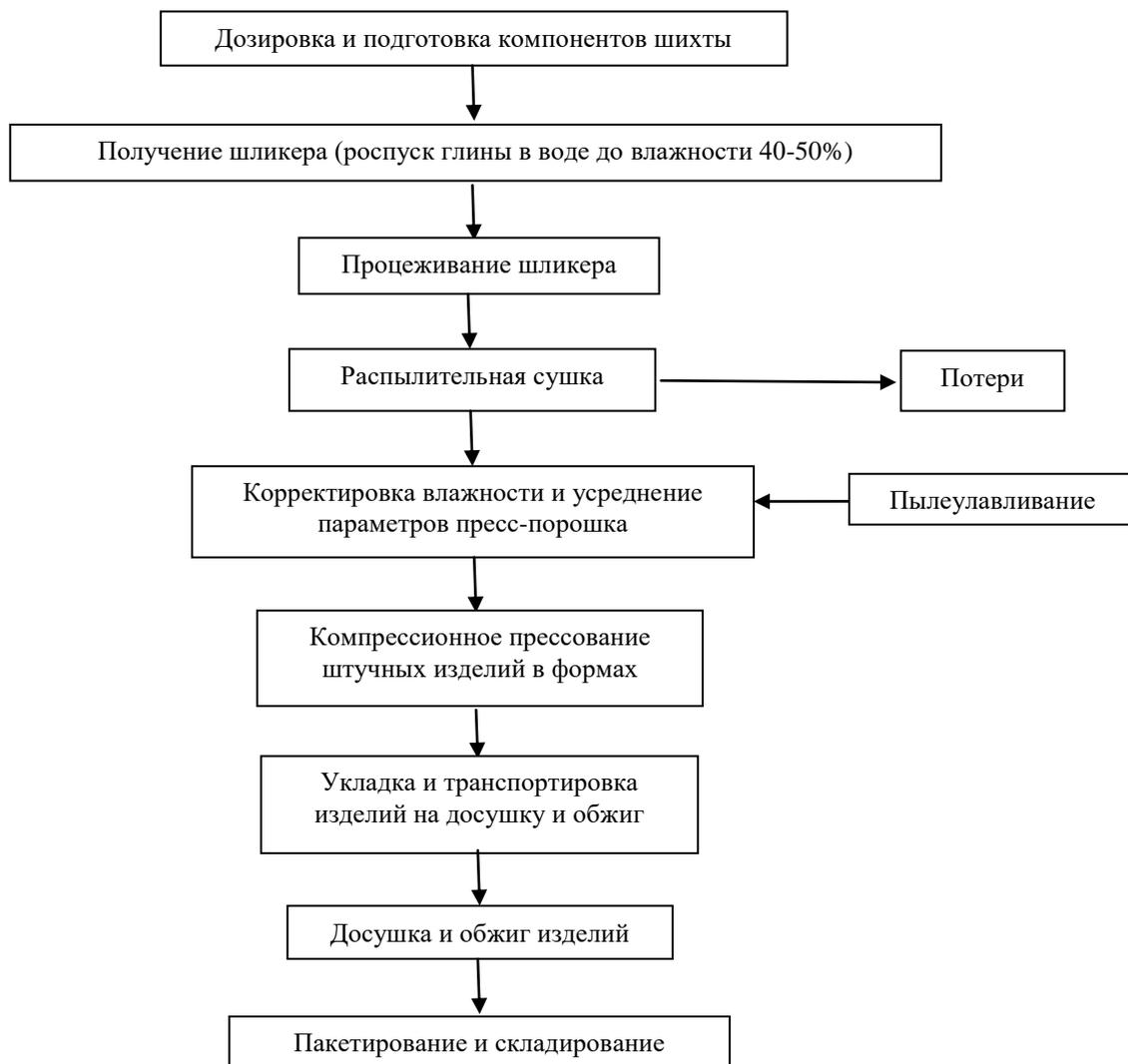


Рисунок 1.4 – Технологические этапы линии полусухого прессования кирпича

Технология полусухого прессования отличается от пластического формования тем, что схема приготовления сырья более упрощенная. Этот способ облегчает и упрощает процесс сушки. Полученный кирпич можно использовать как лицевой материал, так как углы получаются более ровными. Способ пластического формования является простым и экономичным, а применяемое оборудование проще и надежнее в обслуживании по сравнению со способом производства полусухого прессования. Энергозатраты снижаются за счет снижения температуры на 50 °С при обжиге, чем у изделий полусухого прессования.

Способ пластического формования кирпича – это классический способ получения кирпича, основанный на пластических свойствах глины.

В производстве стеновой керамики самым распространенным способом является пластический способ подготовки массы.

Полученный керамический кирпич пластического формования долговечен, износостоек, более прочен и экологичен.

Технологические этапы линий пластического формования представлены на рисунке 1.5.

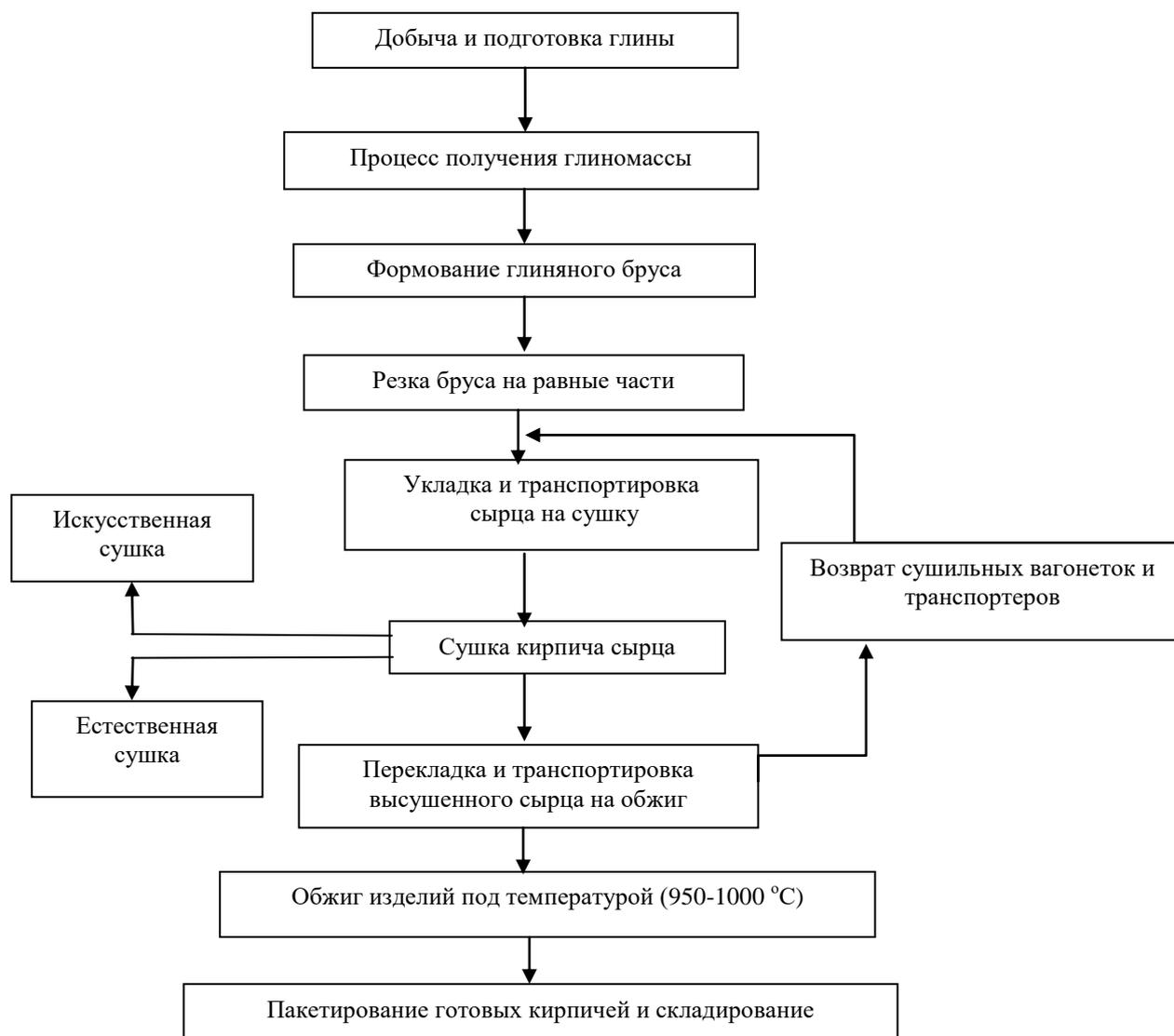


Рисунок 1.5 – Технологические этапы линии пластического формования

Способ пластического формования обладает следующими преимуществами: возможность выпуска изделий в большом ассортименте, больших размеров,

различной формы и пустотности. В некоторых случаях предел прочности при изгибе и морозостойкость у изделий, полученных с помощью пластического формования, выше, чем полученные способом полусухого прессования.

Насыщение рынка керамическим кирпичом возможно за счет строительства новых или модернизации существующих кирпичных заводов.

Наиболее энергоемким и трудоемким процессом при производстве кирпича является обжиг, так как при этом формируются свойства кирпича, регламентирующие качество получаемого продукта. На процесс обжига приходится наибольшее количество брака (не менее 3 % от общего количества выпускаемых изделий) [3,4]. Для предприятия при объеме выпуска кирпича 50 – 51 млн шт/год потери составляют порядка 1,5 – 1,75 млн шт/год.

Стеновые строительные изделия и материалы обжигают в специальных печах, которые широко используют в промышленности. Промышленная печь – это установка технологического назначения, в которой с помощью тепла, при высокой температуре, изменяются агрегатные состояния готового сырья, его кристаллическая структура, химический состав [5,6].

Обжиг керамического кирпича в печах – это сложный технологический процесс. Одновременно происходит газификация и горение топлива, движение продуктов горения в рабочем пространстве печи, массообменные и теплообменные процессы, связанные с эндотермическими и экзотермическими эффектами в керамических кирпичах, изменение добавок.

Обжигается кирпич в печах периодического и непрерывного действия. Печи обжига керамического кирпича делятся на: горные и камерные печи периодической работы, кольцевые и туннельные печи непрерывной работы. Камерные и горные печи отличаются от других печей большой неравномерностью температур по высоте печи и значительной трудоемкостью обслуживания, именно поэтому они не получили широкое применение в производстве.

У действующих кольцевых печей высокая тепловая экономичность, высокая производительность, переход с одного вида топлива на другой без каких-либо значительных переделок, возможно использование низкосортных видов топлива. По

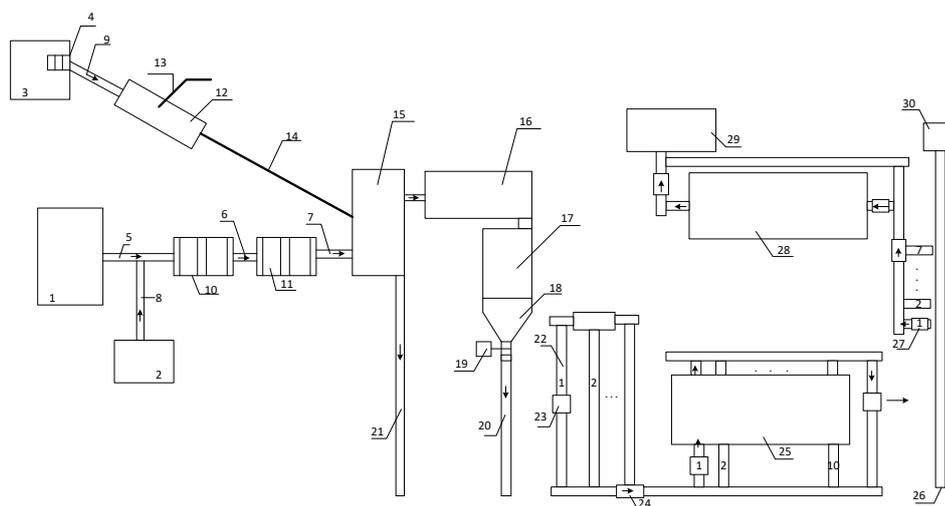
конструкции кольцевая печь представляет собой замкнутое вытянутое кольцо с боковыми окнами (ходками), служащее для выгрузки и загрузки керамических кирпичей. Обжиг в таких печах является трудоемким процессом из-за сложности механизма его осуществления.

Загрузку и выгрузку керамического кирпича выполняют по очереди через каждые камеры по ходу движения огня. Кольцевые печи являются более экономичными по сравнению с туннельными, но время обжига в них достаточно большое и составляет 3-4 дня. Кроме того, процесс загрузки и разгрузки таких печей является достаточно трудоемким, отнимающий много рабочей силы. Заметно улучшить механизацию погрузки и выгрузки керамических изделий в них невозможно в связи с тем, что оборудование, которое используется в кольцевых печах, технически и морально устарело.

При обжиге кирпича в кольцевой печи канал обжига практически полностью загружен, кроме 2 - 4 камер. Они служат для загрузки сырца и выгрузки готовой продукции.

В рабочей зоне садки и выгрузки кирпича поддерживается высокая температура, которая достигает 60-80 °С, что является также существенным недостатком кольцевых печей. Садка и выгрузка кирпичей производится вручную, что представляет трудный процесс для обслуживающего персонала. На кольцевых кирпичных заводах не производят реконструкцию и не строят новые кольцевые печи.

В настоящее время процесс производства керамических изделий в туннельных печах имеет значительные преимущества перед печами периодического действия и кольцевыми [7,8,9]. Технологическая схема производства керамического кирпича представлена на рисунке 1.6.



Сырьевые склады – 1,2,3; дробилка – 4; ленточные транспортеры – 5-9,20,21,26; валцы грубого и тонкого помола – 10,11; мельница – 12; вода – 13; труба – 14; глиномешалки – 15,16; вакуумный пресс – 17; мундштук – 18; однострунный резательный полуавтомат – 19; рельсы – 22; вагонетка – 23; электролафет – 24; сушильная камера – 25; обжиговая платформа – 27; туннельная печь – 28; склад готовой продукции – 29; бункер отходов – 30

Рисунок 1.6 – Технологическая схема производства керамического кирпича

Тепловой процесс обжига керамического кирпича в туннельной печи, по температурному режиму, разделен на три периода: подготовки, обжига, охлаждения. Каждый период в туннельной печи описывается определенным физико-химическим процессом, который происходит в керамическом изделии. Необходимо придерживаться четких требований к температурному режиму и продолжительности обжига на каждой позиции печи, так как качество полученных изделий зависит от правильности протекания этих процессов.

Основной характеристикой обжига керамического кирпича является температурный режим, т.е. зависимость между температурой обжига и его временем (длительностью), а графически представляет температурную кривую или кривую обжига.

Процесс нагрева, обжига и охлаждения керамических изделий требует определенного времени, так как протекают многочисленные физико-химические процессы, от которых напрямую зависит их качество. Для производственных процессов важно учитывать значение температуры массы самих керамических

изделий. В практических условиях определить эти температуры не представляется возможным и приходится применять температуру среды, в которой происходят процессы нагрева, обжига и охлаждения. Режим термической обработки изделий зависит от температуры среды (печного пространства), где происходят тепловые процессы в печи. В зоне охлаждения температура керамического изделия будет горячее, чем продукты горения, а в зоне нагрева – холоднее. Температурой печи в зоне обжига является не температура собственного пламени газовых горелок, расположенных по зоне обжига, а средняя температура продуктов сгорания видимого топлива. Рассмотрим рисунок 1.7, где представлен температурный график процесса производства керамического кирпича.

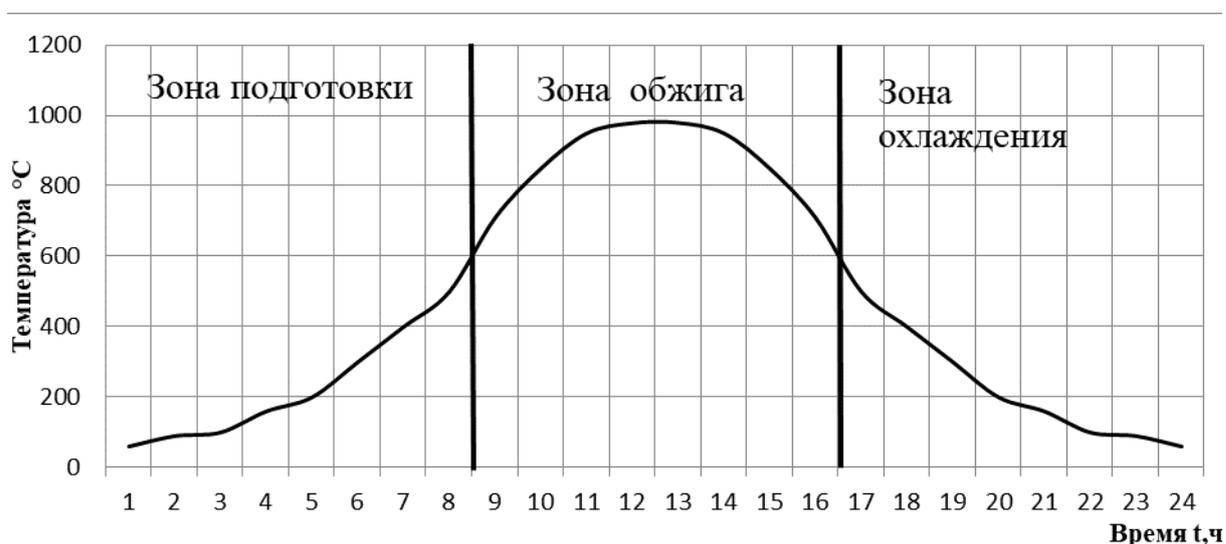


Рисунок 1.7 – Температурный график процесса производства керамического кирпича в туннельной печи

Туннельная печь работает на газообразном топливе (природный газ). Воздух подается и регулируется вентиляторами, расположенными в зоне обжига. В зоне подготовки температура повышается до 600 °C. Температура в зоне обжига поддерживается в пределах от 950 °C до 1000 °C. В зоне охлаждения температура составляет от 60 °C до 80 °C. Технологический цикл производства кирпича в туннельной печи составляет до 36 часов.

По завершении процесса обжига электролафетом платформа с кирпичом подается на площадку или в склад. Готовый кирпич хранится на складе от 3 до 7 суток, а затем осуществляется его отгрузка. На складе кирпич укладывают на поддоны (металлические площадки) и загружают автокраном на автотранспорт перед продажей к потребителю. Качество кирпича определяется маркой. Испытания производятся в лаборатории. Изделия соответствующего качества на поддонах с помощью электропогрузчика отгружаются потребителю, а брак отправляется на переработку в производство.

Таким образом, сравнительный анализ работы туннельной и кольцевой печи показал, что туннельные печи обладают таким преимуществом, как возможность полной автоматизации технологических процессов от стадии подготовки до охлаждения. Полная автоматизация облегчает труд обслуживающего персонала и уменьшает время всех технологических процессов производства керамического кирпича. Также исследуя работу туннельных печей, можно сделать следующий вывод, что основным процессом работы печи является процесс обжига, который на данный момент не полностью автоматизирован.

## **1.2 Анализ работы туннельной печи как объекта управления**

Проведенный анализ показал, что, как правило, технологии производства керамического кирпича остаются неизменными десятки лет, а применяемое при этом оборудование обладает достаточным ресурсом [10,11,12,13]. Вместе с тем используемые автоматизированные системы управления (АСУ), предполагающие участие человека-оператора, устарели и не обеспечивают строгого соблюдения и требуемых технологических режимов.

Для того чтобы быть конкурентоспособными на рынке производства керамического кирпича, действующие заводы вынуждены производить реконструкцию. Целью реконструкций является повышение качества кирпича, увеличение объёмов производства, расширение ассортимента и снижение издержек.

Из-за большого срока эксплуатации печей и старения ограждающих конструкций происходит ухудшение теплового режима и увеличение тепловых потерь. Улучшение работы теплотехнического оборудования возможно за счет его модернизации.

Рассмотрим туннельную печь обжига керамического кирпича и ее температурный режим. В печи температура для отдельных зон или участков рабочего пространства различная, а тепловая нагрузка не изменяется во времени. Нагрев керамических изделий происходит при разных тепловых режимах и по заданному температурному графику.

Тепловой режим печи может меняться в зависимости от:

- показателя тепловой нагрузки туннельной печи, который меняется в зависимости от времени;
- заданного графика, который меняет температуру в отдельных зонах печи или в рабочем пространстве;
- стадии процессов нагрева, обжига и охлаждения, которые меняют расход газовой среды.

Туннельная печь представляет собой прямой канал (туннель), по рельсовому пути которого перемещаются вагонетки с садкой обжигаемых изделий навстречу теплоносителю. Рассмотрим общую схему туннельной печи (рисунок 1.8).

Туннельная печь содержит: рабочий канал 1, условно разделенный на зоны подготовки, обжига и охлаждения, вентилятор отбора теплоносителя 2, установленный в конце зоны охлаждения, вентилятор 3 подачи атмосферного воздуха в зону охлаждения, отопительную систему 4, вентилятор отбора дымовых газов 5, размещенный перед зоной подготовки, вентилятор отбора горячего воздуха из зоны охлаждения 6, вентиляционную систему 7, включающую определенное количество блоков, последовательно распределенных по зоне подготовки, вентилятор 11 для отсоса теплоносителя, установленный в начале зоны подготовки. Блоки вентиляционной системы 7 состоят из нагнетающего вентилятора 8, к которому в определенном месте подведен трубопровод 9 для подачи воздуха из зоны охлаждения и трубопровод 10 для подсоса атмосферного воздуха.

Туннельная печь обжига керамического кирпича работает следующим образом [12]. В рабочий канал 1, на некотором расстоянии от конца зоны охлаждения, подают атмосферный воздух вентилятором 3. Вентилятором 2, установленным в конце зоны охлаждения, отбирают теплоноситель и направляют к вентилятору 3.

За счет создаваемого перепада давлений воздух движется в противотоке с изделиями в сторону зоны обжига и в прямотоке к выгрузочному концу, и таким образом создают давление в конце зоны охлаждения, равным давлению в цехе. Системой отопления 4 в зону обжига подают топливо, при сгорании которого нагреваются изделия до заданной температуры. Дымовые газы отбирают вентилятором 5, который установлен перед зоной подготовки, и выбрасывают в атмосферу.

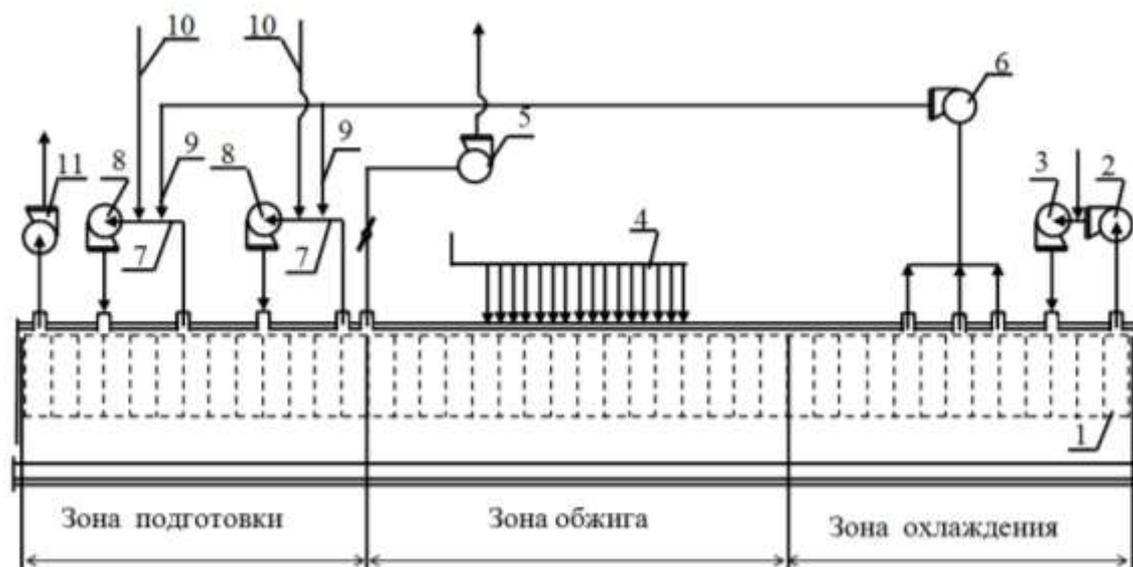


Рисунок 1.8 – Схема туннельной печи обжига керамического кирпича

Для эффективного сжигания природного газа с помощью вентиляторов, установленных в зоне обжига, через каналы в форсунках воздух подается из атмосферы.

В конце зоны подготовки расположен первый блок вентиляционной системы 7. После последнего блока вентиляционной системы теплоноситель отбирают вентилятором 11 и выбрасывают в атмосферу.

Обжигательный канал туннельной печи по длине печи условно разделен на три основные технологические зоны: 1) зона подготовки; 2) зона обжига; 3) зона охлаждения. Схема обжигательного канала туннельной печи представлена на рисунке 1.9.

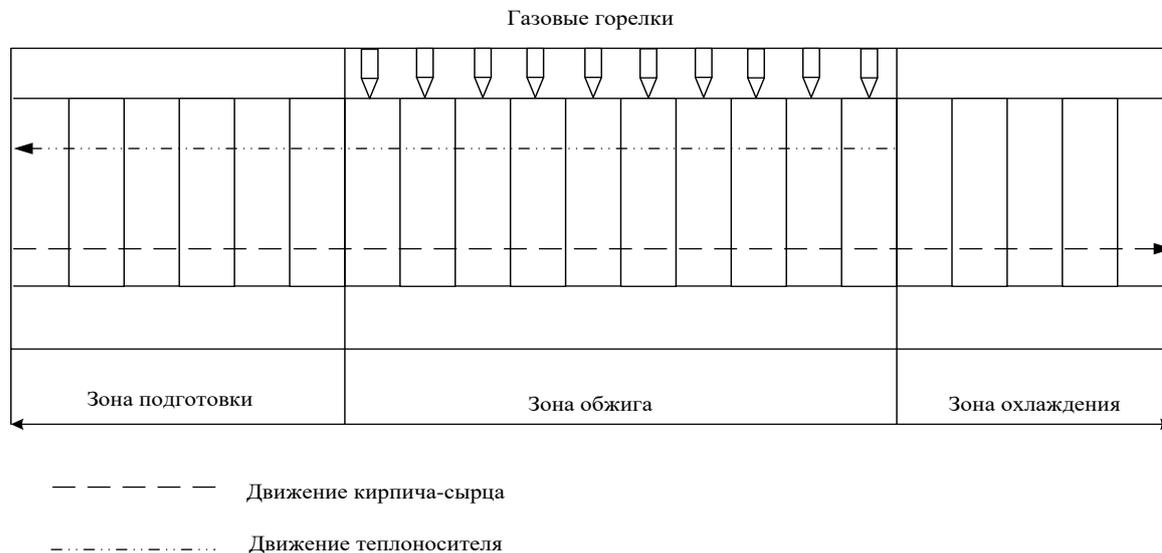


Рисунок 1.9 – Схема обжигательного канала туннельной печи

Туннельная печь работает по принципу противотока и относится к печам с подвижным составом, т.е. обжигаемые керамические кирпичи перемещаются на вагонетках по сквозному туннелю навстречу теплоносителю. Согласно заданному режиму и через определенный промежуток времени вагонетки проталкиваются гидравлическим толкателем.

При каждом проталкивании, вагонетка, пройдя всю длину туннеля, выдается из печи с другого конца. Таким образом, происходит постепенный подогрев, обжиг и охлаждение керамических кирпичей из-за непрерывного перемещения вагонеток в печи.

Отходящими из зоны обжига газами температурой  $600^{\circ}\text{C}$  в зоне подготовки происходит процесс до сушки и подогрев сырца-кирпича. Зона подготовки печи для управления температурным и газовым режимами разделена на три автономно регулируемые секции: а) низкотемпературной рециркуляции, б) высокотемпературной рециркуляции, в) подогрева пода.

Обжигается кирпич в зоне обжига при температуре  $950^{\circ}\text{C}$  -  $1000^{\circ}\text{C}$ . Для выравнивания температуры по всей массе изделий, более полного созревания черепка и прохождения в нем необходимых реакций осуществляется выдержка изделий при максимальной температуре в течение 4-9 часов. В зоне обжига установлены газовые горелки, позволяющие широко маневрировать температурой продуктов горения.

В зоне охлаждения обожженные керамические кирпичи охлаждаются до  $60^{\circ}\text{C}$  –  $80^{\circ}\text{C}$  для утилизации тепла, отбираемого от разогретых изделий, и для дальнейшей выдачи вагонеток из туннельной печи. В этой зоне охлаждается также и футеровка вагонеток, нагретая до высоких температур.

Вентиляторами, расположенными сверху и сбоку, через несколько каналов по длине зоны охлаждения подается холодный воздух, тем самым охлаждаются изделия и футеровка вагонеток. Для охлаждения изделий и пода вагонеток атмосферного воздуха требуется в большом количестве, чем для горения топлива. Избыточный горячий воздух отбирается из зоны охлаждения туннельной печи и используется для рециркуляции в зоне подогрева, а также для сушки кирпича-сырца.

Для охлаждения керамического кирпича по заданному температурному режиму зона охлаждения условно разделена на 4 секции: 1) закала; 2) ускоренного охлаждения; 3) замедленного охлаждения; 4) интенсивного охлаждения.

Таким образом, полный технологический цикл обжига керамического кирпича в туннельной печи состоит из операций загрузки изделий и проталкивания вагонеток с помощью гидравлического толкателя до сушки изделий, обжига при температуре  $950^{\circ}\text{C}$  -  $1000^{\circ}\text{C}$ , выдержки 4-9 ч., охлаждения и выгрузки изделий. Совокупность всех перечисленных операций составляет цикл работы туннельной печи обжига керамического кирпича.

### **1.3 Анализ недостатков работы туннельных печей при обжиге керамического кирпича**

При производстве керамического кирпича в туннельных печах может образовываться брак. Он получается на следующих 3-х этапах:

1. В процессе прессования (когда из глиняной массы формируются прямоугольные кирпичи). Стандартный кирпич имеет размер 250x120x65 мм, но по ГОСТу-530-2012 допускается погрешность: 250±5 мм, 120±4 мм, 65±3 мм [12,13]. Бракованным получается керамический кирпич, если размеры не соответствуют ГОСТ 530-2012. Брак, образующийся на этом этапе производства кирпича, можно оперативно устранять путем возврата бракованных сырцов в глиносмеситель. А брак, полученный на следующих стадиях производства, требует серьезного решения и особого внимания.

2. В процессе подготовки (когда из сырого кирпича удаляют излишнюю влагу). На данном этапе брак возникает из-за повышенной скорости до сушки, что приводит к появлению сушильных трещин и разрушению при конденсации влаги на поверхности кирпича-сырца.

3. В процессе обжига (когда под действием высоких температур глина спекается в керамику).

По нормативам общее количество брака на предприятии по производству керамического кирпича допускается в пределах от 1 до 1,5 % от выпускаемой продукции [14,15]. В качестве объекта исследования в работе выступало ООО «Стерлитамакский кирпичный завод» (г. Стерлитамак, Республика Башкортостан). Проведенный анализ бракованных изделий показал, что на этом предприятии возникают следующие виды брака:

- брак при обжиге – не менее 3 % (от общего количества выпускаемых изделий);
- брак при сушке – не менее 1,5 %;
- потери при дозировании и транспортировке – не менее 1 %.

ООО «Стерлитамакский кирпичный завод» за сутки выпускается 138 тыс.

штук керамических кирпичей, за год 50370 тыс. штук. 3 % брака от общего количества составляет 1511 тыс. штук. Средняя цена одного керамического кирпича стандартных размеров (250x120x65) за 2016 год составила 8 рублей. Поэтому убытки за 2016 год составили порядка 12088 тыс. рублей, что является достаточно серьезной суммой для небольшого предприятия (рисунок 1.10).

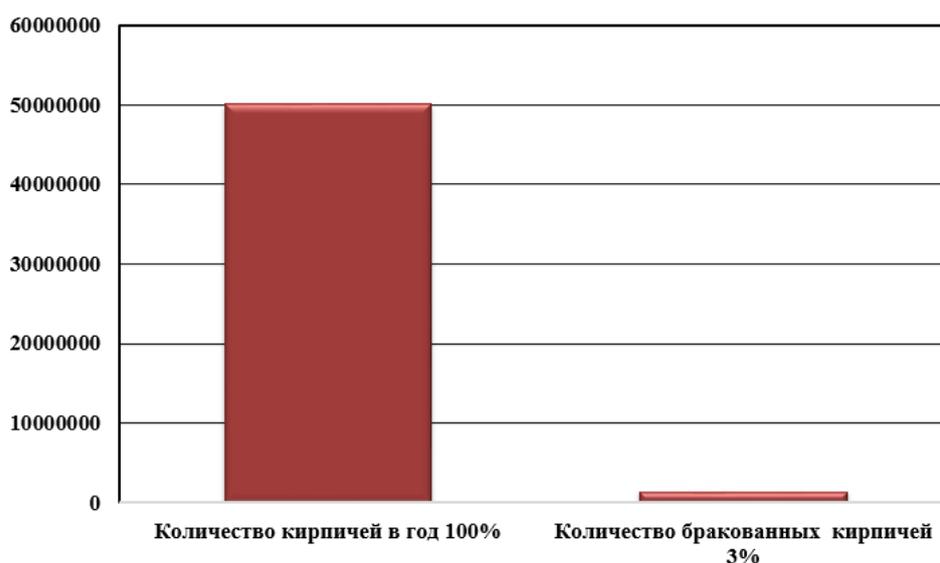


Рисунок 1.10 – Количество выпускаемых кирпичей и полученных браков в процессе обжига за 2016 год

Таким образом, наибольшее количество брака приходится на процесс обжига, и он образуется, в основном, из-за недожога и пережога кирпича (рисунок 1.11).



а)



б)

Рисунок 1.11 – Виды брака кирпича на стадии обжига: а) недожженный; б) пережженный

Недожженный кирпич – керамический кирпич с бледным цветом, с участками прокопченности (рисунок 1.11, а). Получаемый кирпич очень быстро впитывает влагу, недолговечен и имеет низкую морозостойкость. Причиной получения такого брака является недостаточность температуры в процессе обжига.

Пережженный кирпич (перепал) также является браком (рисунок 1.11, б). Такой кирпич имеет очень маленький коэффициент теплопроводности, что не позволяет его применять при строительстве жилых домов и зданий непроизводственного назначения.

Рассмотрим технологический процесс обжига керамического кирпича в туннельной печи и определим причины получения бракованных изделий.

Досушка (нагревание) кирпича-сырца происходит в интервале температур от 0 °С до 150 °С. На рисунке 1.12 показан график технологического процесса производства керамического кирпича в туннельной печи. В туннельную печь загружается кирпич-сырец с влажностью 2 – 6 %. На этом участке досушку производят путем увеличения скорости газового потока при плавном повышении его температуры, тем самым из сырца удаляется остаточная влажность.



Рисунок 1.12 – График технологического процесса производства керамического кирпича в туннельной печи

В интервале температур от 150 °С до 800 °С происходит дегидратация, т.е. удаление химически связанной воды, входящей в состав глинистого вещества и других материалов. Глина теряет пластические свойства и кристаллическая решетка

материала разрушается. Удаление химически связанной воды начинается примерно с температуры 350 °С, а отдача главной массы этой воды – при температуре 450 °С – 500 °С и может продолжаться до температуры 900 °С. В этот период происходят снижение механической прочности и усадка керамических изделий. При изменении температуры от 200 °С до 800 °С выделяется летучая часть органических примесей глины и введенных в состав массы выгорающих добавок, а также окисляются органические примеси в пределах температуры их воспламенения.

В интервале температур от 300 °С до 1000 °С происходит разложение карбонатов (при 300 °С – 400 °С карбонатов железа  $\text{FeCO}_3$ ; 600 °С – 700 °С карбонатов магния  $\text{MgCO}_3$ , 800 °С – 900 °С карбонатов кальция  $\text{CaCO}_3$ ).

В интервале температур 800 - 1000 °С значительно улучшаются физико-механические свойства кирпича (сырца) из-за соединения кремнезема  $\text{SiO}_2$  и глинозема  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в безводный алюмосиликат-муллит. Этот период нагрева связан со значительным структурным изменением материала кирпича (сырца) и разрушением кристаллической решетки глинистых минералов.

Выдержку кирпича (сырца) при максимальной температуре обжига применяют для выравнивания температуры по всей толщине, обеспечивая равномерное распределение жидкой фазы.

Охлаждение кирпича (сырца) после выдержки при максимальной температуре обжига является не менее ответственным периодом, чем нагрев. В начальный период охлаждения при падении температуры на 100 °С – 200 °С керамические материалы претерпевают термическое сжатие и деформируются пластически, подвергаясь незначительным нагрузкам. В этом периоде при быстром охлаждении в кирпиче могут появляться трещины. Поэтому температурный перепад по толщине изделий не должен превышать 25 °С – 30 °С.

Важной задачей в управлении туннельной печью является равномерный прогрев и поддержание температуры во всем ее рабочем пространстве. Температурный режим производства керамического кирпича должен быть плавным, без отклонений.

Проведенный анализ работы туннельной печи показал, что при производстве

керамических кирпичей брак получается за счет неточной настройки системы управления. По нормативным документам допускается 1,5 % брака от общей выпускаемой продукции, однако в реальности количество брака достигает 3 % и более.

#### **1.4 Анализ работы автоматизированных систем управления туннельными печами для обжига керамического кирпича**

Предприятия, которые идут по пути технологического прогресса, обеспечивают более качественные трудовые условия, занимают лидирующие места на рынке и минимизируют потребность в сырье. По этой причине крупные предприятия уже невозможно представить без осуществления проектов по автоматизации – исключения касаются лишь мелких ремесленных производств, где автоматизация производства себя не оправдывает ввиду принципиального выбора в пользу ручного изготовления [16,17,18]. Но и в таких случаях возможно частичное включение автоматизации на некоторых этапах производства. Разнообразие современных методов автоматизации расширяет спектр их применения, при этом затраты, как правило, оправдываются конечным результатом в виде повышения ее качества, а также увеличения объемов изготавливаемой продукции.

В широком смысле автоматизация предполагает создание таких условий на производстве, которые позволят без участия человека выполнять определенные задачи по выпуску и изготовлению продукции. При этом роль оператора может заключаться в решении наиболее ответственных задач. В зависимости от поставленных целей, автоматизация технологических процессов и производств может быть частичной, комплексной или полной. Выбор конкретной модели определяется сложностью технической модернизации предприятия за счет автоматической начинки.

В туннельной печи обжига керамического кирпича регулируются такие параметры, как расход газовой смеси, давление газовой смеси в

газопроводе, давление в зоне обжига, температуры в зоне подготовки и обжига, разрежение дымовых и нагретых газов.

Система автоматизации обычно имеет иерархическую структуру [19,20,21]. Она включает в себя верхний и нижний уровни, а также содержит ряд подсистем:

1) контроля – осуществление контроля значений технологических параметров, контроль технико-экономических показателей, контроль состояния оборудования;

2) анализа – анализ ситуации, принятия решений и подготовка информации для других систем;

3) управления – реализует принятое решение и передает информацию вышестоящим структурам.

На верхнем уровне находится микропроцессорный контроллер. Он решает задачи оптимизации и адаптации (изменение параметров настройки в процессе работы), рассчитывает технико-экономические показатели, к.п.д. работы оборудования.

Реализация нижнего уровня достигается с помощью средств локальной автоматики, которая решает следующие задачи: анализ ситуаций, идентификация, стабилизация режимов работы, контроль, измерение, сигнализация, защита, регулирование.

Анализ применяемых современных систем управления туннельной печью обжига керамического кирпича показал, что большинство предприятий (ООО «Стерлитамакский кирпичный завод», ООО «Давлекановский кирпичный завод», ООО «Бижбулякстрой») используют ПИД-регулирование. Эти регуляторы популярны благодаря простому построению и промышленному использованию, ясности функционирования, низкой стоимости и пригодности для решения большинства практических задач. Среди ПИД-регуляторов 36 % занимают многоконтурные, 64 % - одноконтурные.

Внедрение на ООО «Стерлитамакский кирпичный завод» технических средств, которые позволяют автоматизировать производственные процессы,

является базовым условием эффективной работы. В нем имеются две туннельные печи №1 и №2.

Рассмотрим работу туннельной печи №2 ООО «Стерлитамакский кирпичный завод». Система обжига керамического кирпича организована на базе SCADA/HMI Data Rate (научно-производственная фирма «Круг»). После процесса обжига керамический кирпич приобретает свойства, необходимые для строительных материалов.

Процесс автоматизации производства керамического кирпича на основе SCADA/HMI Data Rate обеспечивает более точное выполнение алгоритмов работы, благодаря программной реализации ПИД-регуляторов в операционной среде программируемых контроллеров на микропроцессорной элементной базе. Типовое решение функций системы представляет собой информационную поддержку принятия решений, единство средств контроля и управления. На рисунке 1.13 представлена мнемосхема туннельной печи обжига керамического кирпича.

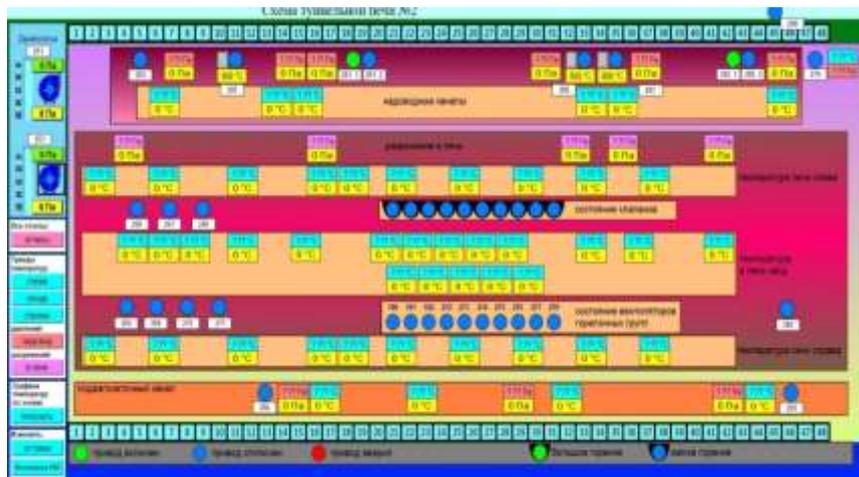


Рисунок 1.13 – Мнемосхема туннельной печи для обжига керамического кирпича с программно реализованными ПИД-регуляторами

Проведенный анализ работы классических ПИД-регуляторов при производстве керамических кирпичей показал, что они работают недостаточно эффективно (бракованных изделий более 3 %) [22, 23, 24]. Связано это с недостатком знаний о динамике протекающих физико-химических процессов, со сложностью технологического процесса обжига, с необходимостью учета

множества неконтролируемых факторов, взаимосвязанностью значительной части выходных параметров, распределенных в пространстве.

Улучшить характеристики ПИД-регуляторов можно с помощью методов нечеткой логики.

Нечеткое управление процессом также целесообразно производить в нелинейных системах, идентификация которых слишком трудоемка.

Основой алгоритма функционирования типовых нечетких регуляторов (ТНР) является нечеткая логика, реализованная в классе нечетких правил типа:

$$\begin{aligned}
 &\text{ЕСЛИ } x_{12}, x_{13}, \dots, x_{1n}, \text{ ТО } u_j; \\
 &\text{ЕСЛИ } x_{22}, x_{23}, \dots, x_{2m}, \text{ ТО } u_2; \\
 &\dots \\
 &\dots \\
 &\dots \\
 &\text{ЕСЛИ } x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mn}, \text{ ТО } u_m
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

где  $u_{ij}$  – вектор управления ( $j=1 \div n$ ;  $i=1 \div m$ );  $x_{ij}$  – значения входов (величина рассогласования между заданным и реальным значением выходной характеристики объекта, скорость изменения этой величины и т.д.);  $m$  – количество правил в продукционной системе ТНР;  $n$  – количество нечетких термов, используемых для интерпретации выходных и входных переменных ТНР.

В зависимости от точности измерения и диапазона изменения, каждая из координат  $u_i$ ,  $x_{ij}$  описывается своим нечетким множеством с соответствующей функцией принадлежности. Структура модели нечетких вычислений представлена на рисунке 1.14.



Рисунок 1.14 – Структура модели нечетких вычислений

Если объект управления достаточно сложен, а для его точного описания существует дефицит априорной информации о поведении системы в целом, то в этом случае эффективнее использовать нечеткие системы управления.

Нечеткое управление процессом реализуется в основном машиной нечетких выводов, использующей специальные нечеткие контроллеры. Функциональная схема машины нечетких выводов представлена на рисунке 1.15.

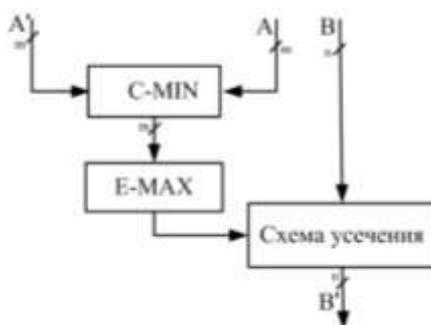


Рисунок 1.15 – Функциональная схема машины нечетких выводов

Эта машина реализует нечеткий вывод типа “Если А, то В”. Блок, реализующий функцию С-MIN, осуществляет пересечение множеств А и А’. Блок, реализующий функцию Е-MAX, выделяет из множества АUA’ элемент с максимальным значением, который осуществляет усечение множества В, превращая его во множество В’.

На рисунке 1.16 представлена структура системы управления туннельной печью обжига керамического кирпича. Регулирование температуры выполняется за счет регулирования частоты вращения вентилятора. При повышении температуры от уставки преобразователь частоты уменьшает частоту на вентиляторах, уменьшается давление на воздуховоде в воздушном коллекторе горелочной группы и, соответственно, через импульсную линию импульс воздействует на регулятор соотношения газ-воздух, тем самым уменьшается давление газа – горение уменьшается. При понижении температуры от уставки преобразователь частоты увеличивает частоту на вентиляторах, увеличивается давление на воздуховоде в воздушном коллекторе горелочной группы и, соответственно, через импульсную линию импульс воздействует на регулятор соотношения газ-воздух, тем самым увеличивается давление газа – горение увеличивается. С помощью нечеткого

регулятора происходит управление частотой вращения вентилятора, который имеет два входа и один выход. На вход регулятора поступает сигнал рассогласования ( $e$ ) между заданным температурным режимом ( $C_3$ ) и действительной массовой долей вещества в узле смешения, а также сигнал скорости изменения рассогласования ( $V_e$ ). На выход из регулятора поступает управляющее воздействие в виде величины аналогового задания тока ( $i$ ) от частотного преобразователя.



ФП – функция принадлежности,  $C_{з.т.}$  – заданный температурный режим,  $i$  – ток задания частоты,  $e$  – ошибка между действительным и заданным режимом,  $V_e$  – скорость изменения ошибки,  $Q_{пг}$  – расход природного газа,  $Q_{в}$  – расход атмосферного воздуха,  $Q_{пг}$  – расход нагретого газа,  $Q_{дг}$  – расход дымовых газов

Рисунок 1.16 – Структура моделируемой системы управления

Важной задачей при управлении туннельной печью является равномерный прогрев, обжиг (выдержка) и плавное охлаждение всего рабочего пространства. В таблице 1.1 показано техническое задание на автоматическое регулирование температуры в туннельной печи №2 ООО «Стерлитамакский кирпичный завод».

Таблица 1.1 – Техническое задание на автоматическое регулирование

№ п/п	Регулируемый параметр	Номинальное значение	Отклонение		Пределы нагрузок	
			Кратковременное	Длительное	Максимум	Минимум
1	Температура в печи	600 °C	±58 °C	±17 °C	100 %	20 %

Продолжение таблицы 1.1

2	Температура в печи	930 °С	$\pm 94$ °С	$\pm 31$ °С	100 %	20 %
3	Температура в печи	980 °С	$\pm 99$ °С	$\pm 33$ °С	100 %	20 %

Регулирование температуры в зоне обжига туннельной печи осуществляется ПИД-регуляторами. В зависимости от температуры ПИД-регулятор выдает необходимый сигнал на частотный преобразователь.

Как известно, корректной областью применения ПИД-регуляторов являются линейные объекты управления [25,26]. Как показывает практика, туннельная печь как объект автоматического управления является существенно нелинейной, а в случае регулирования разрежения газов и температуры в нескольких точках трансформируется в многосвязный.

По причине сложности эксплуатации ПИД-регуляторов возникает часть проблем, а именно: во многих ПИД-контроллерах дифференциальная компонента выключена, так как её в производственных условиях сложно правильно настроить. А недостаточность знаний, динамики регулируемого процесса не позволяет правильно настроить регулятор, поэтому пользователи пренебрегают процедурой калибровки. Основные усилия исследователей в настоящее время сосредоточены на поиске надежных методов автоматической настройки ПИД-регуляторов [27,28]. К тому же до 80 % ПИД-регуляторов в промышленности настроены не оптимально. Неоптимальная настройка ПИД-регуляторов ведет к снижению качества производимой продукции и повышению износа оборудования, повышенному расходу энергии и сырья [26, 27-31]. Кроме того, в многомерных ПИД-регуляторах возникают проблемы синтеза компенсатора взаимного влияния контуров регулирования с необходимой погрешностью и инвариантного-к изменениям параметров регулирования и условий эксплуатации. Теоретически упомянутая проблема решена. Однако на практике до сих пор не удается для многомерного ПИД-регулятора построить компенсатор, устойчиво работающий длительное время и с заданной погрешностью.

Внедрение типового нечеткого регулятора (ТНР) в управлении технологическими процессами сдерживается требующимися существенными инвестициями, а также ограниченной областью их применения, вызванной использованием в операционной среде параметра рассогласования (ошибки). Кроме того, ТНР обладают завышенной продолжительностью цикла сканирования системы продукционных правил и низкой точностью, которая для современных программируемых контроллеров при необходимости изменяется дискретно с большим заданным шагом. Именно поэтому современные ТНР не обеспечивают должного качества регулирования в технологических установках, у которых алгоритм функционирования представлен в словесной форме [30,31,32]. Они не позволяют обеспечить (главным образом, из-за процедуры дефаззификации [26]) необходимую точность поддержания температуры и разряжения в процессе обжига. Построение многомерного нечеткого регулятора на основе ТНР также вызывает определенные затруднения у операторов-программистов.

Многомерные четкие регуляторы с интервальной неопределенностью (МЧРСИН) не имеют такие недостатки [26,30,33,34,35]. Действительно их парадигма (без излишних неопределенностей) в наибольшей мере соответствует автоматизации сложных объектов управления, описанных словесно. МЧРСИН по сравнению с ТНР обладают меньшей погрешностью регулирования и большим быстродействием, что создает хорошую основу для разработки МЧРСИН. Решение задачи по компенсации взаимного влияния контуров регулирования [30,35,36] достаточно просто выполнено с помощью специальных систем продукционных правил. Однако вопрос применения МЧРСИН в системах управления туннельными печами в литературе освещен недостаточно полно. Поэтому в работе даны подробное описание принципа действия и характеристика МЧРСИН, особенности его применения.

Определим основные преимущества и недостатки регуляторов, применяемых в АСУ (таблица 1.2), таких как ПИД-регулятор, ТНР и МЧРСИН. Сравнительный анализ показывает, что МЧРСИН обладают большим быстродействием и меньшей погрешностью регулирования, например, МЧРСИН срабатывает в 5,71 раза быстрее, чем ТНР.

Таблица 1.2 – Сравнительный анализ регуляторов, применяемых при управлении процессом обжига

Критерий	ПИД-регулятор	ТНР	МЧРСИН
Погрешность регулирования	высокая	высокая	низкая
Настройка регулятора	сложная	простая	простая
Быстродействие	малое	малое	большое
Возможность изменения режимов регулирования	отсутствует	имеется	имеется
Запись закона управления	с использованием формулы	совокупность частных правил	специальные системы производственных правил
Универсальность	низкая	низкая	высокая

Таким образом, проведенный анализ показал, что многие системы управления печью работают неэффективно. В основном применяются ПИД-регуляторы, имеющие достаточно большую погрешность. В процессе управления технологическим процессом обжига керамического кирпича в туннельной печи наиболее целесообразно использовать МЧРСИН, который обладает достаточным быстродействием, точностью и позволяет компенсировать взаимное влияние контуров регулирования.

### **1.5 Основные характеристики многомерных четких логических регуляторов**

Областью применения логических регуляторов (ЛР), как разновидности интеллектуального управления, являются объекты практически любой физической природы (технологические процессы и производства, информационные технологии в торговле, в бизнесе и т.п.) [37,38].

В зависимости от термов, используемых для интерпретации входных и выходных переменных, ЛР делятся на четкие и нечеткие. На рисунке 1.17 представлена классификация логических регуляторов.

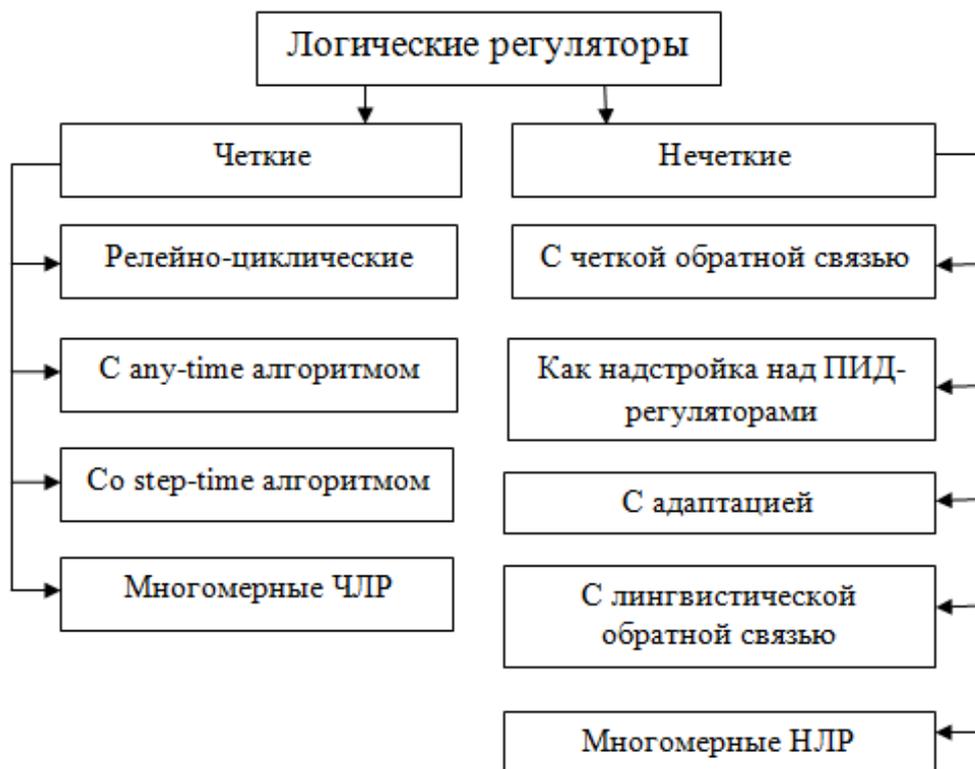


Рисунок 1.17 – Классификация логических регуляторов

В четких ЛР (ЧЛР) переменные изображаются совокупностью четких термов прямоугольной формы (рисунок 1.18), а в нечетких ЛР (НЛР) – совокупностью нечетких термов треугольной, трапецеидальной и колоколообразной формой (рисунок 1.19 а,б,в) [39,40,41,42]. В этом заключается принципиальное отличие ЧЛР от НЛР.

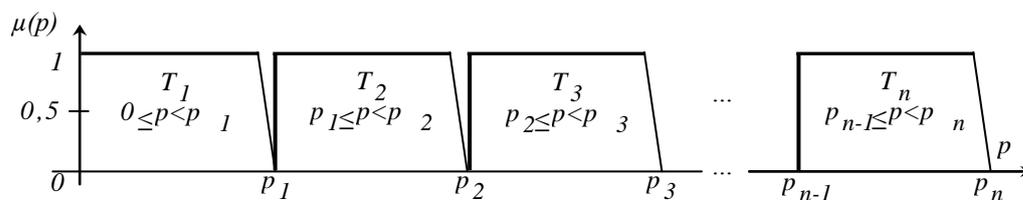


Рисунок 1.18 – Четкие термы на универсальной числовой оси

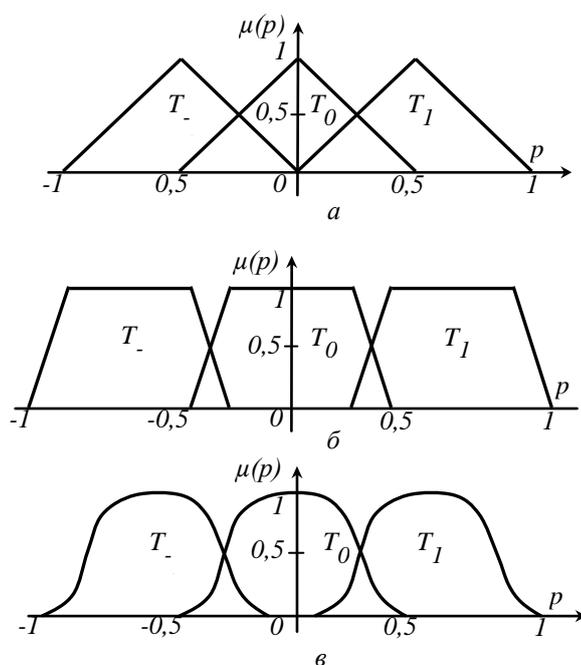


Рисунок 1.19 – Треугольные (а), трапецеидальные (б) и колоколообразные (в) термы, используемые для интерпретации параметров нечетких логических регуляторов

В соответствии с представленной классификацией на рисунке 1.17, ЧЛР по способу организации регулирования технологических параметров подразделяются на релейно-циклические, с any-time алгоритмом минимизации продолжительности сканирования программы, со step-time алгоритмом и многомерные (МЧЛР). В свою очередь НЛР подразделяются на: с четкой обратной связью, как надстройка над ПИД-регулятором; с адаптацией; с лингвистической обратной связью; многомерные [43,44].

Важным концептуальным аспектом является единая логическая природа четких термов, используемых в МЧЛР (они являются аргументами дискретных (выходных и входных) переменных объекта управления и функций двузначной логики). Разработанный МЧЛР принципиально отличается от существующих тем, что в структуре антецедентов продукционных правил включает все перечисленные дискретные переменные и термы. В таких регуляторах в структуре условной части продукционных правил могут присутствовать термы выходных и входных переменных, а также дискретные входные и выходные переменные объекта

управления. Причем взаимосвязь между перечисленными переменными и термами обеспечивается не операциями нечеткой логики, отличающимися громоздкостью и трудоемкостью, а точными и лаконичными операциями И, ИЛИ, НЕ двузначной алгебры логики.

Рассмотрим структурную схему МЧЛР, представленную на рисунке 1.20 [31,32].

На вход фаззификатора (Ф) без использования какого-либо автономного сравнивающего устройства подаются значения текущих значений регулируемых ( $p_1, p_2, \dots, p_n$ ) и задающих ( $z_1, z_2, \dots, z_n$ ) параметров. Фаззификатор имеет два выходных канала:  $V_{cn}$  и  $V_{nn}$ .

В канал  $V_{nn}$  входят термы выходных и входных лингвистических переменных, которые используются в простейших продукционных правилах (содержат только один терм) и поэтому не содержат таких операций алгебры Буля, как И, ИЛИ, НЕ. В качестве примера рассмотрим следующее правило:

$$\text{ПРАВИЛО } i: \text{ ЕСЛИ } v_1 = V_{14}, \text{ то } p_2 = P_{21}, \quad (1.2)$$

где  $V_{14}$  – терм входной переменной  $v_1$  МЧЛР;  $P_{21}$  – терм выходной переменной  $p_2$ .

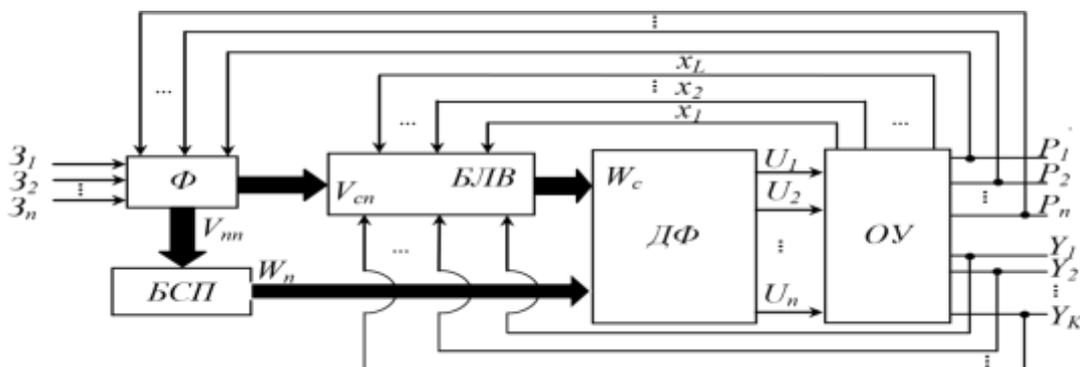


Рисунок 1.20 – Структурная схема МЧЛР

В целях повышения быстродействия МЧЛР простейшие правила обрабатываются совместно с процедурой фаззификации, поскольку процедура фаззификации и реализация условной части таких правил, в случаях, когда в них используется один и тот же терм, алгоритмически идентичны. Вот почему упомянутую процедуру целесообразно выполнить один раз совместно с

фаззификацией, поскольку фаззификация – процедура необходимая и исключить её из процесса логического вывода не представляется возможным. В результате появляется возможность сократить из регулирующей системы продукционных правил МЧЛР все простейшие правила за счет их отработки совместно с процедурой фаззификации.

Процедура совмещения фаззификации и простейших продукционных правил представлена на рисунке 1.21.

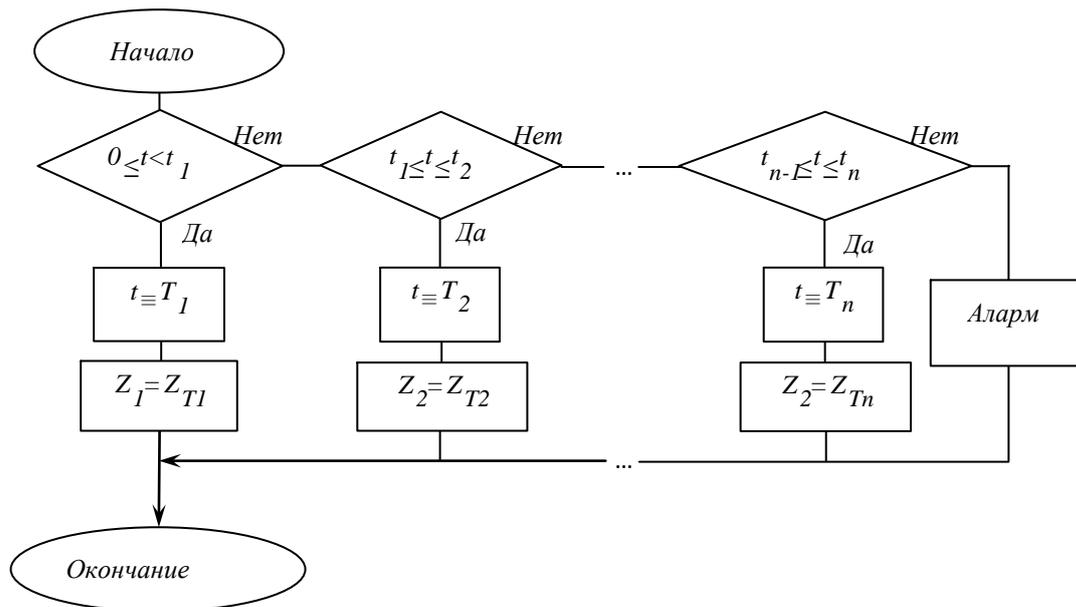


Рисунок 1.21 – Совмещение фаззификации и отработки простейших правил

Из рисунка 1.21 видно, что четкие значения физической величины  $t$  с помощью операторов условного перехода

$$(0 \leq t < t_1), (t_1 \leq t \leq t_2), \dots, (t_{n-1} \leq t \leq t_n) \text{ и присваивания}$$

$$(t \equiv T_1), (t \equiv T_2), \dots, (t \equiv T_{n-1}), (t \equiv T_n) \quad (1.3)$$

преобразуются в термы  $(T_1, T_2, T_3, \dots, T_n)$  – терм-множества  $T$ .

Операторы (1.3) представляют собой условную часть продукционных правил, в которых используется только один терм, то есть по структуре они идентичны условной части продукционных правил типа (1.2). Поэтому для реализации таких правил целесообразно ввести в алгоритм фаззификации после операторов (1.3) символы действия типа:

$$(Z_{i1} = Z_{T1}), (Z_{i2} = Z_{T2}), \dots, (Z_{in} = Z_{Tn}), \quad (1.4)$$

где  $(Z_{T1}, Z_{T2}, \dots, Z_{Tn})$  термы,  $n$  выходных переменных ЧЛР  $(Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$ , которые имеют аналогичное расположение на универсальной числовой оси с термами  $T1, T2, T3, \dots, Tn$  рисунок 1.22.

В структуре МЧЛР на рисунке 1.22 операторы (1.4) реализуются в блоке совмещения присвоения (БСП) с процедурой фаззификации, на выходе которого формируется множество термов выходных переменных  $W_n$ , элементы которого получаются в результате логического вывода по продукционным правилам типа (1.2). Например, результатом логического вывода по правилу (1.2) будет терм  $P_{21}$  выходной логической переменной  $p_2$ , который подается на один из входных каналов дефаззификатора.

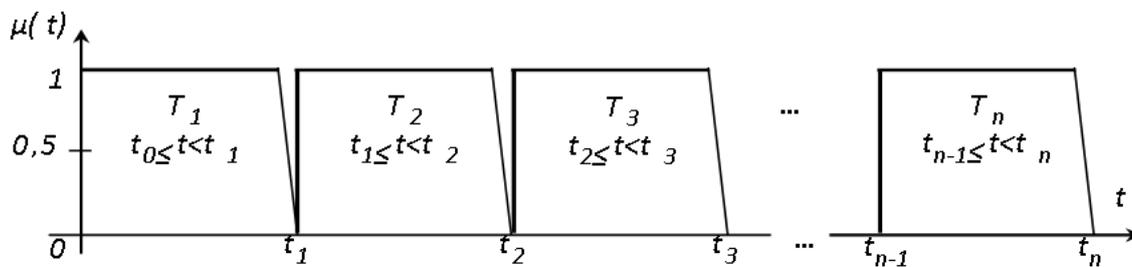


Рисунок 1.22 – Термы входной переменной

Преимущества такого решения очевидны: за счет двойного использования операторов (1.3) (в алгоритме фаззификации и в качестве условной части продукционных правил типа (1.2)) создаются принципиально новые условия для повышения быстродействия МЧЛР.

В канал  $V_{cn}$  входят термы входных и выходных логических переменных, которые используются в продукционных правилах со сложной условной частью.

В таких продукционных правилах с четкими термами антецедент в общем случае представляет собой дизъюнктивную нормальную форму (ДНФ) функции двужначной логики, конъюнкции которой формируются из термов выходных и входных переменных ЧЛР, а также дискретных выходных и входных переменных объектов управления. Более подробно рассмотрим пример:

$$\begin{aligned} \text{ПРАВИЛО\_2i: ЕСЛИ } (v_1 = V_{14}) \& (v_2 = V_{22}) \& X_4 \& Y_5 \& P_{62} \& Z_1 + \\ & + (v_1 = V_{12}) \& (v_3 = V_{32}) \& X_2 \& Y_7 \& P_{83} \& Z_5, \text{ ТО } p_3 = P_{33}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Из правил (1.5) видно, что его консеквент и антецедент реализуют следующую булеву функцию:

$$V_{14} \& V_{22} \& X_4 \& Y_5 \& P_{62} Z_1 + V_{12} \& V_{32} \& X_2 \& Y_7 \& P_{83} \& Z_5 = P_{33}, \quad (1.6)$$

где  $P_8; X_2, X_4$  – четкие термы входных лингвистических переменных,  $V_{14}, V_{22}, V_{12}, V_{32}$  – выходные, четкие термы входных логических переменных  $v_1, v_2, v_3$  соответственно;  $Z_1$  и  $Z_5$  – термы задания первого и пятого контуров регулирования ЧЛР;  $P_{33}, P_{62}$ , и  $P_{83}$ , –  $P_3, P_6$  и а  $Y_5$  и  $Y_7$  – выходные дискретные переменные объекта управления и термы, входящие в канал  $V_{mn}$ , используются также и в канале  $V_{cn}$ .

Антецедент правила (1.5) наряду с термами выходных содержит и термы входных лингвистических переменных, а также – дискретные выходные и входные переменные объекта управления. В этом заключается принципиальное отличие существующих нечетких регуляторов от МЧЛР. Кроме того, выражение (1.6), являясь функцией двузначной логики, упрощает учет взаимного влияния контуров в МЧЛР путем введения в конъюнкции антецедентов продукционных правил в виде литералов четких термов выходных и входных лингвистических переменных.

Особенностью блока логического вывода (БЛВ) предлагаемого регулятора является наличие не одного, а трех входных каналов: термов входных и выходных переменных ( $V_{cn}$ ); дискретных выходных ( $Y_1, Y_2, \dots, Y_k$ ) и входных ( $X_1, X_2, \dots, X_L$ ) переменных объекта управления. Использование блока логического вывода (БЛВ) двух последних видов сигналов стало возможным благодаря тому, что четкие термы по своей логической природе являются аргументами двузначной логики, которые по определению могут принимать только два значения: логического нуля или логической единицы. Поэтому для формирования или задания базы правил с четкими термами необходимо задать не три [45], а пять множеств [46]: правил четких продукций  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$  в форме (1.5); входных  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$  и выходных  $W = \{W_1, W_2, \dots, W_s\}$  переменных; входных  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_L\}$  и выходных  $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_k\}$  дискретных переменных объекта управления. Вот почему база

производственных правил МЧЛР считается заданной, если заданы множества  $V$ ,  $W$ ,  $X$  и  $Y$ .

Кроме того, в МЧЛР для минимизации длительности цикла сканирования обычно используется *any-time* алгоритм [46, 47], позволяющий в режиме реального времени определить достоверное значение частоты срабатывания производственных правил и конъюнкций, входящих в их антецеденты.

Проведенный анализ работы логических регуляторов показал, что использование выходных и входных переменных совокупностью четких термов позволяет существенно снизить время отклика упомянутых регуляторов и погрешность регулирования. Эти положительные стороны МЧЛР открывают хорошую и принципиально новую перспективу для построения компенсаторов взаимного влияния контуров, крайне необходимых для управления многосвязными объектами, являющимися базовыми для критических технологий. Следует отметить, что проблема синтеза, и особенно реализации компенсаторов, в полной мере не решена не только для многомерных типовых нечетких, но и для классических ПИД-регуляторов [48].

## **2 Математическое описание туннельной печи как объекта автоматического управления**

В настоящее время, в связи с растущим спросом на строительные материалы, предъявляются повышенные требования к качеству керамического кирпича. Основные проблемы при производстве керамического кирпича связаны с процессом его обжига. Поэтому с целью снижения потерь и уменьшения количества брака при производстве необходимо разработать математические модели процесса обжига.

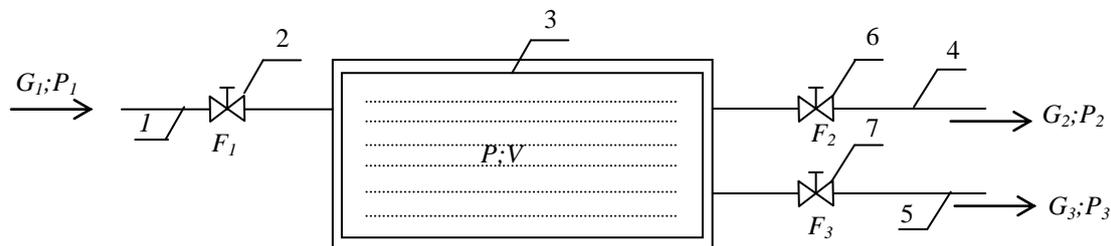
Основными автоматизированными системами управления туннельной печью являются системы регулирования давления газовой смеси (ГВС), регулирования разрежения дымовых (ДГ) и нагретых газов (НГ), регулирования температуры. Туннельная печь как объект АУ является сложным объектом, динамические свойства которого описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений. Существующие методы математического описания процесса обжига керамического кирпича в туннельной печи являются неполными потому, что до сих пор остаются недостаточно разработанными вопросы, связанные с взаимовлиянием технологических параметров на характеристики туннельной печи как объекта АУ.

### **2.1 Математическое описание процесса обжига в туннельной печи как объекта автоматического управления по давлению газовой смеси с учетом расходов газовой смеси, дымовых и нагретых газов**

Математическое описание туннельной печи рассматривается применительно к системе автоматического регулирования давления в туннельной печи в процессе обжига. На первом этапе рассматривается математическое описание туннельной печи как объекта АУ по давлению ГВС с учетом расходов ГВС, а далее производится математическое описание туннельной печи как объекта АУ по давлению ГВС с учетом разрежения ДГ и НГ.

На рисунке 2.1 представлена общая схема туннельной печи как объекта АУ.

На ее вход по трубопроводу 1 поступает обогащенная ГВС под определенным давлением. На выходе формируются ДГ (трубопровод 4), которые отводятся вентиляторами в атмосферу, и НГ (трубопровод 5), используемые в дальнейшем в зоне подготовки.



1 – трубопровод подвода ГВС; 2,6,7 – регулирующие вентили; 3 – туннельная печь; 4 – трубопровод отвода ДГ; 5 – трубопровод отвода НГ

Рисунок 2.1 – Схема туннельной печи обжига керамического кирпича как объекта АУ по давлению ГВС

Проходящая через регулирующий вентиль ГВС может двигаться с докритической или сверхкритической (дозвуковой или сверхзвуковой) скоростью, которая описывается коэффициентом  $\beta$ . Для двухатомных газов коэффициент адиабаты  $k = 1.4$ , тогда коэффициент  $\beta$  можно определить по следующей формуле [50]:

$$\beta = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,528.$$

Используя значение коэффициента  $\beta$ , определим критическое давление:

$$P_{кр} = \beta P,$$

где  $P$  – давление ГВС в туннельной печи до регулирующего вентиля 6, Па;

$P_{кр}$  – критическое давление после регулирующего вентиля 6, установленного на трубопроводе, отводящем ДГ из печи, Па.

Если изменение разряжения ДГ в трубопроводе 4 после регулирующего вентиля находится в пределах  $0 < P < P_{кр}$ , то можно считать скорость течения ДГ докритической.

В исследуемых туннельных печах рабочее давление не превышает 4кПа, то критическое давление  $P_{кр} = 0,528 \cdot 4 = 2,11$ кПа.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что течение ДГ через регулирующий ventиль происходит с докритической или сверхкритической скоростью, которая зависит от разряжения после регулирующего ventиля. Так как после регулирующего ventиля отсутствует устройство подъема давления ДГ для его перемещения, а течение ДГ в трубопроводе после регулирующего ventиля зависит от давления ГВС в туннельной печи, поэтому потери давления на регулирующем ventиле будут минимальными. Из этого следует, что течение ДГ через ventиль можно принять докритическим.

На основании изложенного, сформулирована научная задача: разработка математического описания процесса обжига с учетом давления, расхода и температуры в различных точках туннельной печи и целевой функции:

$$Q = \varphi(P, G_1, G_2, G_3, T, \tau) \rightarrow \min, \quad (2.1)$$

при  $P(\tau) \leq P_{зад}(\tau)$ ,  $G_{\min}(\tau) \leq G_{тек}(\tau) \leq G_{\max}(\tau)$ ,  $T(\tau) \leq T_{зад}(\tau)$ ,

где  $P$  – давление ГВС в туннельной печи, Па;

$G_1$  – расход ГВС, поступающей в туннельную печь, м<sup>3</sup>/ч;

$G_2, G_3$  – расходы ДГ и НГ, выходящих из туннельной печи, м<sup>3</sup>/ч;

$T$  – температура ГВС в туннельной печи, °С.

$\tau$  – текущее время обжига, с.

Состояние ГВС, находящейся в туннельной печи, можно описать уравнением состояния [51,52,53]:

$$PV_2 = mRT, \quad (2.2)$$

где  $P$  – давление газа в туннельной печи, Па;

$V_2$  – объем газового пространства в туннельной печи, м<sup>3</sup>;

$m$  – масса ГВС в печи, кг;

$R$  – газовая постоянная, м<sup>2</sup>с<sup>-2</sup>К<sup>-1</sup>;

$T$  – абсолютная температура газа, К.

На основании принятых допущений для туннельной печи в уравнении (2.2) переменными величинами являются давление  $P$ , объем  $V$  и масса  $m$ . Поэтому, дифференцируя уравнение (2.2) по времени  $t$ , получим:

$$P \frac{dV_2}{dt} + V_2 \frac{dP}{dt} = \frac{dm}{dt} RT \quad (2.3)$$

или

$$\frac{P}{RT} \frac{dV_2}{dt} + \frac{V_2}{RT} \frac{dP}{dt} = \frac{dm}{dt} \cdot \quad (2.4)$$

Дифференциальное уравнение процесса обжига в туннельной печи (2.4) можно представить в следующем виде:

$$\frac{P}{RT} \frac{dV_2}{dt} + \frac{V_2}{RT} \frac{dP}{dt} = G_1(t) - G_2(t) - G_3(t), \quad (2.5)$$

где  $G_1(t)$  – расход ГВС, поступающей в туннельную печь, м<sup>3</sup>/ч;

$G_2(t)$  – расход ДГ, выходящих из туннельной печи, м<sup>3</sup>/ч;

$G_3(t)$  – расход НГ, выходящих из туннельной печи, м<sup>3</sup>/ч.

Определим массовый расход ГВС через регулирующий вентиль 2,  $G_1$ , м<sup>3</sup>/ч для докритического истечения по следующей формуле [53]:

$$G_1 = \mu_1 F_1 k_a \sqrt{\frac{P_1(P_1 - P)}{RT}}, \quad (2.6)$$

где  $\mu_1$  – коэффициент расхода для регулирующего вентиля, установленного на трубопроводе подачи ГВС в туннельную печь;

$F_1$  – площадь проходного сечения регулирующего вентиля расхода ГВС, м<sup>2</sup>;

$k_a$  – коэффициент, определяется по формуле:

$$k_a = \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, \quad (2.7)$$

где  $k$  – коэффициент адиабаты;

$P_1, P$  – давление ГВС соответственно перед регулирующим вентилем 3 и в туннельной печи, Па.

Массовые расходы ДГ и НГ  $G_2$  и  $G_3$ , м<sup>3</sup>/ч, через регулирующие вентили 6 и 7, для докритического истечения определяются по формулам:

$$G_2 = \mu_2 F_2 k_a \sqrt{\frac{P(P-P_2)}{RT}}; G_3 = \mu_3 F_3 k_a \sqrt{\frac{P(P-P_3)}{RT}}, \quad (2.8)$$

где  $\mu_2, \mu_3$  – коэффициенты расхода соответственно ДГ и НГ для регулирующих вентилей 6 и 7;

$F_2, F_3$  – площадь проходного сечения соответственно регулирующих вентилей отвода из туннельной печи ДГ и НГ, м<sup>2</sup>;

$P, P_2, P_3$  – давление соответственно ГВС в туннельной печи, ДГ и НГ в трубопроводах после регулирующих вентилей 2, 6 и 7, Па.

После подстановки соотношений (2.6) и (2.7) в уравнение (2.5) получим:

$$\frac{V_e}{RT} \frac{dP}{dt} = \mu_1 F_1 k_a \sqrt{\frac{P_1(P_1-P)}{RT}} - \mu_2 F_2 k_a \sqrt{\frac{P(P-P_2)}{RT}} - \mu_3 F_3 k_a \sqrt{\frac{P(P-P_3)}{RT}}. \quad (2.9)$$

Соотношение (2.9) является нелинейным уравнением, которое необходимо линеаризовать. Переменными величинами в уравнении (2.9) являются  $F_1, F_2, F_3, P_1, P, P_2, P_3$ .

Установившиеся значения этих переменных величин обозначим:

$$F_1 \rightarrow F_{10}; F_2 \rightarrow F_{20}; F_3 \rightarrow F_{30}; P_1 \rightarrow P_{10}; \\ P \rightarrow P_0; P_2 \rightarrow P_{20}; P_3 \rightarrow P_{30}. \quad (2.10)$$

Координаты переменных величин, выраженные через приращения и установившиеся значения, имеют вид:

$$F_1 = F_{10} + \Delta F_1; F_2 = F_{20} + \Delta F_2; F_3 = F_{30} + \Delta F_3; \\ P_1 = P_{10} + \Delta P_1; P = P_0 + \Delta P; P_2 = P_{20} + \Delta P_2; P_3 = P_{30} + \Delta P_3. \quad (2.11)$$

Для линеаризации уравнения (2.9) разложим его (правую часть) в ряд Тейлора по переменным согласно уравнению (2.11), пренебрегая производными выше первого порядка и величинами второго порядка малости, по следующему соотношению:

$$M(F_1, F_2, F_3, P_1, P, P_2, P_3)_0 + \left(\frac{\partial M}{\partial F_1}\right)_0 \Delta F_1 + \left(\frac{\partial M}{\partial F_2}\right)_0 \Delta F_2 + \left(\frac{\partial M}{\partial F_3}\right)_0 \Delta F_3 +$$

$$+ \left( \frac{\partial M}{\partial P_1} \right)_0 \Delta P_1 + \left( \frac{\partial M}{\partial P} \right)_0 \Delta P + \left( \frac{\partial M}{\partial P_2} \right)_0 \Delta P_2 + \left( \frac{\partial M}{\partial P_3} \right)_0 \Delta P_3.$$

Выполняя действия согласно этому соотношению для уравнения (2.9) получим:

$$\begin{aligned} \frac{V_2}{RT} \frac{dP}{dt} = & \left( \mu_1 F_1 k_a \sqrt{\frac{P_1(P_1 - P)}{RT}} - \mu_2 F_2 k_a \sqrt{\frac{P(P - P_2)}{RT}} - \mu_3 F_3 k_a \sqrt{\frac{P(P - P_3)}{RT}} \right)_0 + \\ & + \left( \frac{\partial \left[ \mu_1 F_1 k_a \sqrt{\frac{P_1(P_1 - P)}{RT}} \right]}{\partial F_1} \right)_0 \Delta F_1 - \left( \frac{\partial \left[ \mu_2 F_2 k_a \sqrt{\frac{P(P - P_2)}{RT}} \right]}{\partial F_2} \right)_0 \Delta F_2 - \left( \frac{\partial \left[ \mu_3 F_3 k_a \sqrt{\frac{P(P - P_3)}{RT}} \right]}{\partial F_3} \right)_0 \Delta F_3 + \\ & + \left( \frac{\partial \left[ \mu_1 F_1 k_a \sqrt{\frac{P_1(P_1 - P)}{RT}} \right]}{\partial P_1} \right)_0 \Delta P_1 + \left( \frac{\partial \left[ \mu_1 F_1 k_a \sqrt{\frac{P_1(P_1 - P)}{RT}} \right]}{\partial P} \right)_0 \Delta P - \left( \frac{\partial \left[ \mu_2 F_2 k_a \sqrt{\frac{P(P - P_2)}{RT}} \right]}{\partial P} \right)_0 \Delta P - \\ & - \left( \frac{\partial \left[ \mu_3 F_3 k_a \sqrt{\frac{P(P - P_3)}{RT}} \right]}{\partial P} \right)_0 \Delta P - \left( \frac{\partial \left[ \mu_2 F_2 k_a \sqrt{\frac{P(P - P_2)}{RT}} \right]}{\partial P_2} \right)_0 \Delta P_2 - \left( \frac{\partial \left[ \mu_3 F_3 k_a \sqrt{\frac{P(P - P_3)}{RT}} \right]}{\partial P_3} \right)_0 \Delta P_3. \end{aligned}$$

Продолжим преобразование этого соотношения:

$$\begin{aligned} \frac{V_2}{RT} \frac{dP}{dt} = & \mu_1 F_{10} k_a \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} - \mu_2 F_{20} k_a \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}} - \mu_3 F_{30} k_a \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{30})}{RT}} + \\ & + \mu_1 k_a \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} \Delta F_1 - \mu_2 k_a \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}} \Delta F_2 - \mu_3 k_a \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{30})}{RT}} \Delta F_3 + \\ & + \frac{\mu_1 F_{10} k_a \left( -\frac{P_{10}}{RT} \right)}{2 \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}}} \Delta P_1 - \frac{\mu_1 F_{10} k_a P_{10} (P_{10} - P_0)}{2 \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} RT} \Delta P - \frac{\mu_2 F_{20} k_a P_0 (P_0 - P_{20})}{2 \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}} RT} \Delta P - \frac{\mu_3 F_{30} k_a P_0 (P_0 - P_{30})}{2 \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{30})}{RT}} RT} \Delta P - \\ & - \frac{\mu_2 F_{20} k_a \left( -\frac{P_0}{RT} \right)}{2 \sqrt{\frac{P_0^2 - P_0 P_{20}}{RT}}} \Delta P_2 - \frac{\mu_3 F_{30} k_a \left( -\frac{P_0}{RT} \right)}{2 \sqrt{\frac{P_0^2 - P_0 P_{30}}{RT}}} \Delta P_3. \end{aligned} \tag{2.12}$$

В случае установившегося режима течения ГВС в туннельную печь и выхода из печи ДГ и НГ уравнение (2.9) при значении соотношений (2.10) принимает вид:

$$\frac{V_z}{RT} \frac{dP_0}{dt} = \mu_1 F_{10} k_a \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} - \mu_2 F_{20} k_a \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}} - \mu_3 F_{30} k_a \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{30})}{RT}} = 0. \quad (2.13)$$

Соотношение (2.13) приравняем к нулю, так как  $dP_0/dt$  равно нулю как производная от постоянной величины  $P_0$ .

Используя соотношение (2.13), можно определить установившийся расход ГВС через туннельную печь, а именно:

$$G_0 = \mu_1 F_{10} k_a \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} = \mu_2 F_{20} k_a \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}} + \mu_3 F_{30} k_a \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{30})}{RT}}. \quad (2.14)$$

Если из уравнения (2.12) вычесть соответствующие части уравнения (2.13), затем разделить обе части полученного соотношения на установившийся расход  $G_0$  с учетом его значения по формуле (2.14), получим:

$$\begin{aligned} \frac{V_z}{G_0 RT} \frac{dP}{dt} = & \frac{\Delta F_1}{F_{10}} - \frac{\mu_2 k_a}{G_0} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}} \Delta F_2 - \frac{\mu_3 k_a}{G_0} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{30})}{RT}} \Delta F_3 + \\ & + \frac{\mu_1 F_{10} k_a P_{10}}{2G_0 \sqrt{RT P_{10}(P_{10} - P_0)}} \Delta P_1 - \left( \frac{\mu_1 F_{10} k_a P_{10} (P_{10} - P_0)}{2G_0 \sqrt{RT P_{10}(P_{10} - P_0)}} + \frac{\mu_2 F_{20} k_a P_0 (P_0 - P_{20})}{2G_0 \sqrt{RT P_0(P_0 - P_{20})}} + \right. \\ & \left. + \frac{\mu_3 F_{30} k_a P_0 (P_0 - P_{30})}{2G_0 \sqrt{RT P_0(P_0 - P_{30})}} \right) \Delta P + \frac{\mu_2 F_{20} k_a P_0}{2G_0 \sqrt{RT P_0(P_0 - P_{20})}} \Delta P_2 + \frac{\mu_3 F_{30} k_a P_0}{2G_0 \sqrt{RT P_0(P_0 - P_{30})}} \Delta P_3. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Подставим в уравнение (2.15) относительные величины:

$$\frac{\Delta F_1}{F_{10}}; \frac{\Delta F_2}{F_{20}}; \frac{\Delta F_3}{F_{30}}; \frac{\Delta P_1}{P_{10}}; \frac{\Delta P}{P_0}; \frac{\Delta P_2}{P_{20}}; \frac{\Delta P_3}{P_{30}}.$$

Выражение  $\frac{V_z}{G_0 RT} \frac{dP}{dt}$  преобразуем следующим образом:

$$\frac{V_z}{G_0 RT} \frac{dP}{dt} = \frac{V_z}{G_0 RT} \frac{d(\Delta P)}{dt} = \frac{V_z}{G_0 RT} \frac{d\left(\Delta P \frac{P_0}{P_0}\right)}{dt} = \frac{V_z P_0}{G_0 RT} \frac{d\left(\frac{\Delta P}{P_0}\right)}{dt},$$

Уравнение (2.15) принимает следующий вид:

$$\frac{V_z P_0}{G_0 RT} \frac{d\left(\frac{\Delta P}{P_0}\right)}{dt} = \frac{\Delta F_1}{F_{10}} - \frac{\mu_2 F_{20} k_a}{G_0} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}} \frac{\Delta F_2}{F_{20}} - \frac{\mu_3 F_{30} k_a}{G_0} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{30})}{RT}} \frac{\Delta F_3}{F_{30}} +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\mu_1 F_{10} k_a P_{10}^2}{2G_0 \sqrt{RTP_{10}(P_{10} - P_0)}} \frac{\Delta P_1}{P_{10}} - \left( \frac{\mu_1 F_{10} k_a P_{10} (P_{10} - P_0)}{2G_0 \sqrt{RTP_{10}(P_{10} - P_0)}} + \frac{\mu_2 F_{20} k_a P_0 (P_0 - P_{20})}{2G_0 \sqrt{RTP_0(P_0 - P_{20})}} + \frac{\mu_3 F_{30} k_a P_0 (P_0 - P_{30})}{2G_0 \sqrt{RTP_0(P_0 - P_{30})}} \right) \frac{\Delta P}{P_0} + \\
& + \frac{\mu_2 F_{20} k_a P_0 P_{20}}{2G_0 \sqrt{RTP_0(P_0 - P_{20})}} \frac{\Delta P_2}{P_{20}} + \frac{\mu_3 F_{30} k_a P_0 P_{30}}{2G_0 \sqrt{RTP_0(P_0 - P_{30})}} \frac{\Delta P_3}{P_{30}}. \tag{2.16}
\end{aligned}$$

Введем следующие обозначения [54, 55]:

$$\begin{aligned}
\frac{V_c P_0}{G_0 RT} &= T_a; \quad \frac{\Delta F_1}{F_{10}} = m(t); \quad \frac{\Delta P}{P_0} = y(t); \quad \frac{\Delta F_2}{F_{20}} = b(t); \quad \frac{\Delta F_3}{F_{30}} = a(t); \\
\frac{\Delta P_1}{P_{10}} &= d(t); \quad \frac{\Delta P_2}{P_{20}} = \beta(t); \quad \frac{\Delta P_3}{P_{30}} = c(t); \\
\frac{\mu_1 F_{10} k_a P_{10} (P_{10} - P_0)}{2G_0 \sqrt{RTP_{10}(P_{10} - P_0)}} + \frac{\mu_2 F_{20} k_a P_0 (P_0 - P_{20})}{2G_0 \sqrt{RTP_0(P_0 - P_{20})}} + \frac{\mu_3 F_{30} k_a P_0 (P_0 - P_0 P_{30})}{2G_0 \sqrt{RTP_0(P_0 - P_0 P_{30})}} &= k_1; \\
\frac{\mu_2 F_{20} k_a}{G_0} \sqrt{\frac{P_0 (P_0 - P_0 P_{20})}{RT}} &= k_2; \quad \frac{\mu_3 F_{30} k_a}{G_0} \sqrt{\frac{P_0 (P_0 - P_0 P_{30})}{RT}} = k_3; \\
\frac{\mu_1 F_{10} k_a P_{10}^2}{2G_0 \sqrt{RTP_{10}(P_{10} - P_0)}} &= k_4; \quad \frac{\mu_2 F_{20} k_a P_0 P_{20}}{2G_0 \sqrt{RTP_0(P_0 - P_{20})}} = k_5; \quad \frac{\mu_3 F_{30} k_a P_0 P_{30}}{2G_0 \sqrt{RTP_0(P_0 - P_{30})}} = k_6. \tag{2.17}
\end{aligned}$$

С учетом соотношений (2.17) уравнение (2.16) принимает вид:

$$T_a \frac{dy(t)}{dt} + k_1 y(t) = m(t) - k_2 b(t) - k_3 a(t) + k_4 d(t) + k_5 \beta(t) + k_6 c(t). \tag{2.18}$$

В соотношении (2.18)  $T_a$  – постоянные времени,  $k_1 - k_6$  – безразмерные коэффициенты.

После преобразования по Лапласу уравнения (2.18) получим:

$$T_a s y(s) + k_1 y(s) = m(s) - k_2 b(s) - k_3 a(s) + k_4 d(s) + k_5 \beta(s) + k_6 c(s). \tag{2.19}$$

где  $s$ -оператор Лапласа.

На рисунке 2.2 представлена структурная схема туннельной печи обжига керамического кирпича как объекта АУ по давлению ГВС с учетом расходов ГВС, ДГ и НГ, составленная по уравнению (2.19).

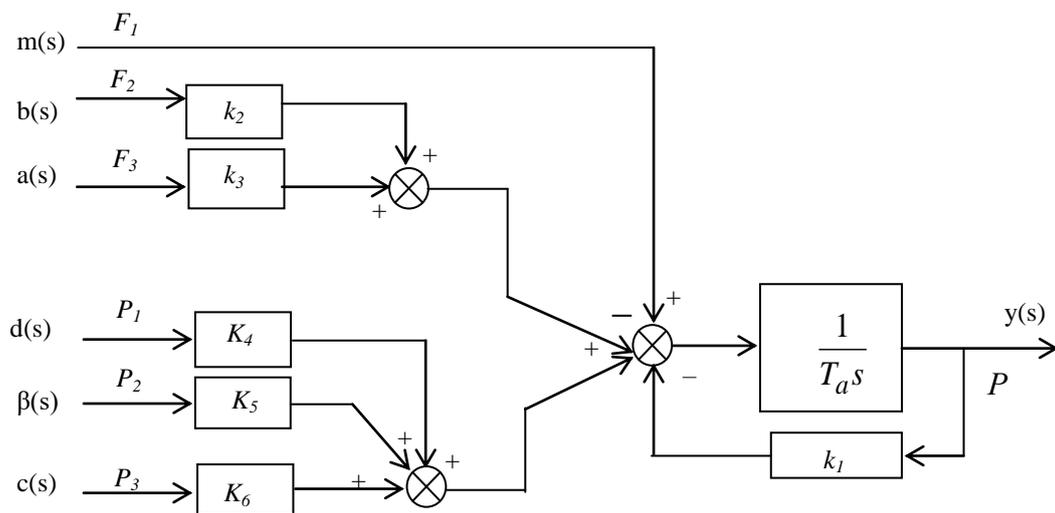


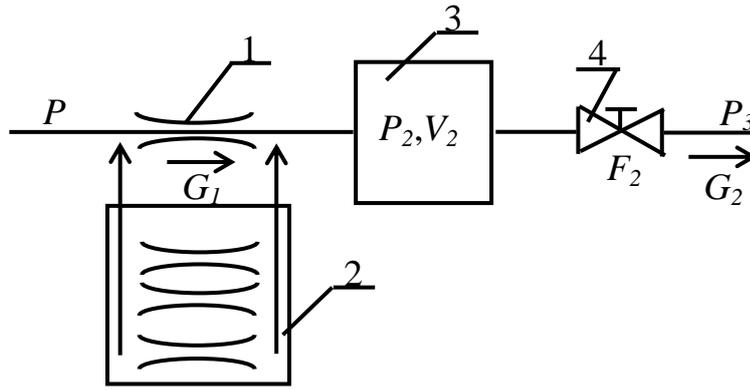
Рисунок 2.2 – Структурная схема туннельной печи обжига керамического кирпича как объекта АУ по давлению ГВС с учетом расходов ГВС, ДГ и НГ

Таким образом, разработано математическое описание процесса обжига в туннельной печи как объекта автоматического управления по давлению ГВС с учетом расходов ГВС, ДГ и НГ.

## 2.2 Математическое описание процесса обжига в туннельной печи как объект автоматического управления по разрежению дымовых газов

Рассмотрим частный случай математического описания процесса обжига в туннельной печи как объект автоматического управления по разрежению ДГ. В этом случае в туннельную печь будет поступать ГВС и уходить из нее только ДГ. Для этого составим схему модели туннельной печи [56,57,58].

На рисунке 2.3 приведена схема модели туннельной печи по разрежению ДГ, которая состоит из пневматического сопротивления 1, эквивалентного сопротивлениям 2, расположенного на входе ГВС в туннельную печь, емкости 3 (зон подготовки и обжига в туннельной печи) и регулирующего вентиля 4, расположенного на выходе ДГ из туннельной печи. Пневматическими сопротивлениями 2 моделируются форсунки, через которые подается ГВС на горение в отопительную систему 3.



1 – сужающее устройство; 2 – пневматические сопротивления; 3 – туннельная печь; 4 – регулирующий вентиль

Рисунок 2.3 – Схема модели туннельной печи по разрежению ДГ

Динамику устройства, состоящего из емкости, пневматического сопротивления и регулирующего вентиля, представим в следующем виде:

$$V_2 \frac{d\rho}{dt} = G_1 - G_2, \quad (2.20)$$

где  $V_2$  – объем образующихся ДГ в емкости 3 (зонах подготовки и обжига туннельной печи,  $\text{м}^3$ );

$\rho$  – плотность ДГ в емкости 3,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $t$  – время, с;

$G_1$  и  $G_2$  – массовый расход ГВС в емкость 3 и разряжение ДГ из этой емкости,  $\text{кг}/\text{с}$ .

Для газовых сред известно [58] уравнение  $P/\rho = RT$ . Если взять производные в этом уравнении по давлению и плотности среды, тогда  $dP_2 = RTd\rho$  или  $dP_2/dt = RTd\rho/dt$ . Подставив это выражение в уравнение (2.20), получим:

$$\frac{V_2}{RT} \frac{dP_2}{dt} = G_1 - G_2. \quad (2.21)$$

Скорость движения ДГ из туннельной печи через вентиль 4 принимаем докритической. При докритическом течении газа массовый расход через регулирующий вентиль  $G_2$  определяется по формуле:

$$G_2 = \mu_2 F_2 k_a \sqrt{\frac{P_2(P_2 - P_3)}{RT}}, \quad (2.22)$$

где  $\mu_2$  – коэффициент, характеризующий расход ДГ через регулирующий вентиль;

$F_2$  – площадь сечения регулирующего вентиля, через которое проходят ДГ, м<sup>2</sup>;

$k_a$  – коэффициент, определяемый по коэффициенту адиабаты ДГ [59];

$P_2, P_3$  – давление поступающей ГВС в емкость 3 и разряжение ДГ после регулирующего вентиля 4, кПа.

Для определения расхода ГВС через одно из пневматических сопротивлений 1 (форсунку для прохождения ГВС) используем формулу для определения объемного расхода через щели [60,61,62], которая применительно к обозначениям на рисунке 2.3 принимает вид:

$$Q_\phi = \phi \frac{\pi d_\phi^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho_2} (P - P_2)},$$

где  $Q_\phi$  – объемный расход ГВС через одно пневматическое сопротивление 2, м<sup>3</sup>/с;

$d_\phi$  – диаметр пневматического сопротивления, м;

$P$  и  $P_2$  – давление ГВС до и после пневматического сопротивления 1, кПа;

$\rho_2$  – плотность ГВС, протекающих через пневматическое сопротивление, кг/м<sup>3</sup>;

$\phi$  – коэффициент расхода ГВС через пневматическое сопротивление (принимается  $\phi = 0,75$ ).

Массовый расход ГВС через одну форсунку  $G_\phi$ , кг/с, определяется выражением  $G_\phi = Q_\phi \cdot \rho_2$ , тогда

$$G_\phi = \phi \frac{\pi d_\phi^2}{4} \sqrt{2\rho_2 \cdot (P - P_2)}.$$

Так как ГВС проходят через несколько параллельных форсунок  $n$  (параллельно соединенных дросселей 2), тогда расход ГВС  $G_1$ , м<sup>3</sup>/с:

$$G_1 = n \cdot \phi \frac{\pi d_\phi^2}{4} \sqrt{2\rho_2 \cdot (P - P_2)}$$

$$\text{или } G_1 = \phi \cdot F_2 \cdot \sqrt{2\rho_2 \cdot (P - P_2)}, \quad (2.23)$$

где  $F_2 = n \cdot \pi d_{\phi}^2 / 4$  – площадь проходного сечения обобщенного пневматического сопротивления всех параллельно расположенных форсунок, через которые проходит ГВС.

Подставив соотношения (2.19) и (2.22) в уравнение (2.18), получим:

$$\frac{V_2}{RT} \frac{dP_2}{dt} = \phi \cdot F_1 \cdot \sqrt{2\rho_2 \cdot (P - P_2)} - \mu_2 F_2 k_a \sqrt{\frac{P_2(P_2 - P_3)}{RT}}. \quad (2.24)$$

Таким образом, разработано математическое описание туннельной печи как объекта АУ по разрежению ДГ. Следующим этапом является составление дифференциального уравнения.

Составляем дифференциальное уравнение, для того чтобы установить взаимосвязь между массовым расходом и давлением ГВС, поступающих на горение, разрежением ДГ, выходящих через регулирующий орган из туннельной печи.

Уравнение (2.24) является нелинейным и его необходимо линеаризовать. Принимая в качестве переменных величин в уравнении (2.24)  $F_1, F_2, P, P_2$  и  $P_3$ , установившиеся значения этих переменных величин принимают вид:

$$F_1 \rightarrow F_{10}; F_2 \rightarrow F_{20}; P_2 \rightarrow P_{20}; P \rightarrow P_0; P_3 \rightarrow P_{30}. \quad (2.25)$$

Переменные величины, выраженные через установившиеся значения и приращения, имеют вид:

$$F_1 = F_{10} + \Delta F_1; F_2 = F_{20} + \Delta F_2; P = P_0 + \Delta P; P_2 = P_{20} + \Delta P_2; P_3 = P_{30} + \Delta P_3. \quad (2.26)$$

Обозначим правую часть соотношения (2.24) как функцию  $M(F_1, F_2, P, P_2, P_3)$  и разложим ее в ряд Тейлора, не учитывая при этом производные второго и выше порядков, по переменным  $F_1, F_2, P, P_2$  и  $P_3$ :

$$\begin{aligned} M(F_1, F_2, P, P_2, P_3) = & M(F_{10}, F_{20}, P_0, P_{20}, P_{30}) + \left( \frac{\partial M}{\partial F_1} \right)_0 \Delta F_1 + \\ & + \left( \frac{\partial M}{\partial F_2} \right)_0 \Delta F_2 + \left( \frac{\partial M}{\partial P} \right)_0 \Delta P + \left( \frac{\partial M}{\partial P_2} \right)_0 \Delta P_2 + \left( \frac{\partial M}{\partial P_3} \right)_0 \Delta P_3. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Выполним запись правой части формулы (2.24) согласно соотношению (2.27).

$$\frac{V_2}{RT} \frac{dP_2}{dt} = \left( \phi \cdot F_1 \cdot \sqrt{2\rho_2 \cdot (P - P_2)} \right)_0 + \left( \frac{\partial \left[ \phi \cdot F_1 \cdot \sqrt{2\rho_2 \cdot (P - P_2)} \right]}{\partial F_1} \right)_0 \Delta F_1 +$$

$$\begin{aligned}
& + \left( \frac{\partial \left[ \phi \cdot F_1 \cdot \sqrt{2\rho_2 \cdot (P - P_2)} \right]}{\partial P} \right)_0 \Delta P + \left( \frac{\partial \left[ \phi \cdot F_1 \cdot \sqrt{2\rho_2 \cdot (P - P_2)} \right]}{\partial P_2} \right)_0 \Delta P_2 - \\
& - \left( \mu_2 F_2 k_a \sqrt{\frac{P_2(P_2 - P_3)}{RT}} \right)_0 - \left( \frac{\partial \left[ \mu_2 F_2 k_a \sqrt{\frac{P_2(P_2 - P_3)}{RT}} \right]}{\partial F_2} \right)_0 \Delta F_2 - \\
& - \left( \frac{\partial \left[ \mu_2 F_2 k_a \sqrt{\frac{P_2(P_2 - P_3)}{RT}} \right]}{\partial P_2} \right)_0 \Delta P_2 - \left( \frac{\partial \left[ \mu_2 F_2 k_a \sqrt{\frac{P_2(P_2 - P_3)}{RT}} \right]}{\partial P_3} \right)_0 \Delta P_3. \tag{2.28}
\end{aligned}$$

В соотношении (2.28) вначале берутся производные, а потом вместо переменных параметров осуществляется подстановка их установившихся значений из выражений (2.24).

$$\begin{aligned}
\frac{V_2}{RT} \frac{dP_2}{dt} &= \phi \cdot F_{10} \cdot \sqrt{2\rho_2 \cdot (P_0 - P_{20})} + \phi \cdot \sqrt{2\rho_2 \cdot (P_0 - P_{20})} \Delta F_1 + \\
& + \phi \cdot F_{10} \cdot \frac{\rho_2}{\sqrt{2\rho_2 \cdot (P_0 - P_{20})}} \Delta P + \phi \cdot F_{10} \cdot \frac{-\rho_2}{\sqrt{2\rho_2 \cdot (P_0 - P_{20})}} \Delta P_2 - \\
& - \mu_2 F_{20} k_a \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20} - P_{30})}{RT}} - \mu_2 k_a \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20} - P_{30})}{RT}} \Delta F_2 - \\
& - \mu_2 F_{20} k_a \frac{(2P_{20} - P_{30})}{2RT \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20} - P_{30})}{RT}}} \Delta P_2 + \mu_2 F_{20} k_a \frac{P_{20}}{2RT \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20} - P_{30})}{RT}}} \Delta P_3. \tag{2.29}
\end{aligned}$$

Рассматривая установившееся движение ДГ из туннельной печи, уравнение (2.24) принимает вид при значениях соотношений (2.25)

$$\frac{V_2}{RT} \frac{dP_{20}}{dt} = \phi \cdot F_{10} \cdot \sqrt{2\rho_2 \cdot (P_0 - P_{20})} - \mu_2 F_{20} k_a \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20} - P_{30})}{RT}} = 0. \tag{2.30}$$

Выражение (2.30) равно нулю, так как производная от постоянной величины  $dP_{20}/dt$  равна нулю. Уравнение (2.29) определяет установившийся расход ГВС через оба сужающих устройства, приведенного на рисунке 2.3, а именно:

$$G_0 = \phi \cdot F_{10} \cdot \sqrt{2\rho_2 \cdot (P_0 - P_{20})} = \mu_2 F_{20} k_a \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20} - P_{30})}{RT}}. \tag{2.31}$$

Из уравнения (2.30) вычитаем уравнение (2.31), делим обе части полученного выражения на установившийся расход  $G_0$  и в результате получим:

$$\begin{aligned} \frac{V_2}{G_0 RT} \frac{dP_2}{dt} = \frac{\Delta F_1}{F_{10}} + \frac{1}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \Delta P - \frac{1}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \Delta P_2 - \frac{\Delta F_2}{F_{20}} - \\ - \frac{(2P_{20} - P_{30})}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} \Delta P_2 + \frac{P_{20}}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} \Delta P_3. \end{aligned} \quad (2.32)$$

После упрощения (2.32) получим:

$$\begin{aligned} \frac{V_2}{G_0 RT} \frac{dP_2}{dt} = \frac{\Delta F_1}{F_{10}} + \frac{1}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \Delta P - \frac{\Delta F_2}{F_{20}} - \\ - \frac{1}{2} \left[ \frac{P_{20}(P_0 - P_{20}) + P_{30}P_0}{(P_0 - P_{20})P_{20}(P_{20} - P_{30})} \right] \Delta P_2 + \frac{P_{20}}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} \Delta P_3 \\ \text{или} \quad \frac{V_2}{G_0 RT} \frac{dP_2}{dt} + \frac{P_{20}(P_0 - P_{20}) + P_{30}P_0}{2(P_0 - P_{20})P_{20}(P_{20} - P_{30})} \Delta P_2 = \frac{\Delta F_1}{F_{10}} - \frac{\Delta F_2}{F_{20}} + \\ + \frac{1}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \Delta P + \frac{P_{20}}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} \Delta P_3. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Уравнение (2.33) перепишем таким образом, чтобы в нём присутствовали отношения  $\Delta P/P_0$ ;  $\Delta P_2/P_{20}$  и  $\Delta P_3/P_{30}$

$$\begin{aligned} \frac{V_2 \cdot P_{20}}{G_0 RT} \frac{d\left(\frac{\Delta P_2}{P_{20}}\right)}{dt} + \frac{P_{20}(P_0 - P_{20}) + P_{30}P_0}{2(P_0 - P_{20})(P_{20} - P_{30})} \frac{\Delta P_2}{P_{20}} = \frac{\Delta F_1}{F_{10}} - \frac{\Delta F_2}{F_{20}} + \\ + \frac{P_0}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \frac{\Delta P}{P_0} + \frac{P_{20}P_{30}}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} \frac{\Delta P_3}{P_{30}}. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Вводим обозначения:  $\frac{V_2 P_{20}}{G_0 RT} = T_b$ ;  $\frac{\Delta P}{P_0} = x(t)$ ;  $\frac{\Delta F_1}{F_{10}} = b(t)$ ;  $\frac{\Delta P_2}{P_{20}} = y(t)$ ;

$$\frac{\Delta F_2}{F_{20}} = m(t); \quad \frac{\Delta P_3}{P_{30}} = n(t); \quad \frac{P_{20}(P_0 - P_{20}) + P_{30}P_0}{2(P_0 - P_{20})(P_{20} - P_{30})} = \kappa_1;$$

$$\frac{P_0}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} = \kappa_2; \quad \frac{P_{20}P_{30}}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} = \kappa_3. \quad (2.35)$$

Уравнение (2.34) с учетом соотношений (2.35) принимает вид:

$$T_b \frac{dy}{dt} + \kappa_1 y(t) = b(t) - m(t) + \kappa_2 x(t) + \kappa_3 n(t). \quad (2.36)$$

Если выражение (2.36) преобразовать по Лапласу, тогда

$$(T_b s + k_1) y(s) = b(s) - m(s) + k_2 x(s) + k_3 n(s). \quad (2.37)$$

где  $s$ –оператор Лапласа.

Структурная схема модели туннельной печи по разрежению ДГ, состоящая из обобщенного пневматического сопротивления, расположенного на входе ГВС в туннельную печь, емкости и регулирующего вентиля, расположенного на выходе ДГ из туннельной печи, построенная по выражению (2.37), представлена на рисунке 2.4.

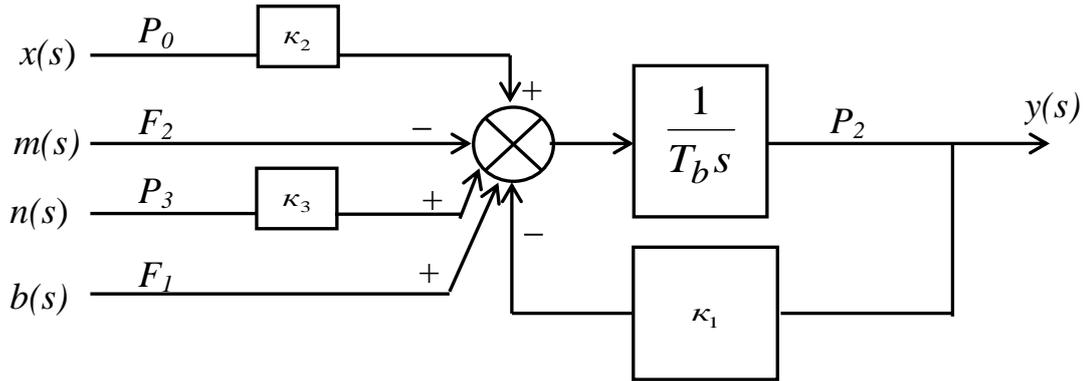


Рисунок 2.4 – Структурная схема модели туннельной печи по разрежению ДГ

По каждому входному параметру, в соответствии со структурной схемой, можно определить передаточную функцию. Например, передаточная функция изменения разрежения  $P_2$  в туннельной печи по отношению к площади проходного сечения регулирующего вентиля, изменяющего отвод ДГ из туннельной печи, в атмосферу имеет вид:

$$W_{p2/F_1}(s) = y(s)/m(s) = 1/(T_b s + k_1).$$

Таким образом, составлено дифференциальное уравнение, устанавливающее взаимосвязь между разрежением ДГ в туннельной печи для обжига керамических изделий и массовым расходом, давлением ГВС, поступающей в туннельную печь на горение. Полученное дифференциальное уравнение нелинейное, поэтому проведена линеаризация и установлены формульные выражения для его постоянных времени и коэффициентов.

Выполнено преобразование дифференциального уравнения к операторному виду и выделены типовые динамические звенья. На основе установленных типовых динамических звеньев составлена структурная схема туннельной печи для обжига

керамических изделий как объекта автоматического управления по разрежению ДГ.

### 2.3 Математическое описание процесса обжига в туннельной печи как объекта автоматического управления по давлению газовой смеси с учетом расхода нагретого газа

Математическое описание процесса обжига в туннельной печи как объекта АУ по давлению ГВС с учетом расхода только НГ является частным случаем математического описания туннельной печи. В этом случае в туннельную печь будет поступать ГВС и уходить из нее только НГ. Расход ДГ будет равен нулю. Тогда уравнение (2.9) принимает вид:

$$\frac{V_z}{RT} \frac{dP}{dt} = \mu_1 F_1 k_a \sqrt{\frac{P_1(P_1 - P)}{RT}} - \mu_3 F_3 k_a \sqrt{\frac{P(P - P_3)}{RT}}. \quad (2.38)$$

Переменными величинами в уравнении (2.38) являются  $F_1$ ;  $F_3$ ;  $P_1$ ;  $P$ ;  $P_3$  (то есть исключаются из рассмотрения  $F_2$ ,  $P_2$ ).

Уравнение (2.12) принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{V_z}{RT} \frac{dP}{dt} = & \mu_1 F_{10} k_a \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} - \mu_3 F_{30} k_a \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{30})}{RT}} + \\ & + \mu_1 k_a \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} \Delta F_1 - \mu_3 k_a \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{30})}{RT}} \Delta F_3 + \\ & + \frac{\mu_1 F_{10} k_a \left(-\frac{P_{10}}{RT}\right)}{2\sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}}} \Delta P_1 - \frac{\mu_1 F_{10} k_a P_{10}(P_{10} - P_0)}{2\sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} RT} \Delta P - \\ & - \frac{\mu_3 F_{30} k_a P_0(P_0 - P_{30})}{2\sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{30})}{RT}} RT} \Delta P - \frac{\mu_3 F_{30} k_a \left(-\frac{P_0}{RT}\right)}{2\sqrt{\frac{P_0^2 - P_0 P_{30}}{RT}}} \Delta P_3. \end{aligned} \quad (2.39)$$

Уравнение (2.13) принимает вид:

$$\frac{V_z}{RT} \frac{dP_0}{dt} = \mu_1 F_{10} k_a \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} - \mu_3 F_{30} k_a \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{30})}{RT}} = 0. \quad (2.40)$$

Уравнение (2.14) имеет вид:

$$G_0 = \mu_1 F_{10} k_a \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} = \mu_3 F_{30} k_a \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{30})}{RT}}. \quad (2.41)$$

Уравнение (2.15) принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{V_z}{G_0 RT} \frac{dP}{dt} = & \frac{\Delta F_1}{F_{10}} - \frac{\mu_3 k_a}{G_0} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{30})}{RT}} \Delta F_3 + \frac{\mu_1 F_{10} k_a P_{10}}{2G_0 \sqrt{RTP_{10}(P_{10} - P_0)}} \Delta P_1 - \\ & - \left( \frac{\mu_1 F_1 k_a P_{10}(P_{10} - P_0)}{2G_0 \sqrt{RTP_{10}(P_{10} - P_0)}} + \frac{\mu_3 F_3 k_a P_0(P_0 - P_{30})}{2G_0 \sqrt{RTP_0(P_0 - P_{30})}} \right) \Delta P - \frac{\mu_3 F_{30} K_a P_0}{2G_0 \sqrt{RTP_0(P_0 - P_{30})}} \Delta P_3. \end{aligned} \quad (2.42)$$

Уравнение (2.16) принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{V_z P_0}{G_0 RT} \frac{d\left(\frac{\Delta P}{P_0}\right)}{dt} = & \frac{\Delta F_1}{F_{10}} - \frac{\mu_3 F_{30} k_a}{G_0} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{30})}{RT}} \frac{\Delta F_3}{F_{30}} + \frac{\mu_1 F_{10} k_a P_{10}^2}{2G_0 \sqrt{RTP_{10}(P_{10} - P_0)}} \frac{\Delta P_1}{P_{10}} - \\ & \left( \frac{\mu_1 F_1 k_a P_{10}(P_{10} - P_0)}{2G_0 \sqrt{RTP_{10}(P_{10} - P_0)}} + \frac{\mu_3 F_{30} k_a P_0(P_0 - P_{30})}{2G_0 \sqrt{RTP_0(P_0 - P_{30})}} \right) \frac{\Delta P}{P_0} + \frac{\mu_3 F_{30} k_a P_0 P_{30}}{2G_0 \sqrt{RTP_0(P_0 - P_{30})}} \frac{\Delta P_3}{P_{30}}. \end{aligned} \quad (2.43)$$

Введем обозначения [62,63]:

$$\begin{aligned} \frac{V_z P_0}{G_0 RT} = T_a; \quad \frac{\Delta F_1}{F_{10}} = m(t); \quad \frac{\Delta P}{P_0} = y(t); \quad \frac{\Delta F_3}{F_{30}} = a(t); \\ \frac{\Delta P_1}{P_{10}} = d(t); \quad \frac{\Delta P_3}{P_{30}} = c(t); \\ \frac{\mu_1 F_1 k_a P_{10}(P_{10} - P_0)}{2G_0 \sqrt{RTP_{10}(P_{10} - P_0)}} + \frac{\mu_3 F_{30} k_a P_0(P_0 - P_{30})}{2G_0 \sqrt{RTP_0(P_0 - P_{30})}} = k_1; \\ \frac{\mu_3 F_{30} k_a}{G_0} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{30})}{RT}} = k_3; \quad \frac{\mu_1 F_{10} k_a P_{10}^2}{2G_0 \sqrt{RTP_{10}(P_{10} - P_0)}} = k_4; \quad \frac{\mu_3 F_{30} K_a P_0 P_{30}}{2G_0 \sqrt{RTP_0(P_0 - P_{30})}} = k_6. \end{aligned} \quad (2.44)$$

Уравнение (2.21) принимает вид:

$$T_a \frac{dy(t)}{dt} + k_1 y(t) = m(t) - k_3 a(t) + k_4 d(t) + k_6 c(t). \quad (2.45)$$

После преобразования по Лапласу уравнение (2.45) получим:

$$T_a s y(s) + k_1 y(s) = m(s) - k_3 a(s) + k_4 d(s) + k_6 c(s). \quad (2.46)$$

где  $s$ –оператор Лапласа.

На рисунке 2.5 представлена структурная схема туннельной печи как объекта АУ по давлению ГВС с учетом расходов НГ, составленная по уравнению (2.46).

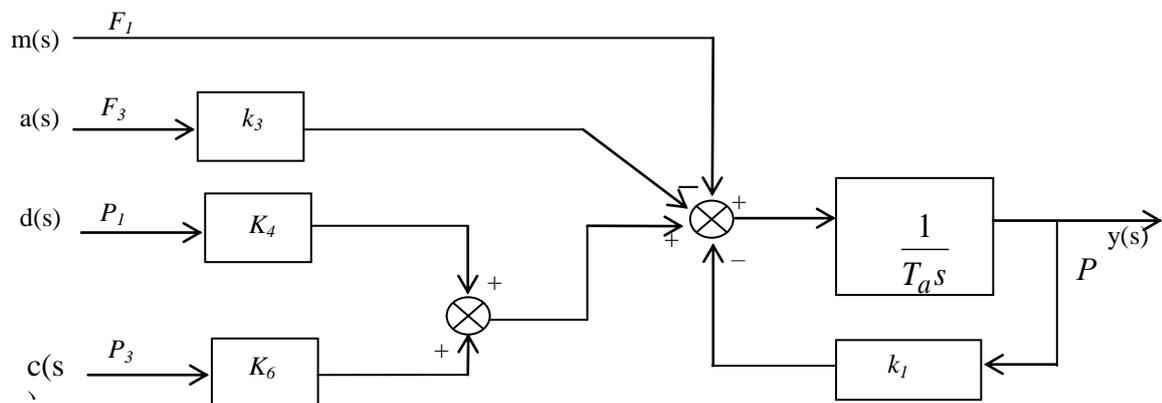


Рисунок 2.5 – Структурная схема туннельной печи как объекта автоматического управления по давлению ГВС с учетом расходов НГ

Как видно из уравнения (2.46), на давление ГВС в туннельной печи влияет не только расход ГВС и ДГ, но и НГ.

Таким образом, от расхода ГВС значительным образом зависит температура в зоне обжига туннельной печи, а следовательно, качество кирпича на выходе. При стабилизации температуры в зоне обжига за счет изменения подачи ГВС, а также поддерживая аэродинамический режим в печи с помощью отбора воздуха на зону подготовки дымососом, можно добиться стабилизации температурного режима.

### **3 Исследование влияния технологических параметров на характеристики туннельной печи и разработка алгоритмов управления**

В производстве керамических изделий используются, в основном, туннельные печи обжига, благодаря возможности полной автоматизации технологических процессов.

Туннельная печь длиной 78 м и шириной 4 м включает 3 зоны. Она имеет вагонеточный состав, количество вагонеток 48 шт. Передвигаются вагонетки вдоль туннеля по рельсовому пути с помощью толкателя. При проталкивании каждая вагонетка, пройдя всю длину туннеля, выходит из печи. За сутки происходит 17 толканий, кирпич (сырец) находится в среднем 9 часов в зоне обжига.

В настоящем разделе представлены результаты исследования влияния технологических параметров на динамические характеристики туннельной печи и выполнена разработка алгоритмов управления с применением многомерного четкого регулятора [64, 65, 66].

#### **3.1 Определение экстремальных соотношений между технологическими параметрами туннельной печи**

Математическое описание туннельной печи как объекта АУ по давлению ГВС сводится, в основном, к дифференциальному уравнению (2.44), которое было получено в предыдущем разделе:

$$T_a \frac{dy(t)}{dt} + k_1 y(t) = m(t) - k_3 a(t) + k_4 d(t) + k_6 c(t). \quad (3.1)$$

где  $T_a$  – постоянная времени с туннельной печи, которая определяется по выражению:

$$T_a = \frac{V_z P_0}{G_0 RT}, \quad (3.2)$$

$m(t)$ ,  $a(t)$ ,  $d(t)$ ,  $c(t)$  – переменные относительные величины туннельной печи, которые определяются по следующим соотношениям:

$$\frac{\Delta P}{P_0} = y(t); \quad \frac{\Delta F_1}{F_{10}} = m(t); \quad \frac{\Delta F_3}{F_{30}} = a(t); \quad \frac{\Delta P_1}{P_{10}} = d(t); \quad \frac{\Delta P_3}{P_{30}} = c(t). \quad (3.4)$$

$k_1, k_3, k_4, k_6$  – коэффициенты, определяемые по соотношениям:

так как

$$G_0 = \mu_1 F_{10} k_a \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} = \mu_3 F_{30} k_a \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{30})}{RT}}. \quad (3.5)$$

Тогда:

$$k_1 = \frac{P_0}{2(P_{10} - P_0)} + \frac{2P_0 - P_{30}}{2(P_0 - P_{30})}, \quad (3.6)$$

$$k_3 = 1, \quad (3.7)$$

$$k_4 = \frac{P_{10}}{2(P_{10} - P_0)}, \quad (3.8)$$

$$k_6 = \frac{P_{30}}{2(P_0 - P_{30})}. \quad (3.9)$$

После преобразования уравнения (3.1) по Лапласу получим:

$$(T_a s + k_1)y(s) = m(s) - k_3 a(s) + k_4 d(s) + k_6 c(s). \quad (3.10)$$

Режим работы туннельной печи в производственных условиях характеризуется, в основном, изменением давления ГВС, разряжение НГ и ДГ.

Передаточная функция по изменению  $m(s)$ , то есть сечения вентиля  $F_1$  туннельной печи, согласно уравнению (3.10), имеет вид:

$$W_{F_1}(s) = \frac{y(s)}{m(s)} = \frac{1}{T_a s + k_1}, \quad (3.11)$$

Если допустить, что на вход системы описываемой передаточной функцией (3.11) подано единичное возмущение, то есть  $m(s) = 1/s$ , тогда:

$$m(s) = \frac{1}{(T_a s + k_1) s}, \quad (3.12)$$

Решение этого уравнения, выполненного путем обратного преобразования по Лапласу, имеет вид:

$$m(t) = \frac{1}{k_1} \left( 1 - e^{-\frac{k_1 t}{T_a}} \right). \quad (3.13)$$

Уравнение (3.13) описывает изменение выходной величины  $x(t) = \Delta P / P_0$ , то есть давления после вентиля туннельной печи, в зависимости от коэффициента  $k_1$  и постоянной времени  $T_a$ .

Коэффициент  $k_1$  является коэффициентом самовыравнивания туннельной печи как объекта АУ. В общем виде коэффициент самовыравнивания  $k_1$  в уравнении (3.13) может быть больше или меньше нуля.

На рисунке 3.1 приведен общий вид переходных характеристик туннельной печи, построенных по формуле (3.13) при  $k_1 > 0$ ,  $k_1 < 0$ , при  $T_a = 1$  с.

Как видно из общего вида переходных характеристик в динамическом отношении, они могут иметь свойство самовыравнивания при  $k_1 > 0$  или не иметь этого свойства при  $k_1 < 0$ .

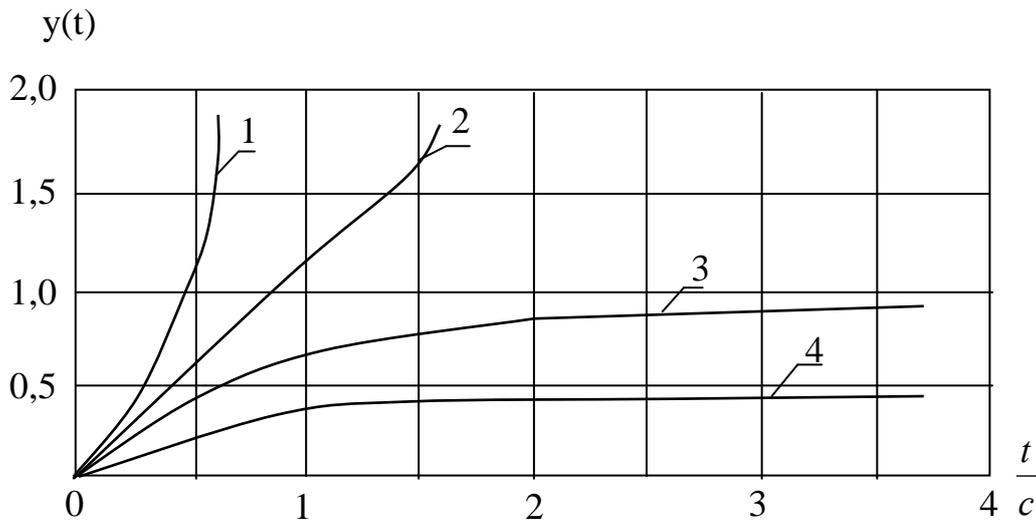


Рисунок 3.1 – Общий вид переходных характеристик туннельных печей обжига керамического кирпича: 1 –  $k = -1,5$ ; 2 –  $k = -0,2$ ; 3 –  $k = 1$ ; 4 –  $k = 1,5$

Определим минимальное значение давления в туннельной печи  $P_0$  по соотношению  $dk/dP_0 = 0$  из уравнения (3.6):

$$\frac{dk_1}{dP_0} = \frac{(P_0 P_{10} - P_{10} P_{30} - P_0^2 + P_0 P_{30}) \cdot (P_{10} - 4P_0)}{(P_{10} - P_0)^2 \cdot (P_0 - P_{30})^2} -$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{(P_0 P_{10} - P_{10} P_{30} - P_0^2) \cdot (P_{10} - P_0 + P_{30})}{(P_{10} - P_0)^2 \cdot (P_0 - P_{30})^2} = 0. \\
& P_0^2 (P_{10} - P_{30}) + P_{10} P_{30} (P_{30} - P_{10}) = 0, \\
& P_0^2 = P_{10} P_{30} \quad \text{или} \quad P_0 = \sqrt{P_{10} P_{30}}. \tag{3.14}
\end{aligned}$$

Соотношение (3.14) характеризует, в общем случае, минимальное значение давления в туннельной печи  $P_0$ , при поддержании которого возможно получение заданного разрежения на выходе НГ  $P_{30}$  при постоянном входном давлении  $P_{10}$ . Подставим в уравнение (3.14) численные значения, например, для  $P_{10} = 4$  кПа,  $P_{30} = 0,6$  кПа, и затем построим зависимость  $k_I = f(P_0)$ .

$$P_{0\min} = \sqrt{4 \cdot 0,6} = 1,55.$$

Если разрежение на выходе, например, равно  $P_{30} = 0,8$  кПа, при  $P_{10} = 4$  кПа, тогда получим:

$$P_{0\min} = \sqrt{4 \cdot 0,8} = 1,79.$$

Так как было определено минимальное значение давления в туннельной печи, то для определения минимального значения коэффициента самовыравнивания  $k_{I\min}$  для  $P_{0\min}$ , необходимо в формулу (3.6) подставить  $P_0 = \sqrt{P_{10} P_{30}}$ .

$$\begin{aligned}
k_{1\min} &= \frac{\sqrt{P_{10} P_{30}}}{2(P_{10} - \sqrt{P_{10} P_{30}})} + \frac{(2\sqrt{P_{10} P_{30}} - P_{30})}{2(\sqrt{P_{10} P_{30}} - P_{30})} = \frac{P_{10}(\sqrt{P_{10} P_{30}} - P_{30})}{(\sqrt{P_{10} P_{30}}(P_{10} + P_{30}) - 2P_{10} P_{30})} = \\
&= \frac{\sqrt{\frac{P_{10}}{P_{30}}} - 1}{\sqrt{\frac{P_{10}}{P_{30}} \left(1 + \frac{P_{30}}{P_{10}}\right)} - 2} \quad \text{или} \quad k_{1\min} = \frac{1}{1 - \sqrt{\frac{P_{30}}{P_{10}}}} \tag{3.15}
\end{aligned}$$

Подставив значение для  $P_{10} = 4$  кПа,  $P_{30} = 0,6$  кПа,  $P_{0\min} = 1,55$  кПа в уравнение (3.15), получим:

$$k_{1\min} = 1 / (1 - \sqrt{0,6/4}) = 1,6.$$

На рисунке 3.2 представлены зависимости  $k_I = f(P_0)$  по уравнению (3.6) при  $P_{10} = \text{const}$  ( $P_{10} = 4$  кПа).

По рисунку 3.2 видно, что при постоянном давлении ГВС на входе в туннельную печь обжига, для того чтобы достичь заданного разрежения на выходе ДГ и НГ, необходимо в печи поддерживать давление, значение которого не

превышало бы минимального. Для каждого значения минимум определяется отдельно, что видно из кривых на рисунке 3.2 (если значение разрежения ДГ или НГ равно 0,6 кПа, то минимальное значение давления в туннельной печи будет  $P_0 = 1,55$  кПа).

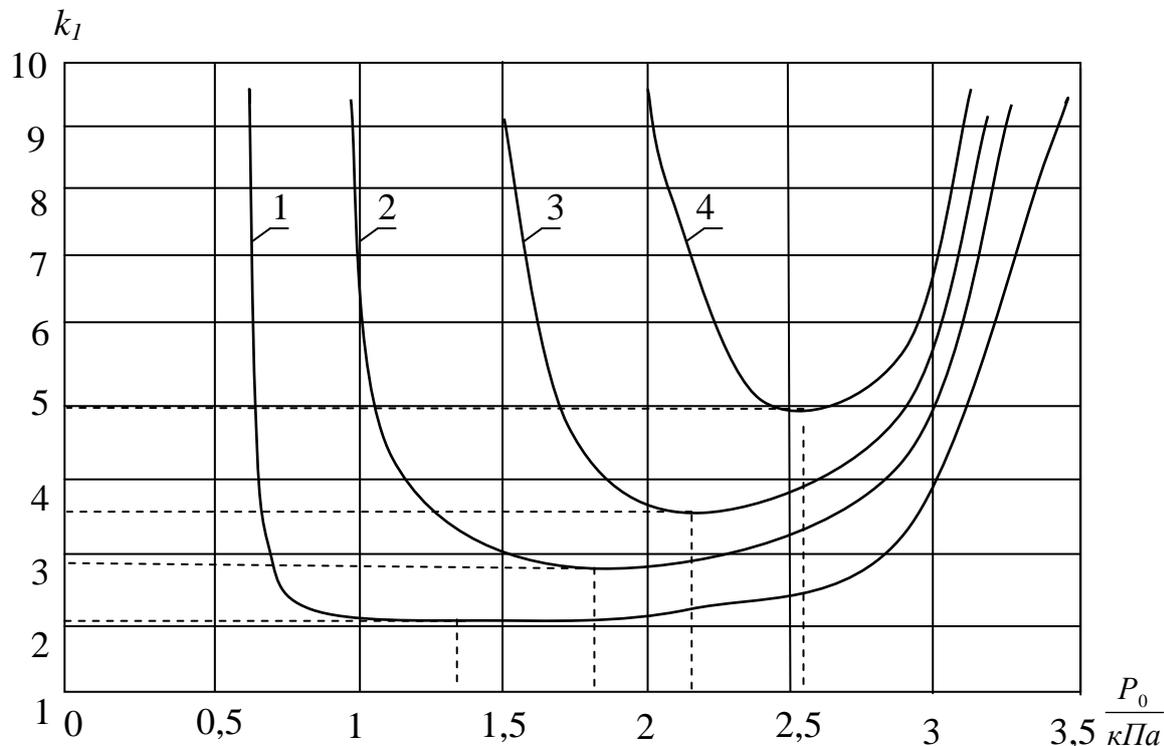


Рисунок 3.2 – Результат зависимости давления в туннельной печи  $P_0$  от коэффициента самовыравнивания, где  $P_{30}$  равно, кПа: 1– 0,6; 2–0,95; 3– 1,5; 4– 2,5

Для каждого значения НГ из туннельной печи существует минимальное значение коэффициента самовыравнивания  $k_I$ . Например, для НГ, равного 0,6 кПа, минимальное значение коэффициента самовыравнивания равно  $k_I = 1,07$ . Из кривых на рисунке 3.2 видно, что чем больше коэффициент самовыравнивания  $k_I$ , тем меньшее давление необходимо поддерживать в туннельной печи.

При увеличении коэффициента самовыравнивания уменьшается изменение выходной величины  $y(t)$  (давления в туннельной печи) и в результате облегчается получение значения разрежения НГ, так как перепад давления при увеличении коэффициента самовыравнивания уменьшается. Но давление в туннельной печи всегда будет превышать давление НГ, каким бы большим коэффициент самовыравнивания ни был, что видно из кривых на рисунке 3.2.

$$\frac{dk_1}{dP_{30}} = \frac{4(P_0 P_{10} - P_{10} P_{30} - P_0^2 + P_0 P_{30}) \cdot (-2P_{10})}{16(P_{10} - P_0)^2 \cdot (P_0 - P_{30})^2} - \frac{(4P_0 P_{10} - 2P_{10} P_{30} - 2P_0^2) \cdot (-4P_{10} + 4P_0)}{16(P_{10} - P_0)^2 \cdot (P_0 - P_{30})^2} = 0$$

Проверим, имеет ли экстремум функция  $k_I = f(P_{30})$

$$P_{10}^2 - 2P_0 P_{10} + P_0^2 = 0; P_{10} - P_0 = 0; P_{10} = P_0. \quad (3.16)$$

Полученные выражения показывают, что зависимость  $k_I = f(P_{30})$  не имеет экстремума, так как в выражение  $P_{10} = P_0$  не входит величина  $P_{30}$ , по которой брали производную  $dk_I/dP_{30}$ .  $P_{10} - P_0 = 0$ , - это выражение, как видим из формулы (3.6), для  $k_I$  является одним из выражений знаменателя, то есть полюсом  $k_I$ , когда  $k_I$  стремится к бесконечности при  $P_{10} = P_0$ . Это происходит тогда, когда давление до туннельной печи  $P_{10}$  равно давлению  $P_0$  внутри туннельной печи. Этого достигнуть практически невозможно.

Проверим, имеет ли экстремум функция  $k_I = f(P_{10})$ .

$$\begin{aligned} \frac{dk_1}{dP_{10}} = \frac{dk_1}{dP_{10}} &= \frac{4(P_0 P_{10} - P_{10} P_{30} - P_0^2 + P_0 P_{30}) \cdot (4P_0 - 2P_{30})}{16(P_{10} - P_0)^2 \cdot (P_0 - P_{30})^2} - \\ &- \frac{(4P_0 P_{10} - 2P_{10} P_{30} - 2P_0^2) \cdot (4P_0 - 4P_{30})}{16(P_{10} - P_0)^2 \cdot (P_0 - P_{30})^2} = 0. \\ P_{0(1,3)} &= \frac{2P_{30} \pm \sqrt{4P_{30}^2 - 4P_{30}}}{2} = 1 \pm \sqrt{1 - \frac{1}{P_{30}}}. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Для оставшихся величин туннельной печи экстремумы не определяются, что будет обосновано в последующем анализе.

Таким образом, для того чтобы получить заданное значение разряжения ДГ и НГ на выходе из туннельной печи, следует поддерживать определенное давление внутри туннельной печи, которое определяется по полученным соотношениям, а коэффициент самовыравнивания  $k_I$  определяется по формулам.

### 3.2 Исследование влияния технологических параметров на характеристики туннельной печи обжига

Анализ влияния технологических параметров на характеристики туннельной печи обжига керамического кирпича как объекта АУ по давлению ГВС основывается на уравнении (3.1), которое имеет вид:

$$T_a \frac{dy(t)}{dt} + k_1 y(t) = m(t) - k_3 a(t) + k_4 d(t) + k_6 c(t).$$

Определим постоянную времени  $T_a = f(G_0)$  для туннельной печи, в которой:  $G_0 = 1250 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $P_l = 3 - 4 \text{ кПа}$ ,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{С}$ .  $V_z = 54,3 \text{ м}^3$ . Газовая постоянная для природного газа (метана)  $R = 52,89 \text{ м}^2/\text{с}^2 \text{ К}$ ,  $T$  – абсолютная температура  $T = 273 + 20 = 293 \text{ К}$ . После подстановки в формулу (3.2) получим, что  $T_a = 1692,06 P_0 / G_0$

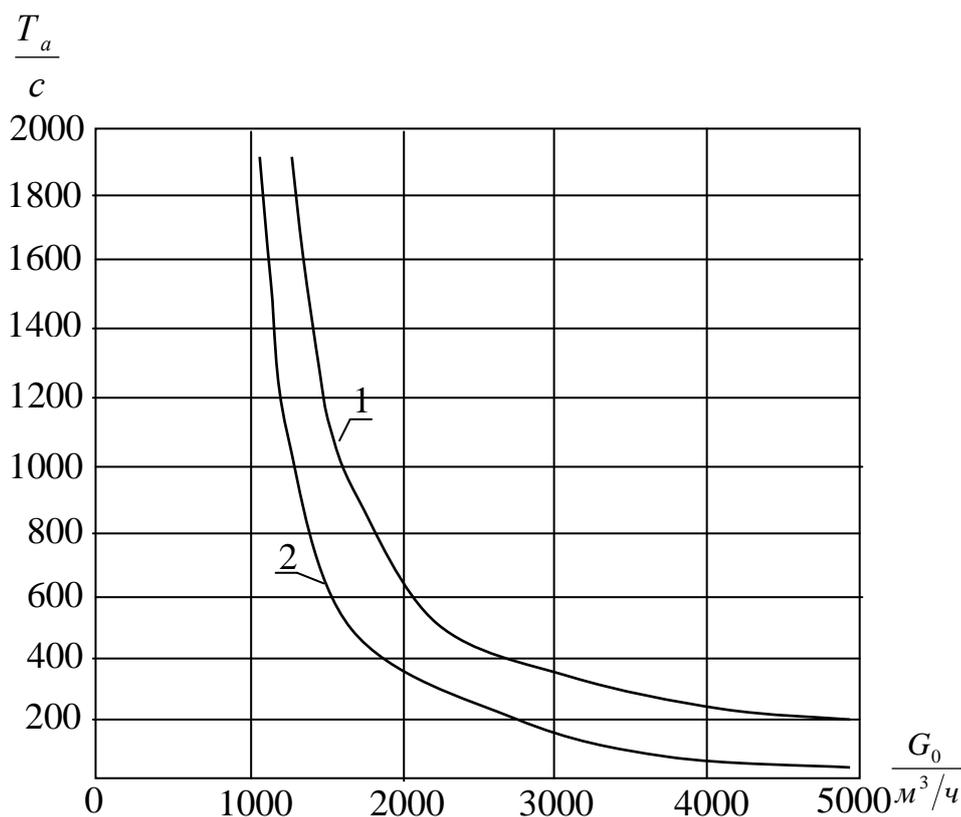


Рисунок 3.3 – Зависимость постоянной времени  $T_a$  туннельной печи обжига от давления внутри туннельной печи при  $P_0$ , равном, кПа: 1 – 3; 2 – 2

Из формулы (3.2) и рисунка 3.3 вытекает, что  $T_a$  возрастает с увеличением  $V_z$ , так как чем больше объем ГВС поступает в туннельную печь, тем быстрее она

увеличивается. С уменьшением  $P_0$  уменьшается  $T_a$ . Это означает, что время выхода НГ из зоны обжига туннельной печи при давлении 3 кПа больше, чем при давлении 2 кПа.

На рисунке 3.4 представлена зависимость  $T_a = f(P_0)$ . Определяем, что при  $G_0 = 1250 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $T_a = 1690,06 \cdot P_0$ , а при  $G_0 = 2500 \text{ м}^3/\text{ч}$   $T_a = 845 \cdot P_0$ .

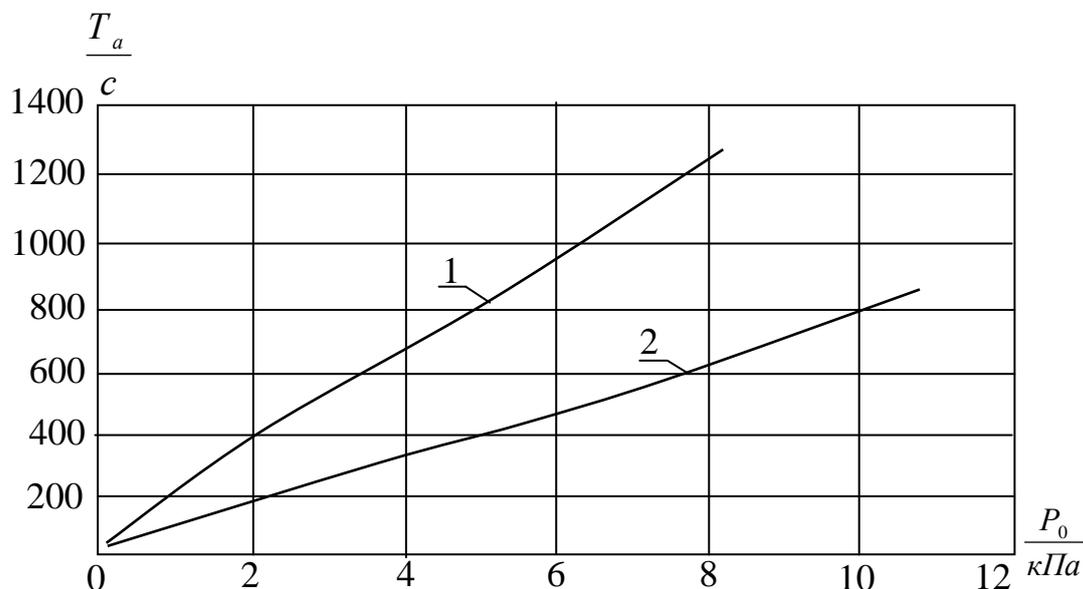


Рисунок 3.4 – Зависимость постоянной времени  $T_a$  от давления  $P_0$  в туннельной печи обжига при расходе нагретого газа  $G_0$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$ , равном: 1 – 1250; 2 – 2500

Как видно из кривых на рисунке 3.4, при снижении давления ГВС в туннельной печи время переходного процесса уменьшается, то есть НГ при пониженном давлении в зоне обжига в туннельной печи выходит из зоны быстрее. Если принимать одни и те же значения входящих величин полученной зависимости, то можно подтвердить полученные значения по рисунку 3.3.

Построим зависимость  $k_I = f(P_{30})$ , используя уравнение (3.6) при  $P_{10} = const$ ,  $P_{10} = 4\text{кПа}$  и  $P_0 = 1; 1,5; 2; 3$ ; рисунок 3.5.

Как видно из рисунка 3.5, при увеличении коэффициента самовыравнивания  $k_I$  разрежение НГ в линии 5 увеличивается, это значение ниже, чем в туннельной печи. Изменяя  $k_I$  при каком-то постоянном значении  $P_0$ , можно изменять разрежение  $P_{30}$  после вентиля 7. По полученным кривым на рисунке 3.5 можно определить значение коэффициента самовыравнивания  $k_I$ , если известно давление в туннельной печи и

значение разряжения НГ, которое необходимо поддерживать на выходе  $P_{30}$  в линии 5.

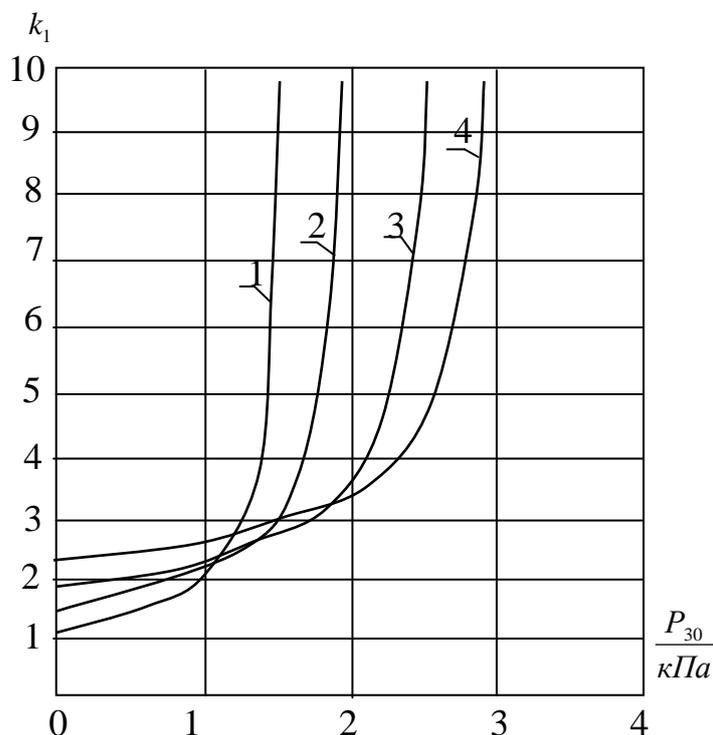


Рисунок 3.5 – Зависимость коэффициента  $k_1$  от давления  $P_{30}$  после клапана 7 при давлении в туннельной печи  $P_0$ , кПа, равном: 1 – 1,5; 2 – 2; 3 – 2,5; 4 – 3.

На рисунке 3.6 представлены зависимости  $k_1 = f(P_{10})$  при  $P_{30} = const$ ,  $P_{30} = 0,6$  кПа и  $P_0 = 2; 3$ ; используя уравнение (3.6).

Из кривых на рисунке 3.6 можно сделать вывод, что, если увеличивается давление перед туннельной печью, тогда коэффициент  $k_1$  необходимо понижать, чтобы поддерживать давление в туннельной печи  $P_0$  постоянным, в результате чего увеличится значение выходной величины  $y(t)$ .

Если производить анализ дифференциального уравнения (3.1) по переменной относительной величине  $c(t)$  (по сечению  $F_3$  вентиля 7), тогда зависимости поменяют знак на противоположный. Если сечение  $F_3$  вентиля 7 будет увеличиваться, то давление в туннельной печи будет уменьшаться.

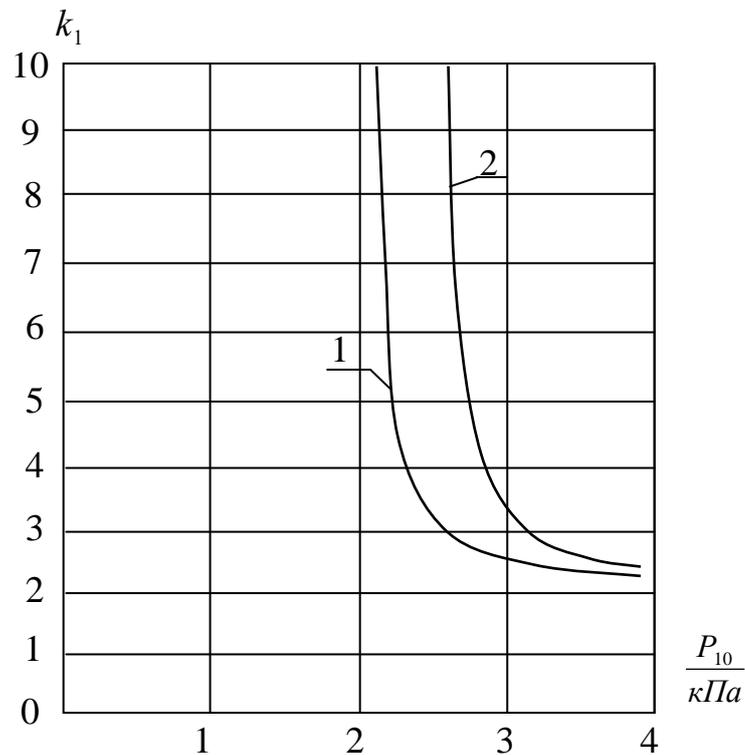


Рисунок 3.6 – Зависимость коэффициента  $k_1$  от давления на входе в туннельную печь  $P_{10}$  при постоянном разрежении на выходе  $P_{30}$  и давлении  $P_0$ , кПа, равном: 1 – 2; 2 – 2,5

Проанализируем взаимосвязь технологических параметров и динамических параметров объекта управления по переменной относительной величине  $c(t)$  (по изменению давления  $P_1$  перед вентиляем 2 туннельной печи). Уравнение (3.1) в этом случае принимает вид:

$$T_a \frac{dy(t)}{dt} + k_1 y(t) = k_6 c(t). \quad (3.18)$$

После преобразование по Лапласу получим:

$$T_a s y(s) + k_1 y(s) = k_6 c(s). \quad (3.19)$$

Передаточная функция по изменению  $c(s)$ , то есть давления  $P_1$  перед вентиляем 2 туннельной печи, согласно уравнению (3.19), имеет вид:

$$W_{P_1}(s) = \frac{y(s)}{c(s)} = \frac{k_6}{T_a s + k_1}. \quad (3.20)$$

Если на вход системы, описываемой передаточной функцией (3.20), подано единичное возмущение, тогда:

$$y(s) = \frac{k_6}{(T_a s + k_1)} \frac{1}{s}. \quad (3.21)$$

Решение этого уравнения, выполненного путем обратного преобразования по Лапласу, принимает вид:

$$y(t) = \frac{k_6}{k_1} \left( 1 - e^{-\frac{k}{T_a} t} \right). \quad (3.22)$$

Уравнение (3.22) описывает изменение выходной величины  $x(t) = \Delta P/P_0$  (давления после вентиля 2 туннельной печи) в зависимости от коэффициентов  $k_6$ ,  $k_1$  и постоянной времени  $T_a$ . В общем случае уравнение (3.22) отличается от уравнения (3.13) на величину  $k_6$ , которая может быть больше, меньше или равна нулю.

На рисунке 3.7 приведен общий вид переходных характеристик туннельной печи, построенных по формуле (3.22) при изменении  $k_6$ . Значение  $k_1$  принято равным 1 ( $k_1 = 1$ ),  $T_a = 1$  с.

Из общего вида переходных характеристик, представленных на рисунке 3.7, следует: чем меньше коэффициент  $k_6$ , тем меньше изменение выходной величины  $y(t)$  и тем больше свойство самовыравнивания объекта АУ.

Анализируя далее объект управления по  $c(t)$ , необходимо дифференциальное уравнение (3.18) разделить на коэффициент  $k_6$ , в результате чего получим уравнение вида:

$$\frac{T_a}{k_6} \frac{dy(t)}{dt} + \frac{k_1}{k_6} y(t) = c(t), \quad (3.23)$$

где  $\frac{k_1}{k_6} = k_c$  – коэффициент самовыравнивания туннельной печи как объекта АУ по переменной относительно величины  $c(t)$ ;

$\frac{T_a}{k_6} = T_c$  – время разгона туннельной печи как объекта АУ по переменной относительно величины  $c(t)$ .

$$k_c = \frac{(4P_0 P_{10} - 2P_{10} P_{30} - 2P_0^2) \cdot 2(P_{10} - P_0)}{4(P_{10} - P_0)(P_0 - P_{30})P_{10}} = \frac{2P_0 P_{10} - P_{10} P_{30} - P_0^2}{P_{10}(P_0 - P_{30})}. \quad (3.24)$$

$$T_c = \frac{VP_0}{G_0 RT} \frac{2(P_{10} - P_0)}{P_{10}}. \quad (3.25)$$

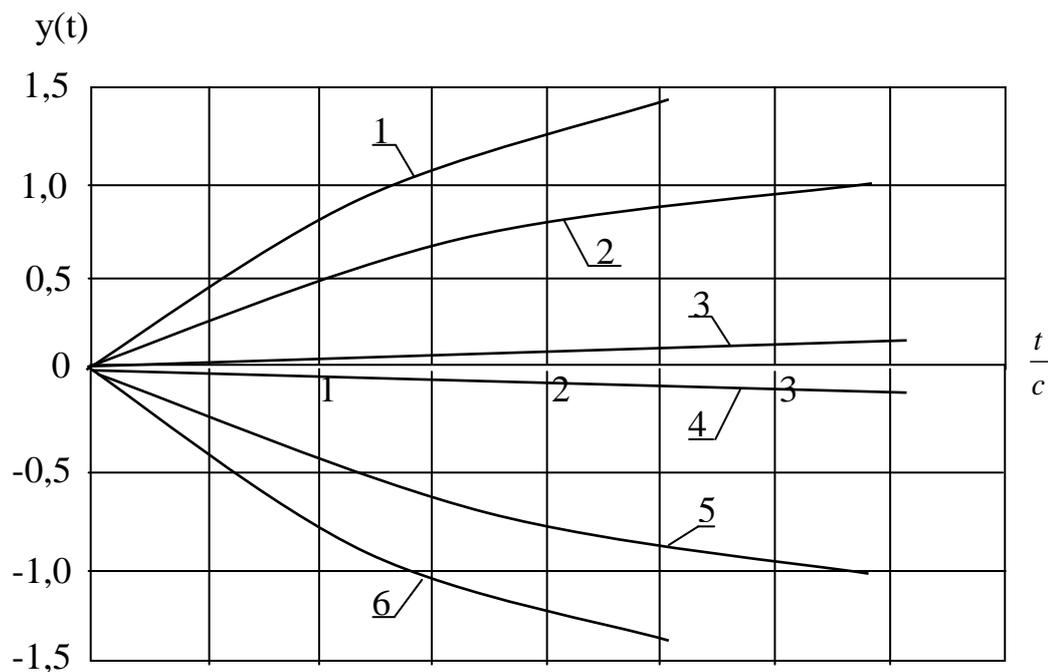


Рисунок 3.7 – Общий вид переходных характеристик туннельных печей при  $k_l = 1,0$ :

1 –  $k_6 = 1,5$ ; 2 –  $k_6 = 1,1$ ; 3 –  $k_6 = 0,1$ ; 4 –  $k_6 = -0,1$ ; 5 –  $k_6 = -1,1$ ; 6 –  $k_6 = -1,5$

Дифференциальное уравнение (3.22) принимает вид:

$$T_c \frac{dy(t)}{dt} + k_c y(t) = c(t). \quad (3.26)$$

В общем случае переходные характеристики имеют тот же вид, что и при анализе по переменной относительной величине  $m(t)$ , и объект управления по этому параметру в динамическом отношении может иметь свойство самовыравнивания ( $k_c > 0$ ), либо не иметь ( $k_c < 0$ ). Рассмотрим это подробнее.

$$T_c = \frac{VP_0}{G_0 RT} \frac{2(P_{10} - P_0)}{P_{10}}, \text{ но так как } T_c = 1690,06 \frac{P_0}{G_0}, \text{ тогда}$$

$$T_c = 1690,06 \frac{P_0}{G_0} \frac{2(P_{10} - P_0)}{P_{10}}.$$

На рисунке 3.8 представлены зависимости  $T_c = f(G_0)$ . Принимаем, что  $P_0 = 2$  кПа,  $P_0 = 3$  кПа,  $P_{10} = 4$  кПа, тогда  $T_c = 518,39/G_0$  и  $T_c = 612,21/G_0$ .

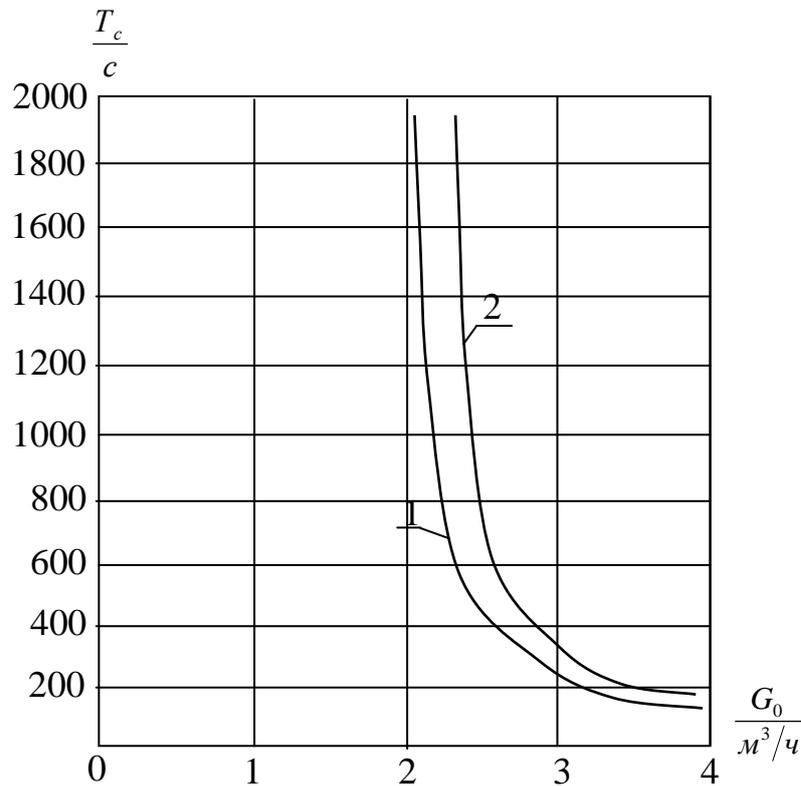


Рисунок 3.8 – Зависимость постоянной времени  $T_c$  туннельной печи от нагретого газа  $G_0$ , при  $P_0$ , равном, кПа: 1 – 2; 2 – 3

Из уравнения (3.25) и по рисунку 3.8 видно, что при увеличении расхода ГВС время разгона уменьшается. Но при уменьшении давления  $P_0$  в туннельной печи  $T_c$  начинает увеличиваться. Кроме того, время разгона зависит от перепада давления ( $P_{10} - P_0$ ). Чем оно больше, тем больше  $T_c$ .

Сравнив графики в рисунках 3.3 и 3.8, видно, что по  $c(t)$  объект ведет себя более жестко в динамическом режиме.

На рисунке 3.9 представлены зависимости  $T_c = f(P_0)$ , при  $P_{10} = 4$  кПа для  $G_0 = 1250$  м<sup>3</sup>/ч. В этом случае  $T_c = 1690,06 \cdot P_0 \cdot (100 - P_0)$ .

По рисунку 3.9 видно, что в этом режиме при снижении давления в туннельной печи  $P_0$  время разгона  $T_c$  вначале увеличивается, доходит до максимума, а затем снижается.

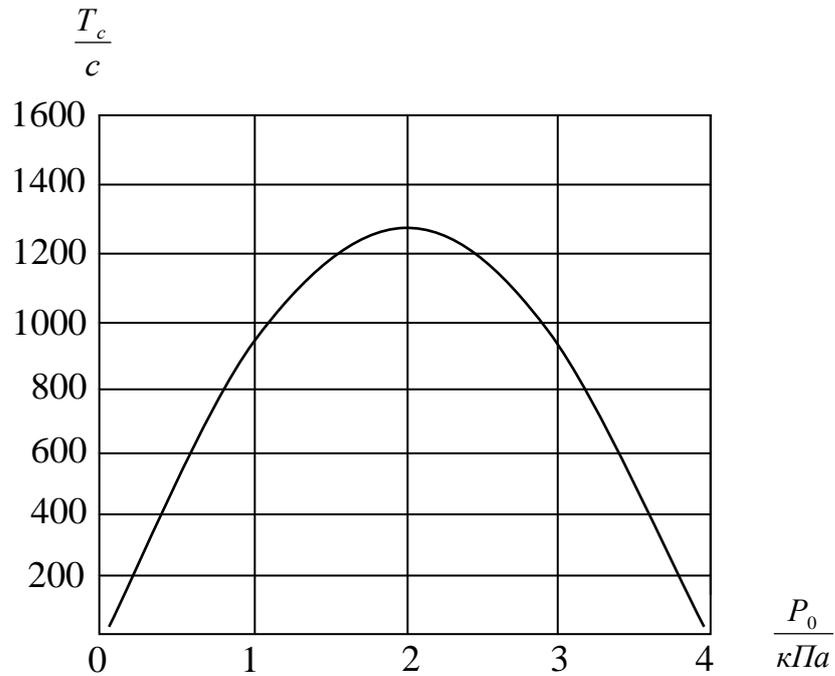


Рисунок 3.9 – Зависимость постоянной времени  $T_c$  от давления  $P_0$  в туннельной печи при расходе  $G_0$ , 1250м<sup>3</sup>/ч.

Точка максимума зависит от расхода  $G_0$ . Чем меньше расход ГВС, тем значение увеличивается  $T_c$  в точке максимума. Как видно из рисунка 3.9, функция  $T_c = f(P_0)$  имеет максимум. Определим выражение для этого максимального значения функции.

$$T_c = \frac{VP_0}{G_0RT} \frac{2(P_{10} - P_0)}{P_{10}}, \quad \frac{dT_c}{dP_0} = \frac{G_0RTP_{10}(2VP_{10} - 4VP_0)}{(G_0RTP_{10})^2}.$$

$$G_0RTP_{10} \cdot (2VP_{10} - 4VP_0) = 0. \quad P_{10}^2 - 2P_0P_{10} = 0.$$

$$2P_0P_{10} = P_{10}^2. \quad P_0 = P_{10}/2. \quad (3.27)$$

Определяем, что при  $P_{10} = 4$  кПа  $P_0 = 4/2 = 2$ . То есть максимум  $T_c$  находится при  $P_0 = 2$  кПа (рисунок 3.9).

На рисунке 3.10 представлены зависимости, построенные по уравнению (3.24)  $k_c = f(P_{30})$ , используя данные, которые применялись при исследовании  $k_I = f(P_{30})$ .

На рисунке 3.10 по графику видно, что с увеличением давления  $P_0$  в туннельной печи (увеличивая разряжение выхода НГ  $P_{30}$ ) коэффициент самовыравнивания  $k_c$  меняется плавно в небольших пределах, а потом начинает расти.

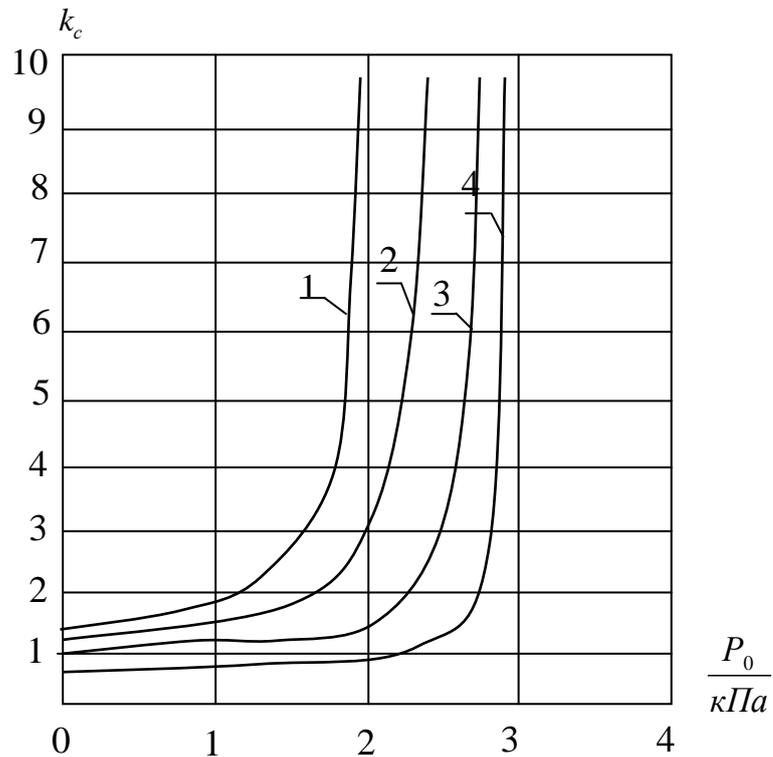


Рисунок 3.10 – Зависимость коэффициента  $k_c$  от давления после вентиля 7 при давлении в туннельной печи  $P_0$ , кПа, равном: 1 – 2; 2 – 2,5; 3 – 2,7; 4 – 3

Построим зависимости  $k_c = f(P_0)$  по уравнению (3.24), используя данные для  $k_l = f(P_0)$ .

По графику на рисунке 3.11 видно, что, изменяя коэффициент самовыравнивания  $k_c$ , можно изменить давление в туннельной печи  $P_0$ . На рисунке 3.12 представлены построенные по уравнению (3.24) зависимости  $k_c = f(P_{10})$ , используя данные для  $k_l = f(P_{10})$ .

Рассмотрим рисунок 3.12, где показано, что, если уменьшим давление на входе в туннельную печь  $P_{10}$ , для достижения заданного давления в туннельной печи  $P_0$  необходимо снижать коэффициент самовыравнивания  $k_c$ . Если сравнивать графики на рисунке 3.6 и рисунке 3.12, то наблюдается то, что

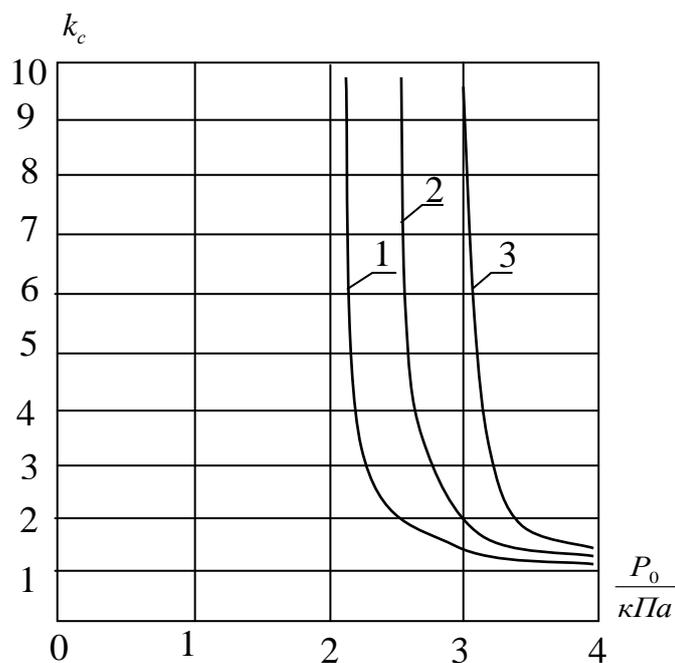


Рисунок 3.11 – Зависимость коэффициента  $k_c$  от давления в туннельной печи  $P_0$ , где  $P_{30}$  равно, кПа: 1 – 0,6; 2 – 0,4; 3 – 0,2

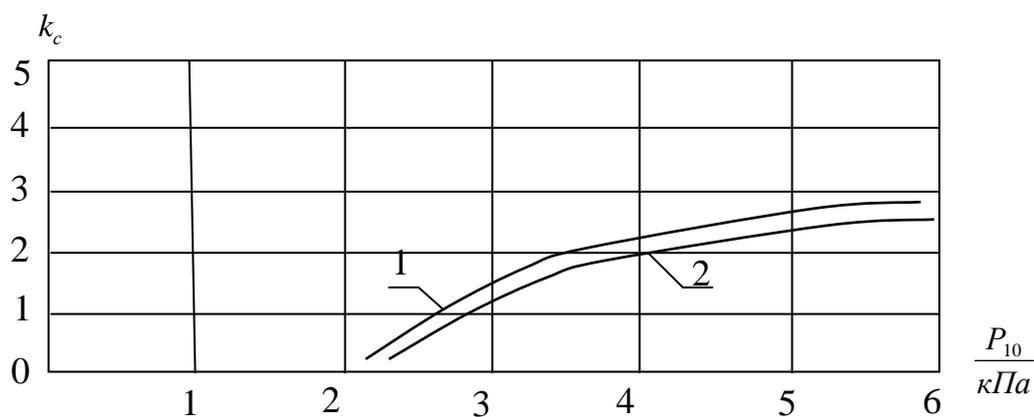


Рисунок 3.12 – Зависимость коэффициента  $k_c$  от давления на входе в туннельную печь  $P_{10}$  при постоянном разряжении на выходе  $P_{30}$ , когда давление  $P_0$ , кПа, равно: 1 – 2; 2 – 2,5

при анализе по переменной относительной величине  $m(t)$  коэффициент  $k_I$  необходимо повышать, а в рассмотренном режиме работы туннельной печи коэффициент  $k_c$  необходимо понижать для достижения заданного давления в туннельной печи  $P_0$ .

При анализе дифференциального уравнения (3.1) по переменной относительной величине  $c(t)$  (по разряжению  $P_{30}$  после вентиля 7) это уравнение принимает вид:

$$T_a \frac{dy(t)}{dt} + k_1 y(t) = k_6 c(t). \quad (3.28)$$

Преобразовав по Лапласу уравнение (3.28), получим:

$$T_a s y(s) + k_1 y(s) = k_6 c(s). \quad (3.29)$$

Передаточная функция по изменению  $c(t)$ , то есть разряжения  $P_{30}$  после вентиля 7 туннельной печи, и общий вид переходных характеристик выглядят идентично переходным характеристикам при анализе по переменной относительной величине  $c(t)$ , отличаясь на величину коэффициента  $k_6$ .

Дифференциальное уравнение (3.28) надо разделить на  $k_6$ , в результате чего получим:

$$\frac{T_a}{k_6} \frac{dy(t)}{dt} + \frac{k_1}{k_6} y(t) = c(t), \quad (3.30)$$

где  $\frac{k_1}{k_6} = k_c$  – коэффициент самовыравнивания туннельной печи как объекта управления по переменной  $c(t)$ ;

$\frac{T_a}{k_6} = T_c$  – время разгона туннельной печи как объекта управления по переменной  $c(t)$ .

$$k_c = \frac{(4P_0 P_{10} - 2P_{10} P_{30} - 2P_0^2) \cdot 2 \cdot (P_0 - P_{30})}{4(P_{10} - P_0)(P_0 - P_{30})P_{30}} = \frac{2P_0 P_{10} - P_{10} P_{30} - P_0^2}{P_{30}(P_{10} - P_{30})}. \quad (3.31)$$

$$T_c = \frac{VP_0 2(P_0 - P_{30})}{G_0 RTP_{30}}. \quad (3.32)$$

Уравнение 3.28 принимает вид:

$$T_d \frac{dy(t)}{dt} + k_c y(t) = c(t). \quad (3.33)$$

Ранее было получено, что  $T_a = 1690,06 \cdot P_0 / G_0$ , тогда  $T_c = 1690,06 \cdot 2P_0(P_0 - P_{30}) / G_0 P_{30}$ . На рисунке 3.13 представлены зависимости  $T_c = f(G_0)$ , принимая  $P_0 = 2$  кПа,  $P_{30} = 0,6$  кПа. В этом случае  $T_c = 3143,51 / G_0$ .

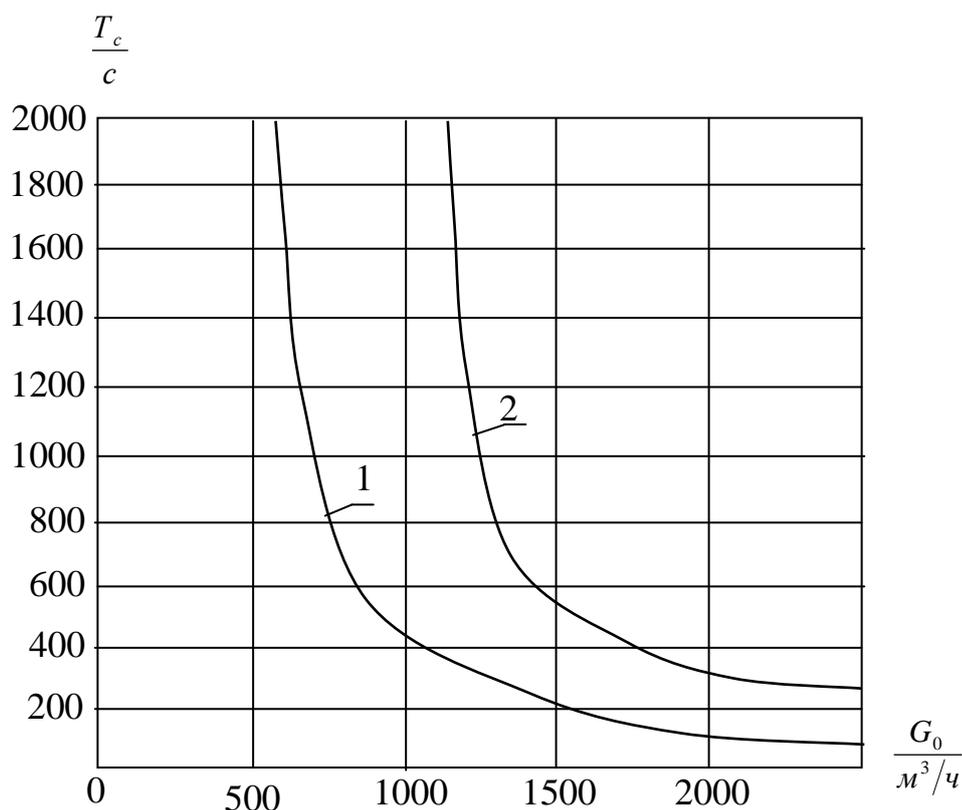


Рисунок 3.13 – Зависимость постоянной времени  $T_c$  туннельной печи от НГ  $G_0$ , при  $P_0$  равном, кПа: 1 – 2; 2 – 3

Из графика, который представлен на рисунке 3.13, следует, что при снижении расхода  $G_0$ , при постоянном давлении  $P_0$ , время разгона  $T_c$  увеличивается. Кроме этого  $T_c$  зависит от перепада давления  $P_0 - P_{30}$ . Чем больше перепад давлений  $P_0 - P_{30}$ , тем больше значение  $T_c$ . Если сравнивать графики на рисунке 3.3 и рисунке 3.13, то можно отметить, что при давлении  $P_0 = 2$  кПа они совпадают. Если увеличится давление в туннельной печи, происходит резкое увеличение значения  $T_c$ . Это в значительной степени влияет на выходную величину  $y(t)$ , которая в этом случае уменьшается.

На рисунке 3.13 представлены зависимости  $T_c = f(P_0)$  при  $P_{30} = 0,6$  кПа для  $G_0 = 625$  м<sup>3</sup>/ч,  $G_0 = 1250$  м<sup>3</sup>/ч,  $T_c = 3143,51 \cdot P_0(P_0 - 3)$

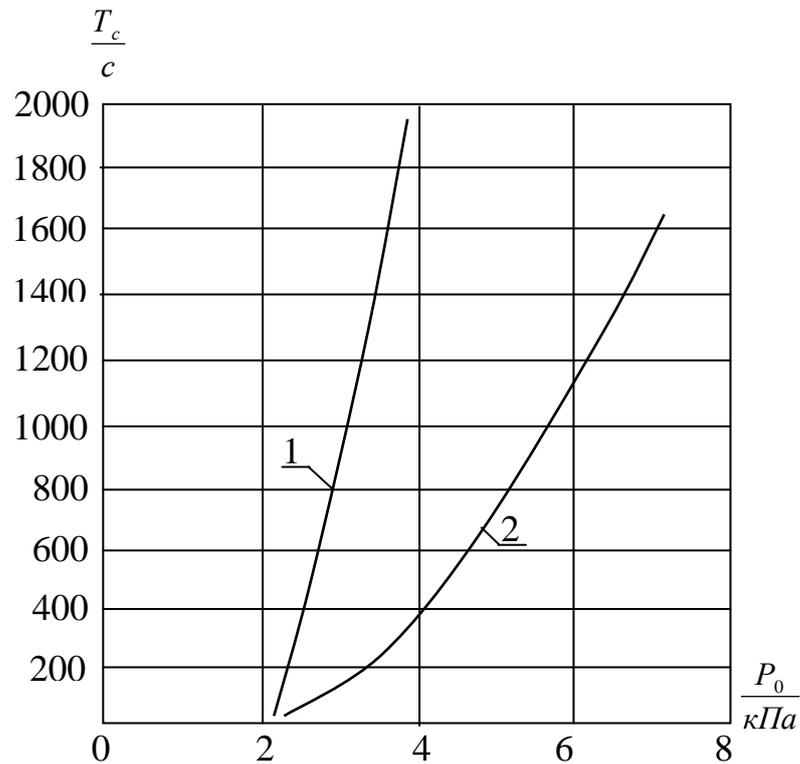


Рисунок 3.14 – Зависимость постоянной времени  $T_c$  от давления  $P_0$  в туннельной печи при расходе  $G_0$ , кг/с, равном: 1 – 625; 2 – 1250

Как видно из кривых на рисунке 3.14, при снижении давления  $P_0$  (при постоянном расходе  $G_0$ ) время разгона  $T_c$  объекта управления уменьшается. Если сравнить графики, которые представлены на рисунках 3.14 и 3.4, видно, что они существенно отличаются.

На рисунке 3.15 представлены зависимости  $k_c = f(P_{30})$  по уравнению (3.31) при  $P_{10} = const$ ,  $P_{10} = 4$  кПа и используются данные по предыдущим переменным.

Из анализа полученных кривых на рисунке 3.15 следует, что при снижении давления  $P_{30}$  после вентиля 7 при заданном давлении в туннельной печи  $P_0$  коэффициент самовыравнивания  $k_c$  необходимо увеличивать. Сравнивая кривые на рисунке 3.15 и рисунке 3.5, можно сделать вывод, что они совершенно разные.

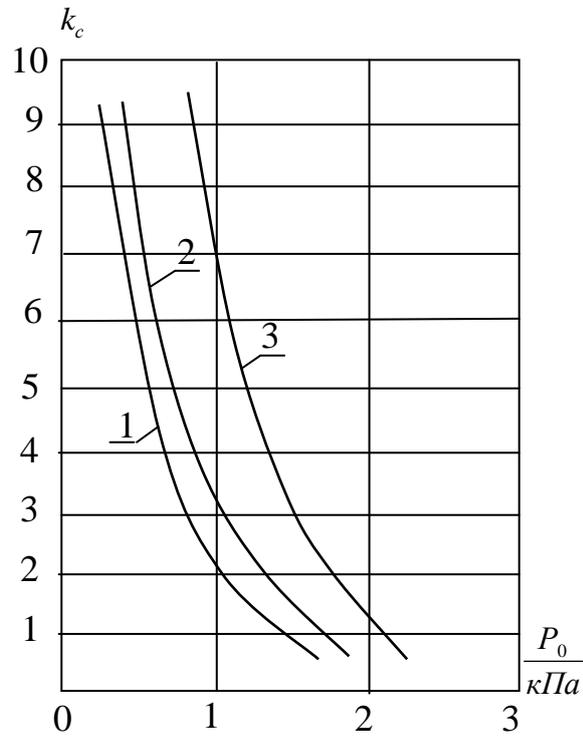


Рисунок 3.15 – Зависимость коэффициента  $k_c$  от давления после вентиля 7 при давлении в туннельной печи  $P_0$ , кПа, равном: 1 – 1,8; 2 – 2; 3 – 2,4

На рисунке 3.16 представлены зависимости  $k_c = f(P_0)$  по уравнению (3.31) при  $P_{10} = const$ ,  $P_{10} = 4$  кПа и  $P_{30} = 0,4; 0,6; 0,8$  кПа.

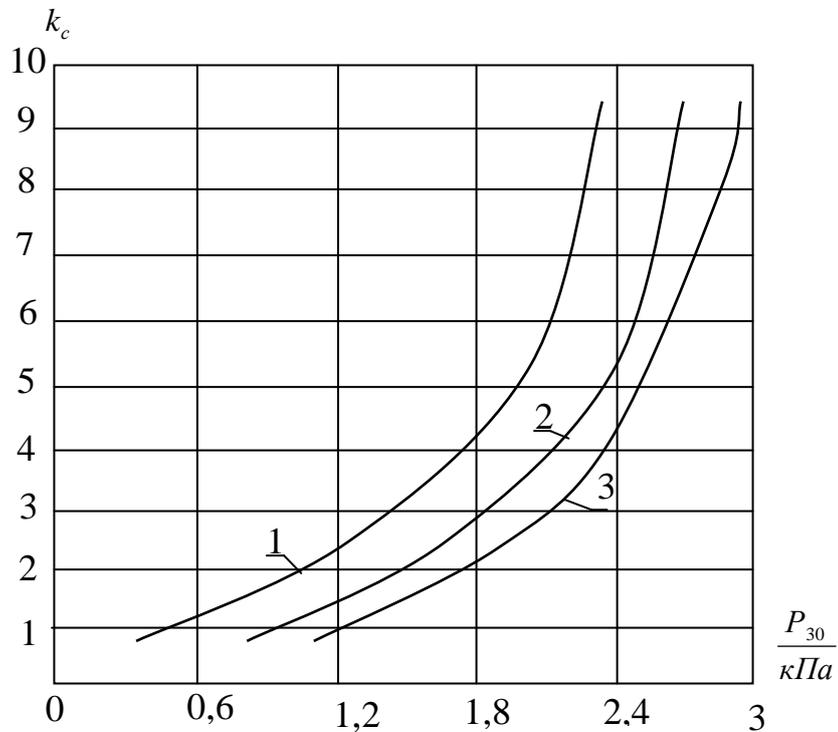


Рисунок 3.16 – Зависимость коэффициента  $k_c$  от давления в туннельной печи  $P_0$  при  $P_{30}$  равном, кПа: 1 – 0,4; 2 – 0,6; 3 – 0,8

Анализируя полученные кривые на рисунке 3.16, можно сделать вывод, что коэффициент самовыравнивания  $k_c$  необходимо повышать при увеличении давления в туннельной печи  $P_0$ , тем самым увеличивается разрежение на выходе  $P_{30}$ .

На рисунке 3.17 представлены графики зависимости  $k_c = f(P_{10})$  по уравнению (3.31) при  $P_0 = const$ ,  $P_{30} = 0,6$  кПа и  $P_{30} = 0,8; 1$  кПа.

Из анализа графиков на рисунке 3.17 следует, что, если увеличивается давление ГВС на входе туннельной печи, тогда коэффициент самовыравнивания  $k_c$  необходимо понижать, для того чтобы поддерживать давление в туннельной печи  $P_0$  постоянным. Сравнивая графики на рисунке 3.6 и рисунке 3.17 при давлении в туннельной печи  $P_0 = 2$  кПа и ниже, можно заметить, что эти зависимости совпадают, то есть изменения относительных переменных величин  $m(t)$  и  $c(t)$  при малых давлениях  $P_0$  идентичны.

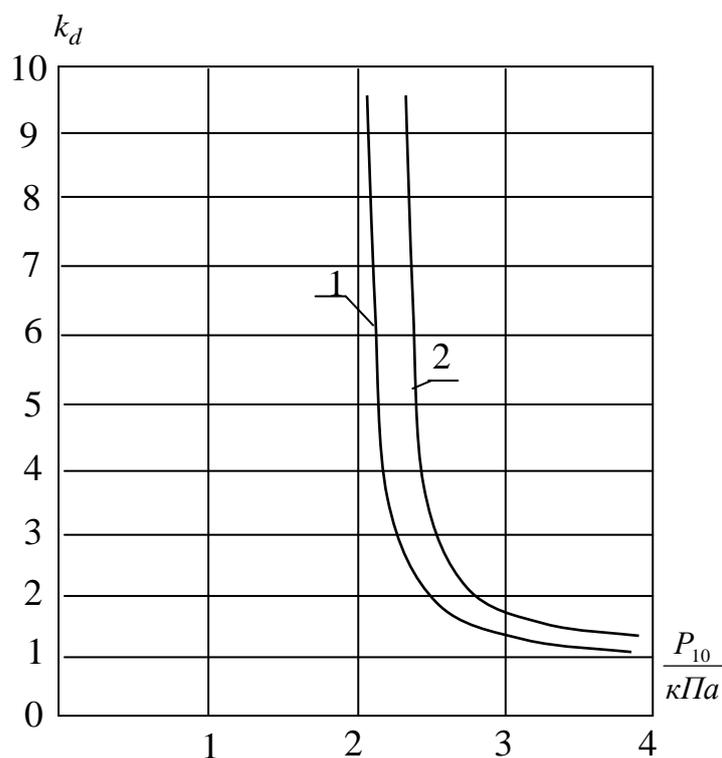


Рисунок 3.17 – Зависимость коэффициента  $k_c$  от давления ГВС на входе в туннельную печь  $P_{10}$  при постоянном разрежении на выходе  $P_{30}$  и давлении  $P_0$ , кПа, равном: 1 – 2; 2 – 2,5

Проведенный анализ показывает, что для конкретных случаев работы туннельной печи влияние технологических параметров на динамические

характеристики туннельной печи как объекта оптимального проектирования и зная значение коэффициента самовыравнивания и постоянную времени, можно определить давление в туннельной печи. С помощью полученных формул и графиков можно определить оптимальные значения параметров туннельной печи.

Определим оптимальные значения параметров туннельной печи на Стерлитамакском кирпичном заводе (г. Стерлитамак, Республика Башкортостан) по переменной относительной величине  $m(t)$ . Давление в туннельной печи  $P_0 = 2$  кПа.  $G_0 = 1250$  м<sup>3</sup>/ч,  $P_{10} = 4$  кПа,  $V_2 = 54,3$  м<sup>3</sup>. Для газа (метана) газовая постоянная  $R = 52,89$  м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> К,  $T$  – абсолютная температура  $T = 273 + 20 = 293$  К. Определим для этих значений постоянную времени по формуле (3.2):

Подставив значение для  $P_{10} = 4$  кПа,  $P_{30} = 0,6$  кПа,  $P_{0 \text{ min}} = 1,55$  кПа в уравнение (3.2), получим:

$$T_c = \frac{54,3 \cdot 625}{1250 \cdot 52,89 \cdot 293} = 2803,1 \text{ (с)},$$

Также эти значения постоянной времени можно определить по графикам на рисунке 3.4.

На рисунке 3.4 представлена зависимость  $T_a = f(P_0)$ . Определяем, что при  $G_0 = 1250$  м<sup>3</sup>/ч,  $T_a = 1690,06 \cdot P_0$ .

Коэффициент  $k_l$  в этом случае определяется по графикам на рисунке 3.2 равно 1,07. По полученным значениям устанавливаются оптимальные значения давления газов внутри туннельной печи.

Таким образом, в зависимости от режима работы туннельной печи по всем коэффициентам, входящим в уравнение 3.1, можно определить оптимальные значения параметров для систем оптимального проектирования по давлению ГВС. Помимо этого, если давление внутри туннельной печи неизвестно, а известны значения давления на входе и разряжения на выходе, тогда по полученным формулам и графикам его можно определить. Например, если давление ГВС на входе туннельной печи  $P_{10} = 4$  кПа, а разряжение на выходе  $P_{30} = 0,6$  кПа, то давление внутри туннельной печи определяется по формуле (3.14) и равно:

$$P_0 = \sqrt{4 \cdot 0,6} = 1,55 \text{ кПа.}$$

Значение коэффициента  $k_{1\min}$  определяется по формуле (3.15) и оно равно:

$$k_{1\min} = \frac{1}{1 - \sqrt{\frac{0,6}{4}}} = 1,6.$$

Зная значение давления внутри туннельной печи, по формуле (3.2) определяем значение постоянной времени  $T_{\zeta} = 1690,06$  с.

Проделанный анализ показывает, какие технологические параметры и каким образом влияют на характеристики туннельной печи. В анализе рассматривалось давление и расход ГВС и НГ. Для остальных параметров графики, формулы давления и расхода идентичны. В зависимости от режима работы туннельной печи можно с помощью полученных формул или графически определить оптимальные параметры туннельной печи. Установленные рациональные соотношения технологических параметров туннельной печи позволяют существенно повысить качество керамического кирпича.

### **3.3 Разработка алгоритма управления туннельной печью на основе логических регуляторов**

Тепловую обработку керамического кирпича проводят по технологическому режиму, заданному заранее. Отклонение от режима работы ведет к появлению брака в изделиях. Поэтому необходимо контролировать работу печи с целью предупреждения отклонений от установленного режима.

Существующие системы управления обычно реализуются на ПИД-регуляторах, которые обладают большой погрешностью регулирования, так как туннельная печь является объектом нелинейным и многомерным, процессы, протекающие в ней, являются сложными, поэтому их достаточно сложно описать достоверными математическими моделями [67,68].

Для автоматизации многомерных объектов возможно применить четкие логические регуляторы с интервальной неопределенностью (ЧЛРСИН), так как они лишены вышеперечисленных недостатков ПИД-регуляторов и описание

регулирования происходит с использованием словесных образов. В них с помощью специальных систем продукционных правил выполняются задачи по компенсации взаимного влияния контуров регулирования. На рисунке 3.18 представлена конструкция туннельной печи отдельно для зоны обжига.



Рисунок 3.18 – Схематическая конструкция зоны обжига керамического кирпича туннельной печи

Зона обжига 1 разделена на семь групп - это горелочные группы. В каждой горелочной группе 5 имеются по 13-14 шт. горелок без электророзжига. Природный газ подается по газовому коллектору 2 через вентили ( $F_3 - F_9$ ) с ручным приводом. Подача ГВС осуществляется через регулируемые вентили ( $F_{10} - F_{23}$ ). Контроль разряжения ДГ осуществляется в начале зоны обжига и в четвертой группе, а температура в семи точках измеряется датчиками ( $T_1 - T_7$ ). В трубопроводе 3 перед вентилятором отбора ДГ и регулируемого вентиля  $F_1$  установлена поворотная заслонка 7, которая вращается от электрического двигателя 9 через понижающий редуктор 8 с частотой 3-7 оборотов в минуту и периодически изменяет разрежение в зонах обжига. По направлению 4 отводится НГ через регулируемый вентиль  $F_2$  в зону подготовки керамических изделий.

Предложенная конструкция туннельной печи в зоне обжига за счет регулирования разряжения ДГ и температуры в семи точках позволяет равномерно и за меньшее время производить обжиг керамических кирпичей [68,69].

На рисунке 3.19 изображена концептуальная модель зоны обжига туннельной печи. Концептуальная модель имеет иерархическую структуру. Входными переменными являются  $F_{3-9}$  (расход природного газа) и  $F_{17-23}$  (расход атмосферного воздуха на процесс горения), а выходными –  $F_{10-16}$  и  $F_{24-30}$  (расходы ДГ и НГ) и расположены на первом уровне иерархии.

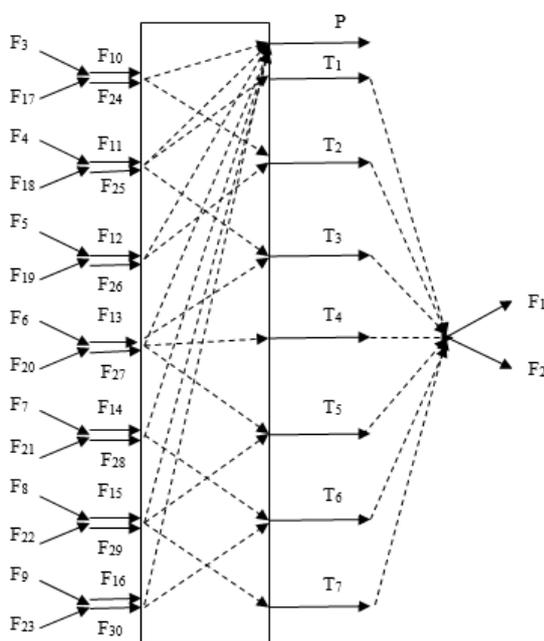


Рисунок 3.19 – Концептуальная модель зоны обжига туннельной печи

Входные переменные второго уровня иерархии модели ( $T_1 \div T_7$ ) – показания датчиков температуры в семи точках и давления  $P$  внутри туннельной печи в зоне обжига. Природный газ и атмосферный воздух поступают в газовые горелки, и происходит горение ГВС. Температура горения изменяется в пределах от 600 – 1000 °С, горелочная группа нагревает не только «свою» (сплошные линии), но и смежные (штриховые линии) зоны рабочего пространства в процессе обжига.

Исходя из этого, туннельную печь можно представить как многосвязный семи-мерный объект управления.

Третий уровень иерархии представлен таким образом, что выходные переменные второго уровня являются входными переменными для него  $F_1 - F_2$  (расход ДГ и расход газов на нагрев изделий).

Рассмотрим используемый алгоритм регулирования температуры с ПИД-регуляторами при постоянном давлении в туннельной печи №2 ООО «Стерлитамакский кирпичный завод», представленный на рисунке 3.20.

Стадия обжига наступает после достижения в туннельной печи температуры  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  при полностью открытых вентилях  $F_{10} \div F_{16}$  и постоянном давлении ГВС. Для придания керамическим кирпичам необходимой прочности, в туннельной печи необходимо поддерживать температуру  $980\text{ }^{\circ}\text{C} - 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  с погрешностью  $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 9 часов и разряжение ДГ -  $0,260\text{ кПа}$ . В сущности, регулирование в данном случае сводится к уменьшению погрешностей температурного режима, чтобы процесс обжига керамического кирпича протекал плавно, без отклонений, и поэтому регуляторы, установленные в зоне обжига туннельной печи, из-за естественного рассеивания тепловой энергии должны работать без перерегулирования и только повышать температуру, которая понижается.

В качестве исходных данных используются такие значения:  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7$  – значения температур каждой зоны обжига керамического кирпича.

В блоке 1 описываются величины температур каждой зоны обжига керамического кирпича  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7$ . Во 2 блоке происходит считывание значений переменных величин. В 3 блоке происходит сравнение полученного значения температуры с заданным значением. Если текущее значение меньше заданного, тогда сигнал от системы управления через ПИД-регулятор 4 поступает на исполнительный механизм, который увеличивает открытие вентиля, установленного перед газовой горелкой, на определенную величину, происходит горение и температура в зоне обжига увеличивается. Если температура в туннельной печи больше заданного значения, тогда сигнал из блока 6 поступает на исполнительный

механизм и уменьшается открытие регулирующего вентиля, установленного перед газовой грелкой.

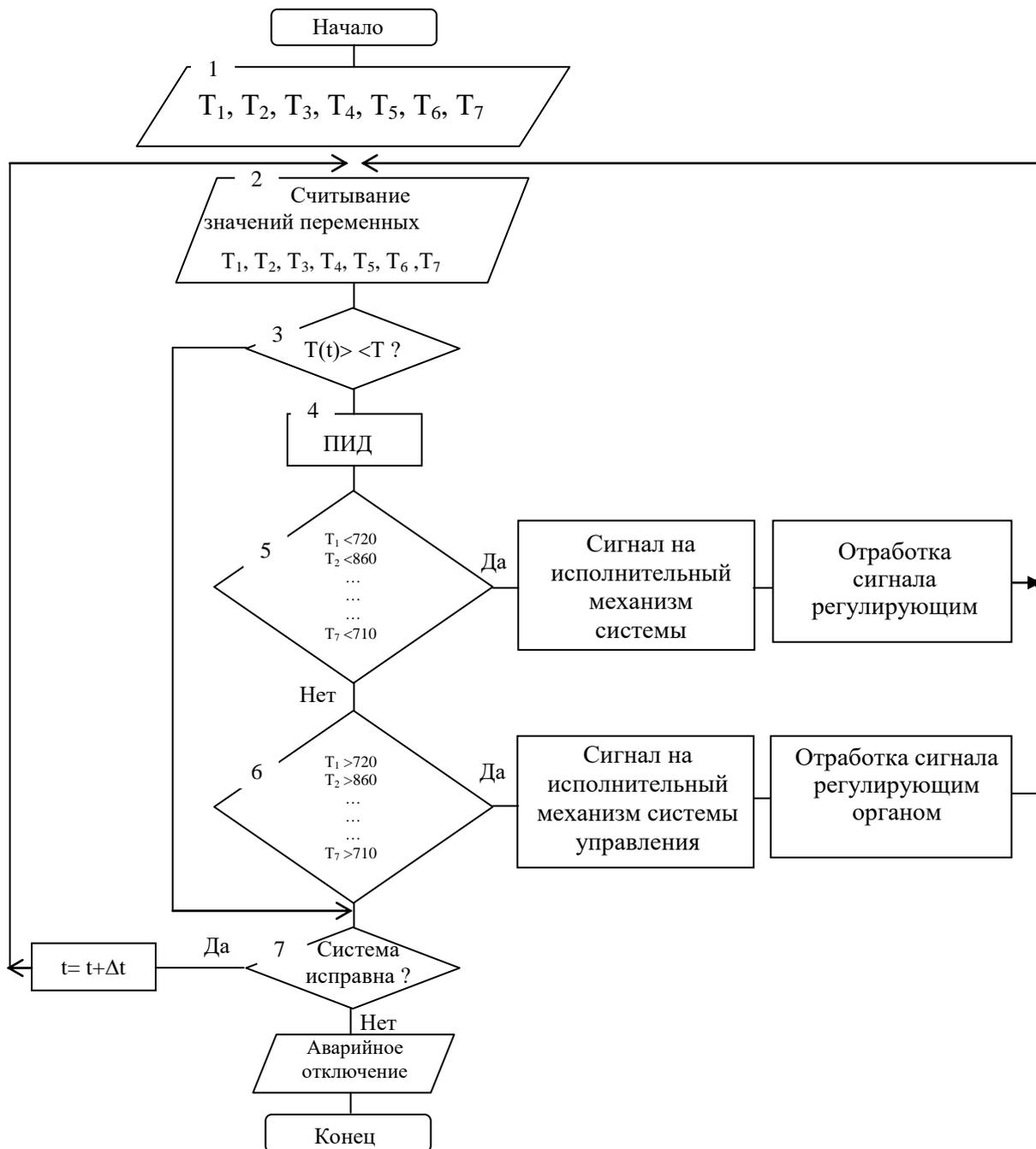


Рисунок 3.20 – Схема алгоритма регулирования температуры в зоне обжига с ПИД-регуляторами при постоянном давлении

В блоке 1 описываются величины температур каждой зоны обжига керамического кирпича  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7$ . Во 2 блоке происходит считывание значений переменных величин. В 3 блоке происходит сравнение полученного

значения температуры с заданным значением. Если текущее значение меньше заданного, тогда сигнал от системы управления через ПИД-регулятор 4 поступает на исполнительный механизм, который увеличивает открытие вентиля, установленного перед газовой горелкой, на определенную величину, происходит горение и температура в зоне обжига увеличивается. Если температура в туннельной печи больше заданного значения, тогда сигнал из блока 6 поступает на исполнительный механизм и уменьшается открытие регулирующего вентиля, установленного перед газовой грелкой.

При равенстве вычисленного значения температуры заданному в зоне обжига туннельной печи в блоке 7 происходит диагностирование исправности системы. Если система неисправна, то происходит аварийное отключение и программа прекращает работу.

Использование в качестве регулирования температуры классических ПИД- и типовых нечетких регуляторов (ТНР) [70,71,72,73] является низко- эффективным по следующим причинам:

- туннельная печь является многосвязным объектом управления по регулированию температуры зоны обжига с семью взаимосвязанными параметрами, однако при использовании ТНР или ПИД-регуляторов эта взаимосвязь не учитывается, тем самым снижается качество регулирования;
- ТНР и ПИД-регуляторы обладают низким быстродействием и большой погрешностью.

На основании проведенного системного анализа работы существующих систем управления туннельными печами в качестве регуляторов температуры в зоне обжига выбраны четкие логические регуляторы с интервальной неопределенностью (ЧЛРСИН), так как физические процессы, которые протекают в зоне обжига туннельной печи, не имеют достоверных и адекватных математических моделей.

Разработанная логическая схема алгоритма регулирования температуры на стадии обжига при постоянном давлении ГВС с применением ЧЛРСИН представлена на рисунке 3.21.

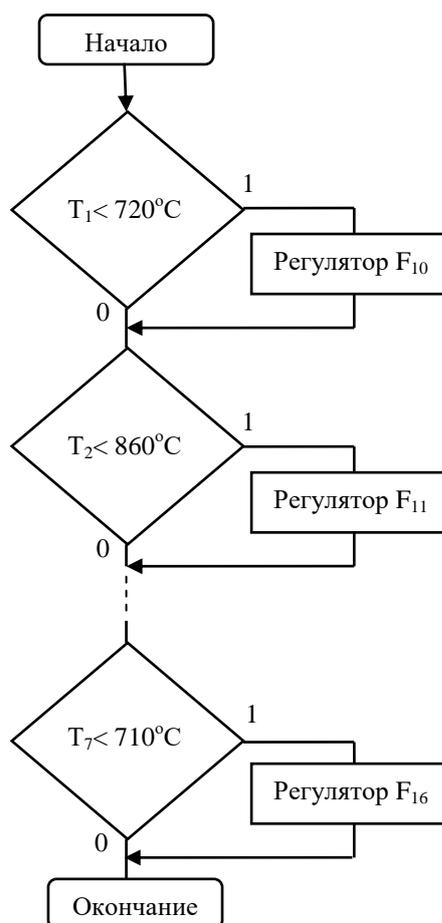


Рисунок 3.21 – Логическая схема алгоритма регулирования температуры на стадии обжига при постоянном давлении газовоздушной смеси

Функции компенсации взаимовлияния контуров регулирования описываются совокупностью четких термов и интерпретацией выходных и входных переменных в многомерных ЧЛРСИН с применением краеугольного принципа построения [74,75]. На рисунке 3.22 представлен регулируемый параметр  $T_1$  описанный 20 четкими термами  $T_{10-}, T_{9-}, \dots, T_{1-}, T_{1+}, T_{2+}, \dots, T_{9+}, T_{10+}$ , у которых задний фронт представлен мягкими, а передний – жесткими неравенствами (например,  $717\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{1+} \leq 720\text{ }^{\circ}\text{C}$  и т.д.). Ширина у термов  $T_{10-}, T_{9-}, \dots, T_{1-}, T_{1+}, T_{2+}, \dots, T_{3+}, T_{4+}$  равна  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а у термов  $T_{9+}, T_{10+}$  – в 2 раза больше. Интерпретирование остальных регулируемых параметров  $T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$  и  $T_7$  происходит аналогичным образом.

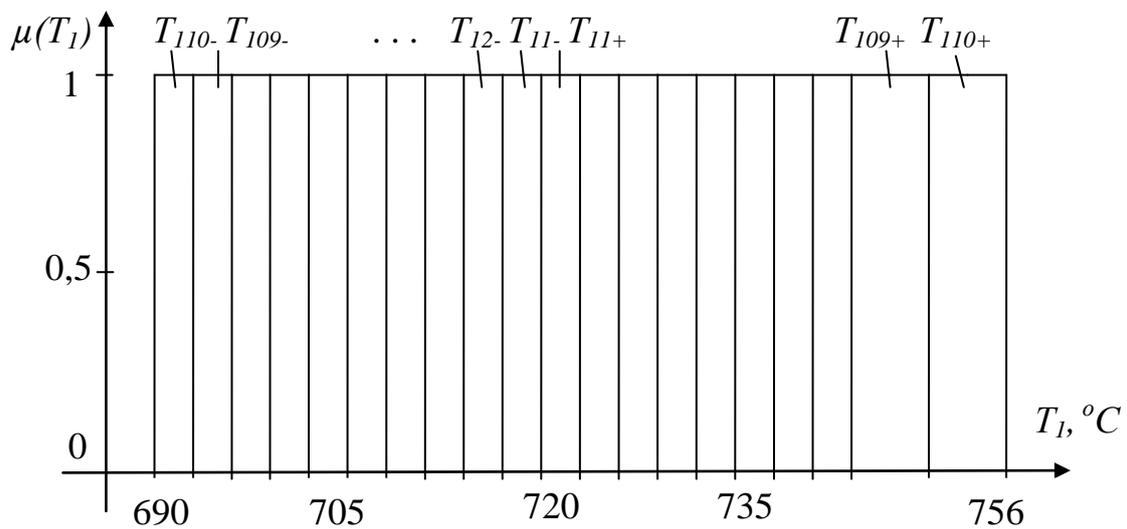


Рисунок 3.22 – Интерпретация регулируемого параметра  $T_1$  совокупностью четких термов

На рисунке 3.23 показано интерпретирование регулирующего параметра  $F_{10}$ , состоящего из 10 четких термов  $F_{10} \div F_{16}$ , ширина которых зависит от полного открытия вентиля и составляет 3 %.

Совокупность терм-множеств имеет следующее аналитическое выражение:

$$T_1(F_{10}) = \sum_{i=1}^{10} F_{10i} \cdot ((i-1) \cdot 3 \leq F_{10} < i \cdot 3) \quad (3.34)$$

где  $i$  – номер четкого терма

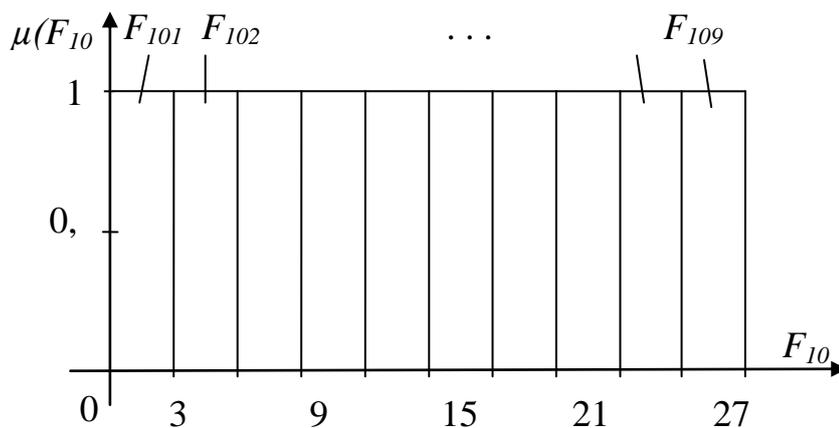


Рисунок 3.23 – Интерпретация регулирующего параметра  $F_{10}$  совокупностью четких термов

Интерпретирование регулирующего параметра  $F_{16}$  совокупностью четких термов будет производиться аналогичным образом.

Терм-множества регулирующих параметров  $F_{11}$ ,  $F_{12}$ ,  $F_{13}$ ,  $F_{14}$ , и  $F_{15}$  аналогичны предыдущим (рисунки 3.24, 3.25), за исключением ширины их термов, и имеют следующий вид:

$$T_2(F_{11}) = \sum_{i=1}^{10} F_{11i} \cdot ((i-1) \cdot 4 \leq F_{11} < i \cdot 4) \quad (3.35)$$

$$T_3(F_{12}) = \sum_{i=1}^{10} F_{12i} \cdot ((i-1) \cdot 5 \leq F_{12} < i \cdot 5) \quad (3.36)$$

Знак суммы в выражениях (3.35) ÷ (3.36) означает совокупность четких термов.

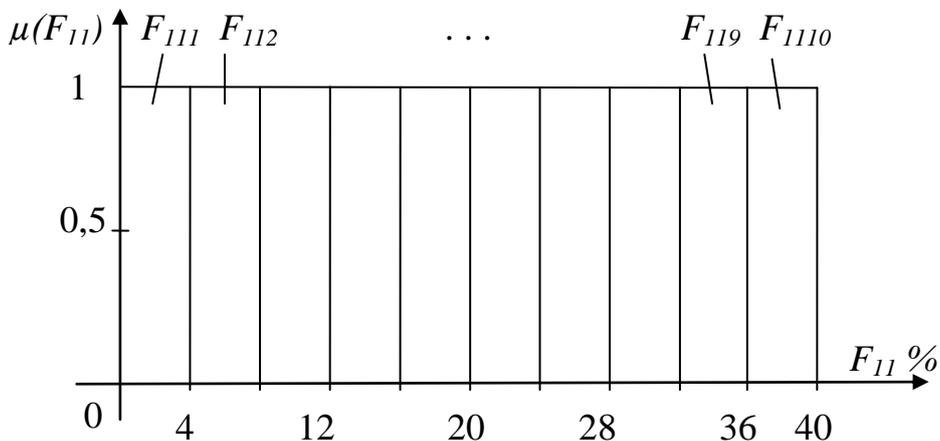


Рисунок 3.24 – Интерпретация регулирующего параметра  $F_{11}$  совокупностью четких термов

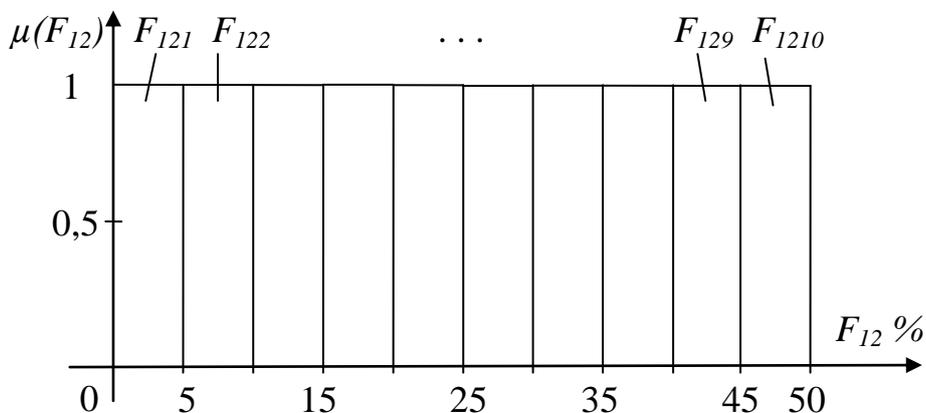


Рисунок 3.25 – Интерпретация регулирующего параметра  $F_{12}$  совокупностью четких термов

При автоматизации сложных многосвязных и нелинейных объектов управления преимуществом ЧЛРСИН перед ТНР и ПИД-регуляторами является высокое быстродействие и низкая погрешность [76,77,78,79]. Поэтому можно построить МЧРСИН с хорошей компенсацией взаимного влияния контуров регулирования. Исходные данные для разработки компенсатора взаимного влияния для каждого контура регулирования (при и многосвязном, и автономном режиме работы) получаем из эксперимента МЧРСИН из двух характеристик (вход-выход).

В туннельной печи в зоне обжига расположены регуляторы температуры, по одному в каждой зоне обжига – это семь зон и семь регуляторов.

В работе построены характеристики (вход-выход) для семи регуляторов температуры для зоны обжига туннельной печи (рисунки 3.26 – 3.28) [80,81,82,83]. На рисунке 3.26 показаны характеристики (вход-выход) для многосвязного  $T_{1м} = f(F_{10})$  и для автономного  $T_{1а} = f(F_{10})$  режимов работы регулятора, относящиеся к вентилю  $F_{10}$ . Их разность по оси ординат представлена функцией влияния всех остальных контуров регулирования на контур  $T_1$ :  $T_{1б} = T_{1м} - T_{1а}$ .

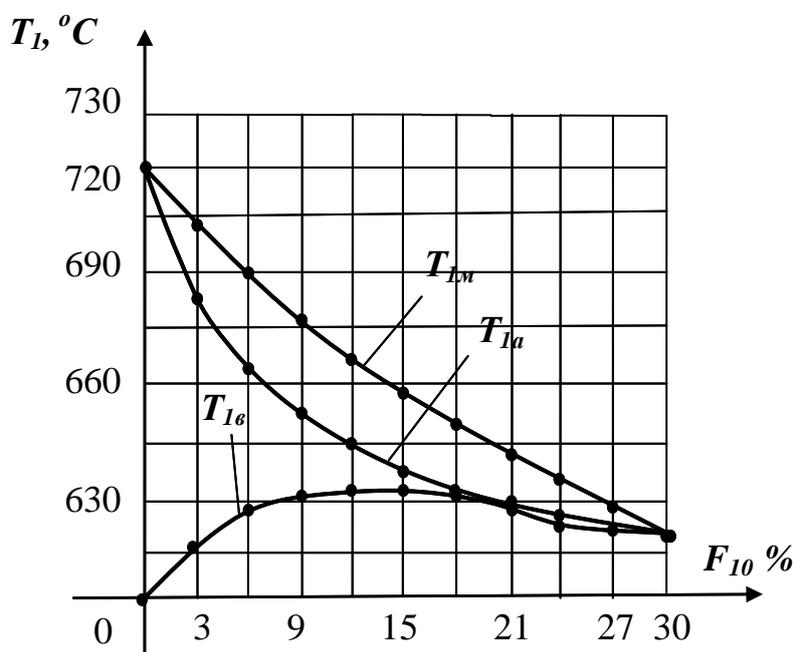


Рисунок 3.26 – График характеристик регулятора  $T_1$  в многосвязном ( $T_{1м}$ ) и в автономном ( $T_{1а}$ ) режиме работы

Полученные кривые на рисунках 3.27, 3.28 являются аналогичными. Из-за конструкции туннельной печи характеристики (выход-вход) регулятора  $T_7$  такие же, как и у регулятора  $T_1$ , также аналогичные характеристики имеют  $T_5$  с  $T_3$  и  $T_6$  с  $T_2$ .

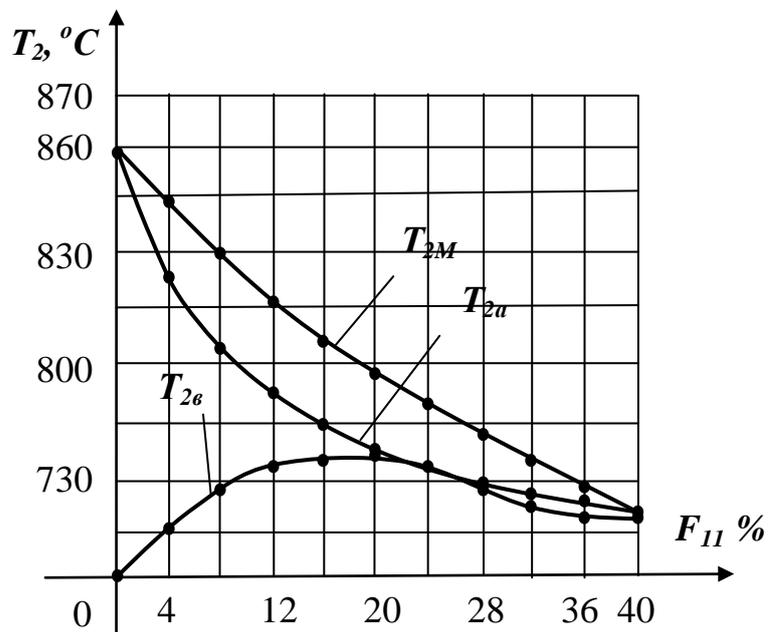


Рисунок 3.27 – График характеристик регулятора  $T_2$ , в многосвязном ( $T_{1M}$ ) и в автономном ( $T_{1a}$ ) режиме работы

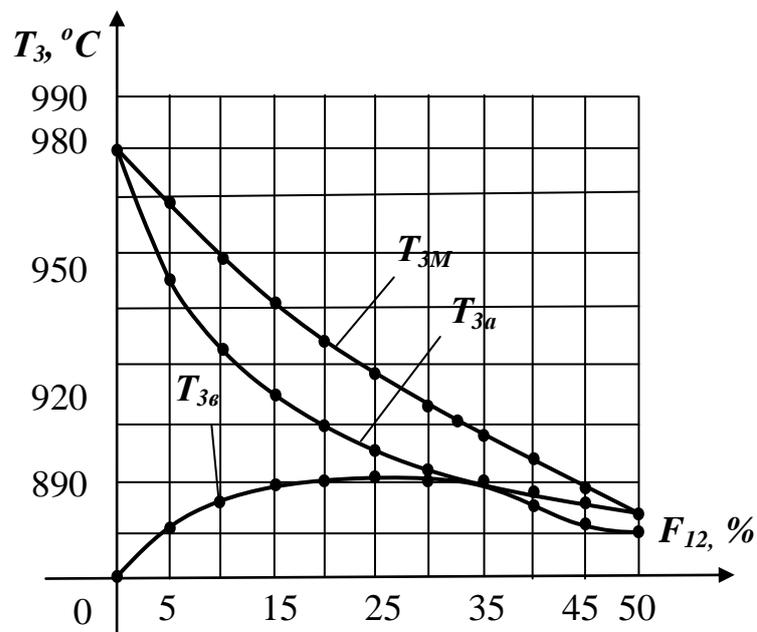


Рисунок 3.28 – График характеристик регулятора  $T_3$ , в многосвязном ( $T_{1M}$ ) и в автономном ( $T_{1a}$ ) режиме работы

Для повышения показателей качества регулирования у МЧРСИН необходимо разработать компенсаторы взаимного влияния контуров регулирования. На рисунках 3.26 – 3.28 использовались функции влияния  $T_{16} \div T_{76}$  регуляторов температуры туннельной печи в зоне обжига керамического кирпича.

Компенсацией является генерация в операционной среде каждого контура регулирования, программно реализованного МЧРСИН функциями, которые являются зеркальным отображением функций  $T_{16} \div T_{76}$  относительно оси абсцисс. Таким образом, получаются новые функции, которые интерпретируются совокупностью четких термов и используются для построения специальной системы продукционных правил.

На рисунках 3.29 – 3.31 представлены функции компенсации  $T_{1к} \div T_{7к}$ , построенные в результате зеркализации относительно оси абсцисс функций влияния  $T_{16} \div T_{76}$ . В программной реализации функции  $T_{1к} \div T_{7к}$  представлены совокупностью из десяти четких термов. Рассмотрим функцию  $T_{1к}$  изображенную на рисунке 3.29, где зеркализация функции  $T_{16}$  относительно оси абсцисс, покрывающей диапазоны изменения регулирующего параметра  $F_{10}$ , равного 30 %, заменяется термами  $T_{1к1} \div T_{1к10}$  шириной, равной 3 %. Изображенные на рисунках 3.30 ÷ 3.31 компенсационные функции построены аналогично и имеют аналогичные параметры по отношению к функции  $T_1$ .

На рисунках 3.29 – 3.31 представлены компенсационные функции  $T_{1к} \div T_{3к}$ , которым соответствуют следующие аналитические выражения универсальных термножеств:

$$T_{1к} = \sum_{i=1}^{10} T_{1ki} \cdot ((i-1) \cdot 3 \leq t_{1к} < i \cdot 3) \quad (3.37)$$

$$T_{2к} = \sum_{i=1}^{10} T_{2ki} \cdot ((i-1) \cdot 4 \leq t_{2к} < i \cdot 4) \quad (3.38)$$

$$T_{3к} = \sum_{i=1}^{10} T_{3ki} \cdot ((i-1) \cdot 5 \leq t_{3к} < i \cdot 5) \quad (3.39)$$

где  $i$  – номер четкого терма

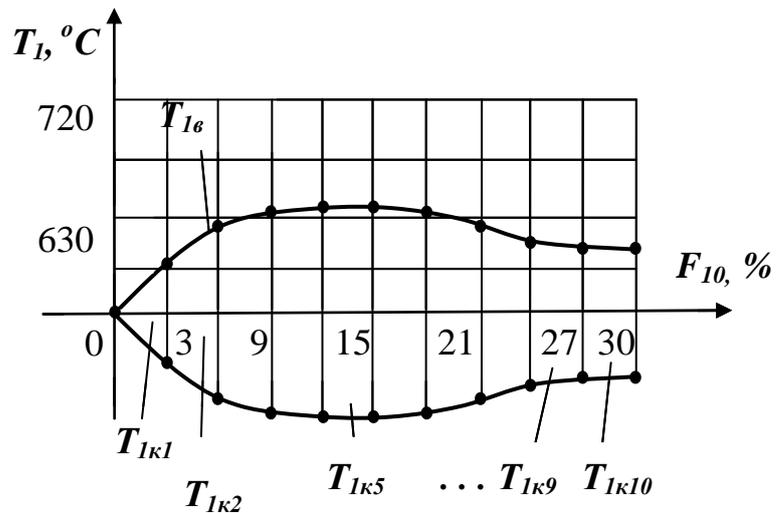


Рисунок 3.29 – Совокупность четких термов  $T_{1k1} \div T_{1k10}$  интерпретированные компенсационной функцией  $T_{1k}$

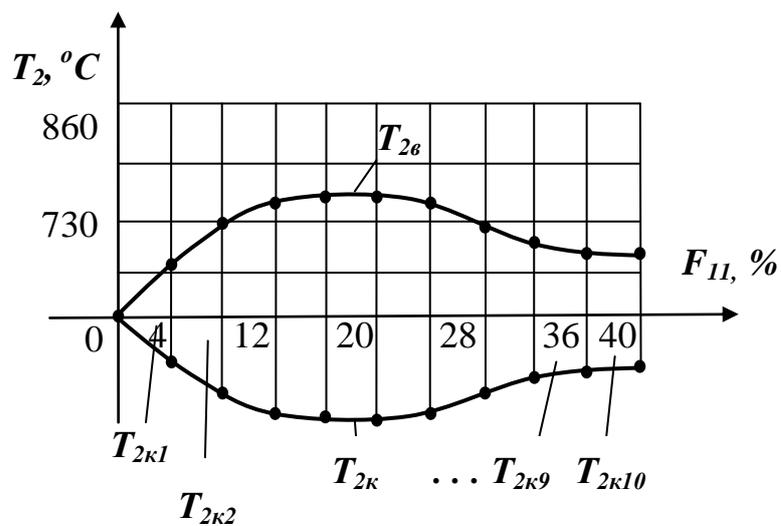


Рисунок 3.30 – Совокупность четких термов  $T_{2k1} \div T_{2k10}$  интерпретированные компенсационной функцией  $T_{2k}$

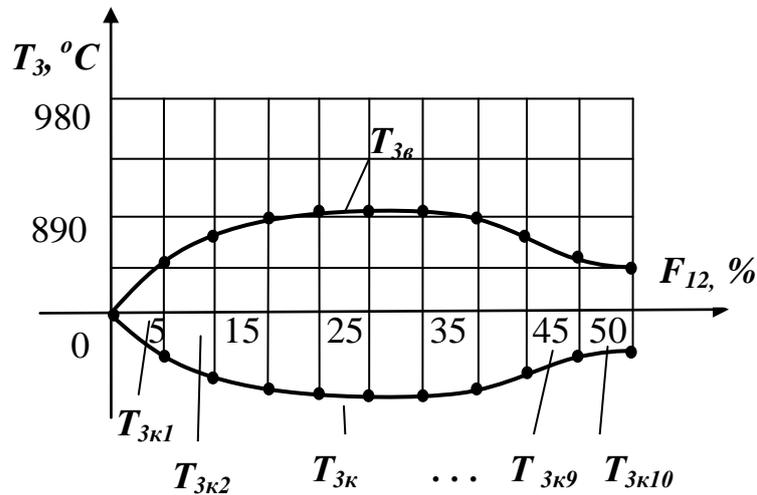


Рисунок 3.31 – Совокупность четких термов  $T_{3k1} \div T_{3k10}$  интерпретированные компенсационной функцией  $T_{3k}$

С помощью компенсационных функций можно изменить структуру программы реализующей МЧРСИН температуры в туннельной печи в зоне обжига керамического кирпича. Рассмотрим рисунок 3.32, на котором для каждого контура регулирования в программе с регулирующими (РСПП<sub>T1</sub> ÷ РСПП<sub>T7</sub>) производственными правилами имеются компенсирующие (КСПП<sub>T1</sub> ÷ КСПП<sub>T7</sub>) производственные правила.

После компенсации происходит повышение показателей качества регулирования температуры в зоне обжига, и взаимное влияние контуров регулирования сводится к минимуму [84].

С помощью замены регулируемых ( $T_1 \div T_7$ ) и регулирующих ( $F_{10} \div F_{16}$ ) параметров совокупностью четких термов построена специальная система производственных правил для семиконтурного четкого регулятора. Рассмотрим структуру для контура  $T_1$  с регулируемым параметром, имеющую следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Если } T_1 = T_{11+} \vee T_{12+} \dots \vee T_{109+} \vee T_{110+}, \text{ то } F_{10} = 0; \\ \text{Если } T_1 = T_{11-}, \text{ то } F_{10} = F_{101} \vee T_{1k1}; \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \text{Если } T_1 = T_{109-}, \text{ то } F_{10} = F_{109} \vee T_{1k9}; \\ \text{Если } T_1 = T_{110-}, \text{ то } F_{10} = F_{1010} \vee T_{1k10}; \end{array} \right. \quad (3.40)$$

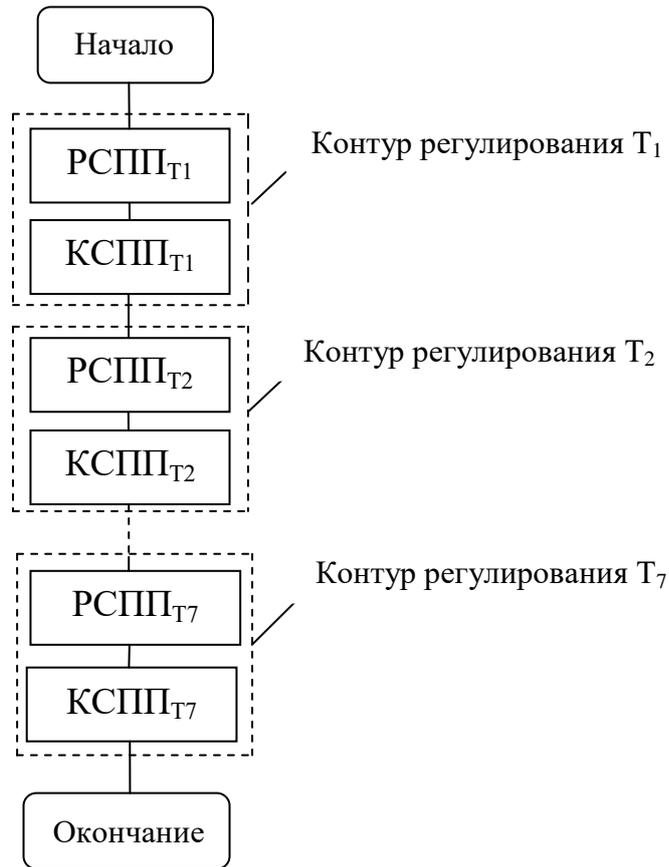


Рисунок 3.32 – Программная структура семимерного четкого логического регулятора с компенсацией взаимного влияния контуров регулирования

Из полученной системы видно (3.40), что значение параметра  $T_l$  с погрешностью  $\pm 3$  °С поддерживается на уровне 720 °С (рисунок 3.22), а для компенсации влияния других контуров регулирования на параметр  $T_l$ , для построения специальных продукционных правил введены четкие термы  $T_{1kl} \div T_{1k7}$ .

Аналогичную структуру имеют системы продукционных правил, которые представлены в системах (3.41÷3.46) и относятся к регулируемым параметрам  $T_2 \div T_7$ .

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{Если } T_2 = T_{21+} \vee T_{22+} \dots \vee T_{209+} \vee T_{210+}, \text{ то } F_{11} = 0; \\
 \text{Если } T_2 = T_{21-}, \text{ то } F_{11} = F_{111} \vee T_{2k1}; \\
 \dots \\
 \dots \\
 \text{Если } T_2 = T_{29-}, \text{ то } F_{11} = F_{119} \vee T_{2k9}; \\
 \text{Если } T_2 = T_{210-}, \text{ то } F_{11} = F_{1110} \vee T_{2k10}.
 \end{array} \right. \quad (3.41)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Если } T_3 = T_{31+} \nu T_{32+} \dots \nu T_{309+} \nu T_{310+}, \text{ то } F_{12} = 0; \\ \text{Если } T_3 = T_{31-}, \text{ то } F_{12} = F_{121} \nu T_{3k1}; \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \text{Если } T_3 = T_{39-}, \text{ то } F_{12} = F_{129} \nu T_{3k9}; \\ \text{Если } T_3 = T_{310-}, \text{ то } F_{12} = F_{1210} \nu T_{3k10}. \end{array} \right. \quad (3.42)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Если } T_4 = T_{41+} \nu T_{42+} \dots \nu T_{409+} \nu T_{410+}, \text{ то } F_{13} = 0; \\ \text{Если } T_4 = T_{41-}, \text{ то } F_{13} = F_{131} \nu T_{4k1}; \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \text{Если } T_4 = T_{49-}, \text{ то } F_{13} = F_{139} \nu T_{4k9}; \\ \text{Если } T_4 = T_{410-}, \text{ то } F_{13} = F_{1310} \nu T_{4k10}. \end{array} \right. \quad (3.43)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Если } T_5 = T_{51+} \nu T_{52+} \dots \nu T_{509+} \nu T_{510+}, \text{ то } F_{14} = 0; \\ \text{Если } T_5 = T_{51-}, \text{ то } F_{14} = F_{141} \nu T_{5k1}; \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \text{Если } T_5 = T_{59-}, \text{ то } F_{14} = F_{149} \nu T_{5k9}; \\ \text{Если } T_5 = T_{510-}, \text{ то } F_{14} = F_{1410} \nu T_{5k10}. \end{array} \right. \quad (3.44)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Если } T_6 = T_{61+} \nu T_{62+} \dots \nu T_{609+} \nu T_{610+}, \text{ то } F_{15} = 0; \\ \text{Если } T_6 = T_{61-}, \text{ то } F_{15} = F_{151} \nu T_{6k1}; \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \text{Если } T_6 = T_{69-}, \text{ то } F_{15} = F_{159} \nu T_{6k9}; \\ \text{Если } T_6 = T_{610-}, \text{ то } F_{15} = F_{1510} \nu T_{6k10}. \end{array} \right. \quad (3.45)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Если } T_7 = T_{71+} \nu T_{72+} \dots \nu T_{709+} \nu T_{710+}, \text{ то } F_{16} = 0; \\ \text{Если } T_7 = T_{71-}, \text{ то } F_{16} = F_{161} \nu T_{7k1}; \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \text{Если } T_7 = T_{79-}, \text{ то } F_{16} = F_{169} \nu T_{7k9}; \\ \text{Если } T_7 = T_{710-}, \text{ то } F_{16} = F_{1610} \nu T_{7k10}. \end{array} \right. \quad (3.46)$$

Таким образом, разработан алгоритм обжига керамического кирпича при постоянном давлении ГВС и разряджении ДГ, в котором с целью снижения брака в

зоне обжига, для стабилизации температуры с погрешностью  $\pm 3$  °С, применяется семимерный четкий регулятор с компенсацией взаимного влияния контуров регулирования и дополнительной системой производственных правил.

### **3.4 Разработка алгоритма управления процессом обжига керамического кирпича в туннельной печи по давлению газовой смеси**

Разработанный алгоритм управления процессом обжига керамического кирпича в туннельной печи по давлению ГВС представлен на рисунке 3.33. В основе его работы положено математическое описание процесса обжига в туннельной печи как объекта АУ по давлению ГВС, которое представлено во втором разделе диссертационной работы.

Как было установлено, на давление ГВС в туннельной печи существенное влияние оказывает температурный режим работы печей, площади проходных сечений вентилях, которые находятся на трубопроводах 1 и 5 (рисунок 2.1). Для повышения качества и снижения брака керамического кирпича необходимо поддерживать заданное значение давления ГВС и разряжения ДГ и НГ. Используя разработанные математические модели, с учетом возможных возмущений и заданных требований, создадим схему алгоритма цифрового управления процессом обжига [85,86,87,88].

В качестве исходных данных используем такие значения:  $F_1, F_3$  – площади проходных сечений вентилях, установленных на выходных и входных трубопроводах туннельной печи обжига керамического кирпича, м<sup>2</sup>;  $P_1, P_3$  – давление ГВС в туннельную печь и разряжение НГ из туннельной печи, кПа;  $P_0$  – текущее значение давления в зоне обжига, кПа.

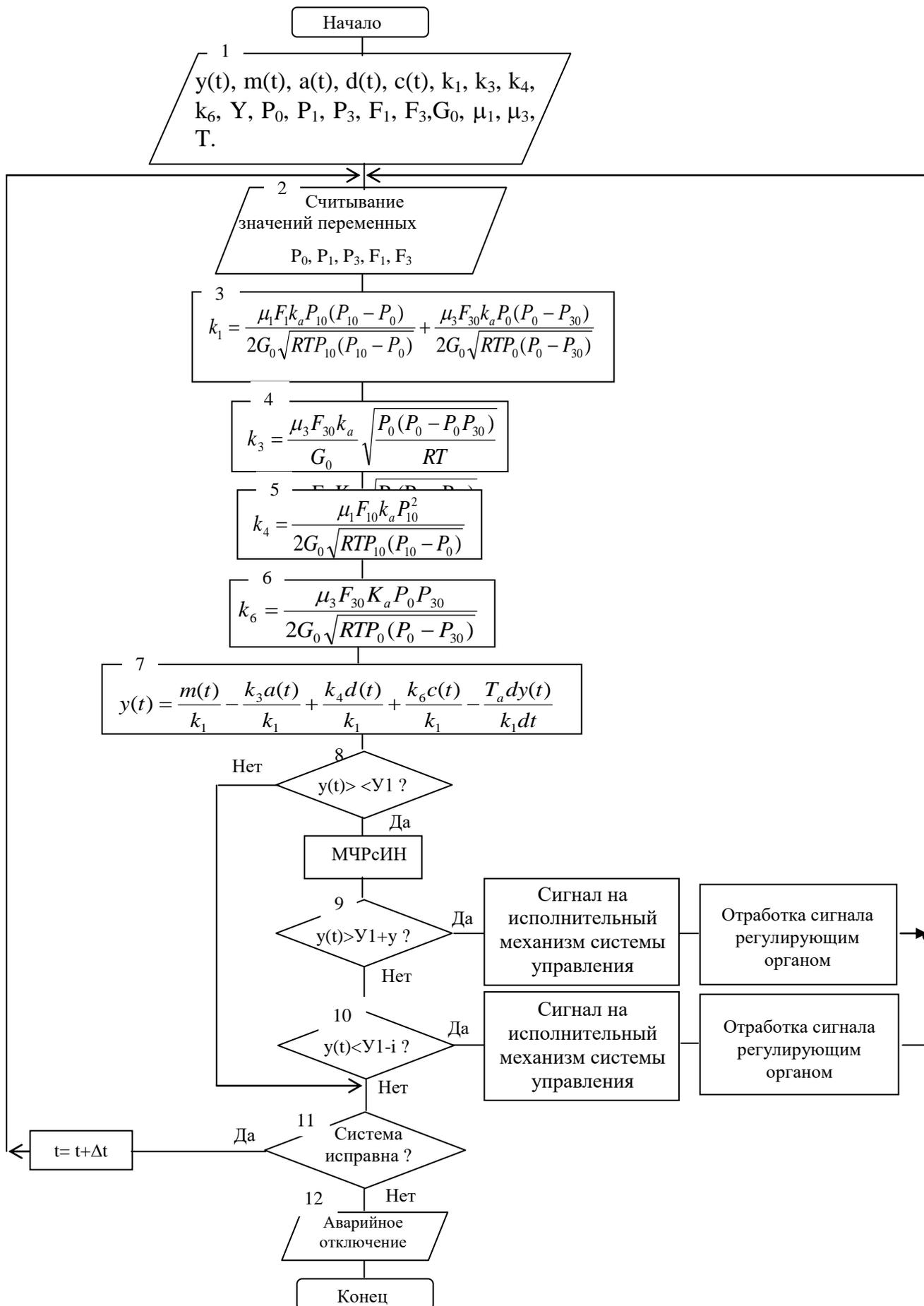


Рисунок 3.33 – Схема алгоритма цифрового управления процессом обжига керамического кирпича по давлению газа в туннельной печи

В блоке 1 описываются различные величины, входящие в математическое описание процесса обжига в туннельной печи как объекта автоматического управления по давлению ГВС, такие как:  $y(t)$ ,  $m(t)$ ,  $a(t)$ ,  $d(t)$ ,  $c(t)$  – переменные относительные величины соответственно давления в туннельной печи в зоне обжига, проходных сечений вентилях, установленных на входном и выходном трубопроводах, давления на входе и разряжения на выходе из зоны обжига туннельной печи;  $k_1$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ ,  $k_6$  – безразмерные коэффициенты, которые представлены в блоках 3, 4, 5, 6 и определяются по формулам;  $Y$  – значение давления в зоне обжига туннельной печи, которое необходимо поддерживать системой управления, кПа;  $G_0$  – установившийся расход ГВС через туннельную печь в зоне обжига, кг/с;  $\mu_1$ ,  $\mu_3$  – коэффициенты расхода ГВС через вентили;  $R$  – газовая постоянная,  $\text{м}^2\text{с}^{-2}\text{К}^{-1}$ ;  $T$  – абсолютная температура ГВС, К. Во 2 блоке происходит считывание значений переменных величин. Эти значения используются в блоках 3, 4, 5 и 6 для вычисления безразмерных коэффициентов. В 7 блоке осуществляется определение давления в туннельной печи, используя безразмерные коэффициенты, которые показаны в блоках 3,4,5,6.

В 8 блоке происходит сравнение полученного значения давления с заданным значением. Если текущее значение больше заданного, тогда сигнал от системы управления через МЧРСИН поступает на исполнительный механизм, который увеличивает открытие вентиля, установленного на трубопроводе выхода газа, на определенную величину. Если давление в туннельной печи меньше заданного значения, тогда сигнал из блока 10 поступает на исполнительный механизм и уменьшается открытие регулирующего вентиля, установленного на трубопроводе выхода ГВС.

При равенстве вычисленного давления заданному давлению в туннельной печи в блоке 11 происходит диагностирование исправности системы. Если система неисправна, то происходит аварийное отключение и программа прекращает работу.

На основе разработанного алгоритма создана программа управления процессом обжига керамического кирпича по давлению ГВС в туннельной печи, которая позволяет оценить влияние различных технологических параметров на

давление газа в зоне обжига туннельной печи и время, за которое система управления отреагирует на эти изменения и выведет давление в зоне обжига на заданное значение. Рассмотрим рисунок 3.34, где по разработанной программе определено время изменения давления в туннельной печи  $y(t)$  до заданного значения в зависимости от давления ГВС во входном трубопроводе  $P_1$ .

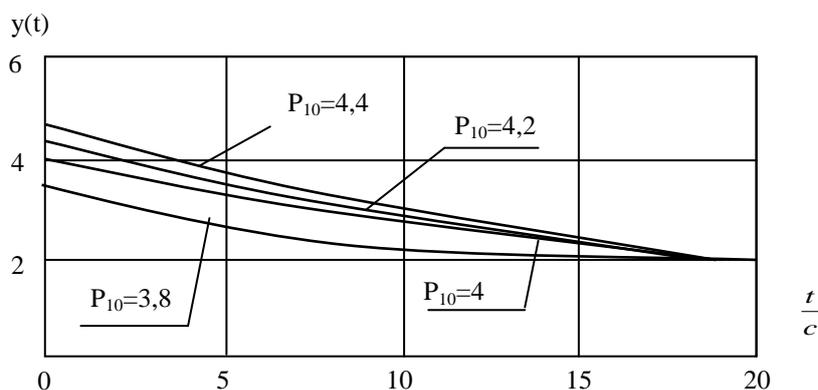


Рисунок 3.34 – Время изменения давления в туннельной печи  $y(t)$  до заданного значения в зависимости от давления ГВС во входном трубопроводе  $P_1$

Графики на рисунке 3.34 показывают, что при изменении давления на входе в зону обжига туннельной печи меняется и давление внутри нее, и время перехода системы управления в заданный режим зависит от величины возмущения по входному давлению. Например, если давление на входе повысится до значения 4,2 кПа, то давление в туннельной печи повысится до значения 2,4 кПа и время, за которое система управления понизит это значение до заданного 4 кПа, составляет 17 секунд.

Графики на рисунке 3.35 показывают время, которое необходимо системе управления для достижения заданного значения давления в зоне обжига туннельной печи при изменении проходного сечения вентиля, установленного на входном трубопроводе. Изменение проходного сечения вентиля приводит к повышению или понижению давления в зоне обжига туннельной печи. Например, если безразмерное проходное сечение вентиля составит 1250 (вентиль открывается на 25 %), тогда давление в зоне обжига туннельной печи повысится до 4,2 кПа и время, за которое

система управления понизит давление до заданного значения 4 кПа, составляет 26 секунд.

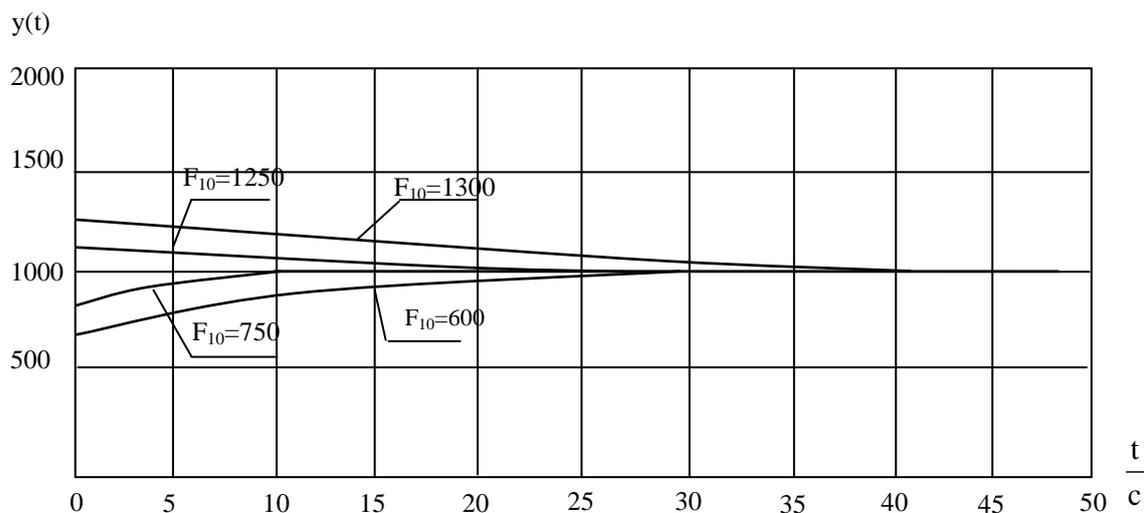


Рисунок 3.35 – Время изменения давления в зоне обжига туннельной печи  $y(t)$  до заданного значения в зависимости от площади проходного сечения вентиля на входном трубопроводе  $F_1$

Анализируя рисунки 3.34 – 3.35, можно сделать вывод, что при изменении давления на входе в зону обжига туннельной печи изменяется давление внутри нее и время перехода системы управления в заданный режим зависит от величины возмущения по входному давлению. Также изменение проходного сечения вентиля приводит к повышению или понижению давления в зоне обжига туннельной печи.

## 4 Экспериментальные исследования разработанной автоматизированной системы управления процессом обжига в туннельной печи

### 4.1 Характеристика разработанной автоматизированной системы управления процессом обжига в туннельной печи

Разработанная АСУ процессом обжига в туннельной печи имеет иерархическую структуру, с обменом информацией в обоих направлениях, состоящая из трех уровней (рисунок 4.1): нижний – полевой, средний – контроллерный и верхний – автоматизированное рабочее место оператора-технолога (АРМ) [89,90].

Информация о процессе на входные каналы программируемого контроллера (ПрК) поступает от датчиков, установленных непосредственно на объекте управления через устройство сопряжения с объектом (УСО).

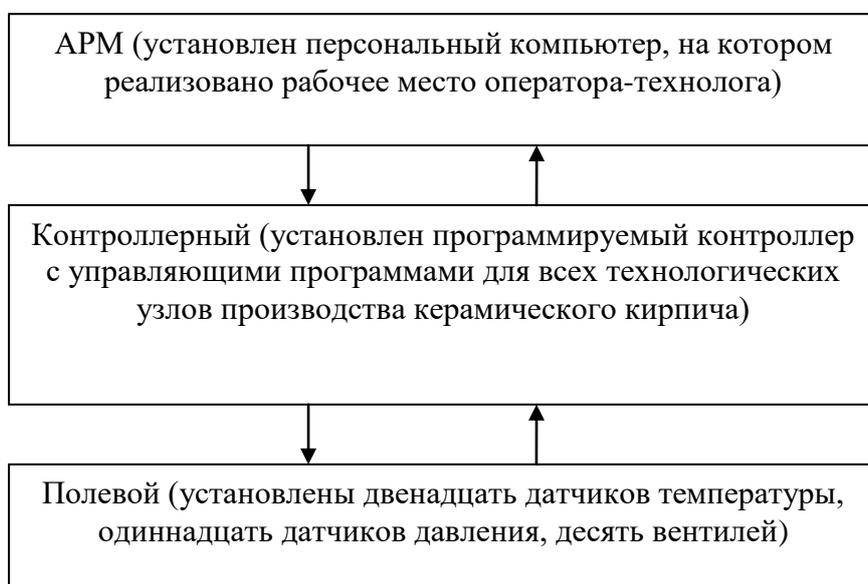


Рисунок 4.1 – Уровни автоматизированной системы управления туннельной печью обжига керамического кирпича

Одновременно подаются управляющие сигналы от верхнего уровня на другие входные каналы программируемого контроллера (ПрК). Через заданный интервал времени микропроцессор ПрК сканирует все управляющие программы и через выходные каналы контроллера выдает управляющие воздействия на исполнительные органы полевого уровня.

На рисунке 4.2 представлены технические средства автоматизации по уровням, из которого видно, что на полевом уровне: давление в рабочем пространстве туннельной печи и разрежение на выходе ДГ и НГ измеряется датчиками модели Метран-CDR150 в количестве одиннадцати штук; измерение температуры по всей зоне туннельной печи производится двенадцатью датчиками температуры модели ТХАУ-205; контроль по открытию-закрытию ворот туннельной печи реализован на двух путевых датчиках модели «ОВЕН» серии ВБ2.30М.65.15.1; в качестве исполнительных органов выбраны вентили модели 15кч883рМ в количестве десяти штук.

Контроллерный уровень реализован на базе микропроцессорного программируемого контроллера модели Овен ПЛК 100, укомплектованного модулями ввода МДВВ и вывода МВУ8, а также двумя модулями ввода (МВА8) нормированного аналогового сигнала 4 – 20 мА. Через интерфейс RS-485 осуществляется связь перечисленных модулей с ПрК.

На уровне АРМ использован персональный компьютер (ПК) со следующими требованиями к его техническим характеристикам: Intel Pentium с тактовой частотой 3 ГГц, 2 Гб. ОЗУ, свободной минимальной памяти на жестком диске 64 Гб. Средствами интерфейса RS-232 осуществляется связь между компьютерным и контроллерным уровнями. В операционной среде (ПК или ПрК) программно реализован семимерный четкий регулятор температуры с интервальной неопределенностью, находящийся в зоне обжига туннельной печи, в котором взаимное влияние контуров регулирования компенсируется с помощью системы производственных правил [91, 92].

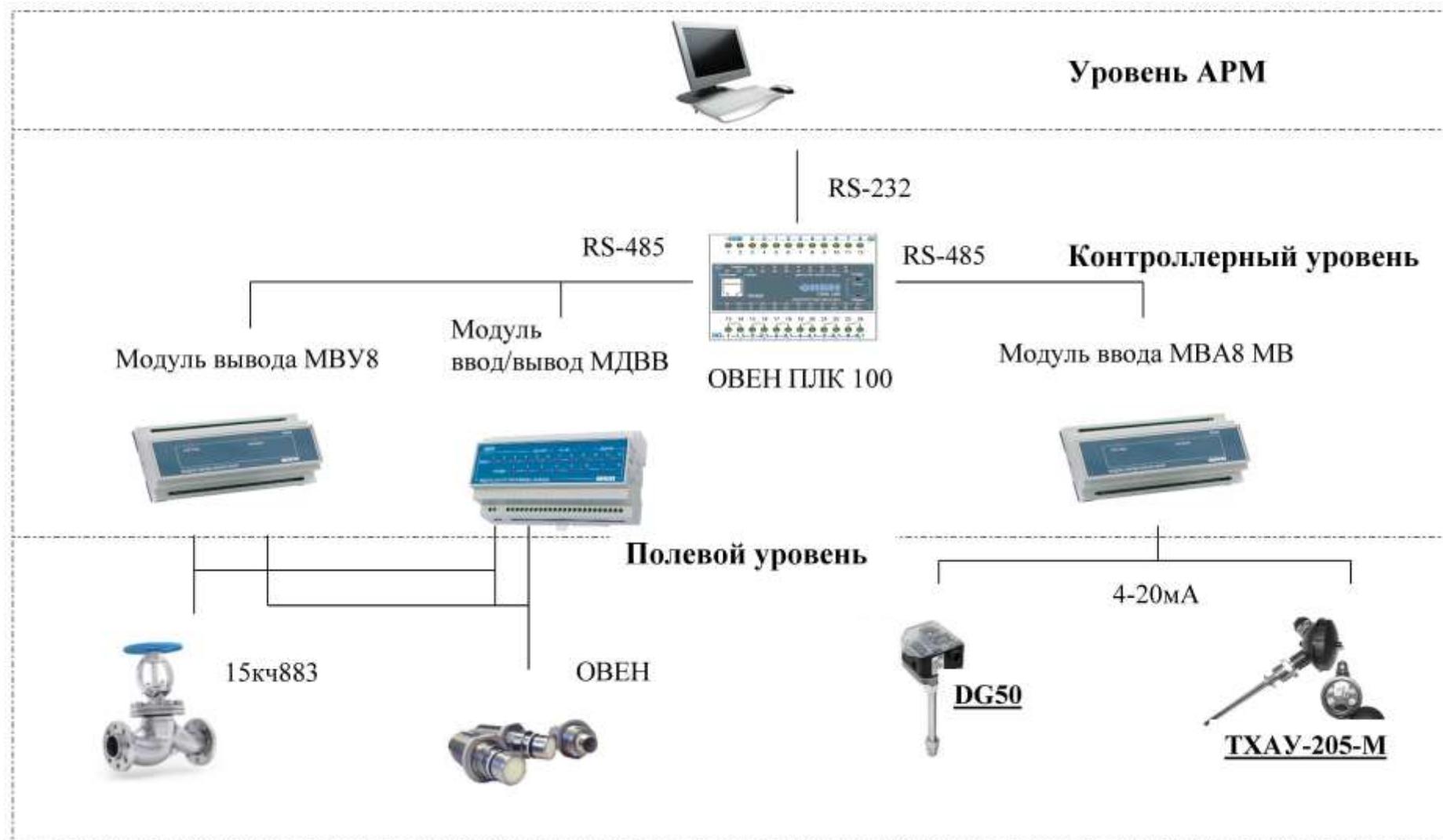


Рисунок 4.2 – Структурная схема АСУ процессом обжига в туннельной печи

На основании структурной схемы АСУ, разработана функциональная схема управления процессом обжига керамического кирпича в туннельной печи (рисунок 4.3).

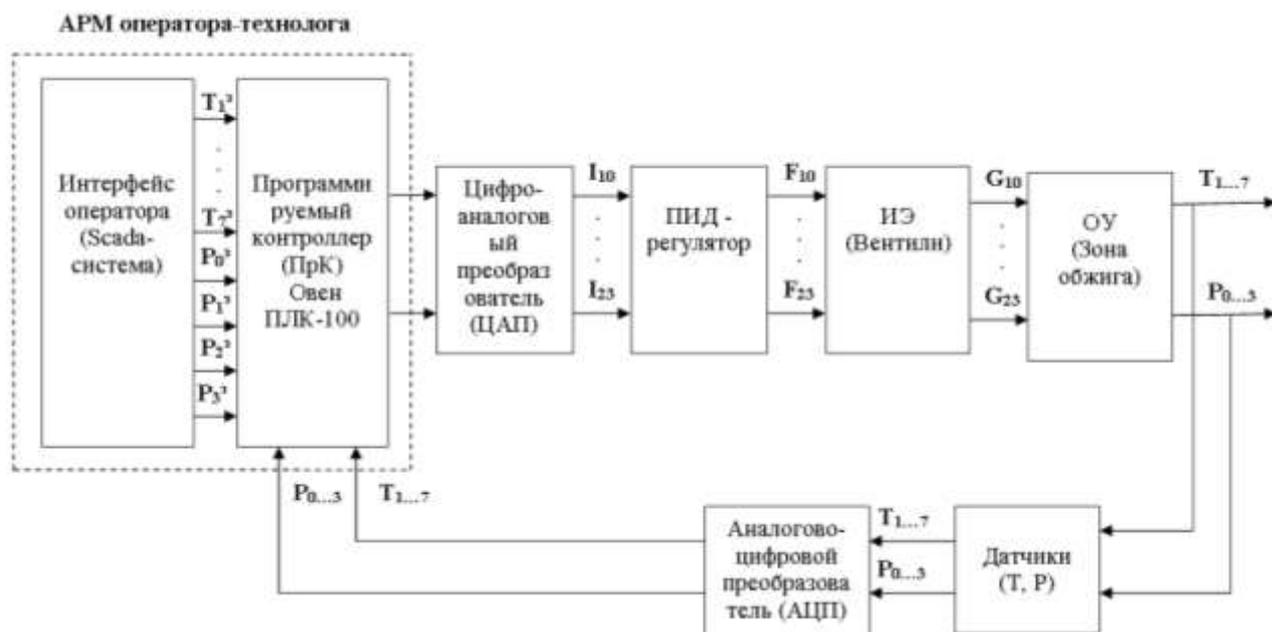


Рисунок 4.3 – Функциональная схема управления процессом обжига керамического кирпича в туннельной печи

Управление процессом обжига керамического кирпича в туннельной печи происходит следующим образом. Оператор-технолог настраивает программируемый контроллер (ПрК) согласно производственным правилам МЧРСИН, задаются установки температур ( $T_1^3 \dots T_7^3$ ) и давления (разряжения) ( $P_0^3 \dots P_3^3$ ). От ПрК поступает цифровой сигнал на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). ПИД-регуляторы получают сигнал от ЦАП в интервале 4...20 мА. Исполнительные элементы состоят (ИЭ) из регулируемых клапанов ( $F_{10}^3 \dots F_{23}^3$ ), которые регулируют расходы ГВС, поступающие в зону обжига. В зоне обжига расположены датчики температуры ( $T_1 \dots T_7$ ) и давления ( $P_0 \dots P_3$ ), которые фиксируют значения и передают сигналы к аналогово-цифровому преобразователю (АЦП). Информацию об изменении параметров регулирования ПрК получает от АЦП.

Взаимосвязь технических средств автоматизации и технологического процесса, протекающего в туннельной печи, представлена на рисунке 4.4, из которого следует, что аппаратура АСУ ТП размещена непосредственно на щите управления и по месту (на технологическом оборудовании) [93].

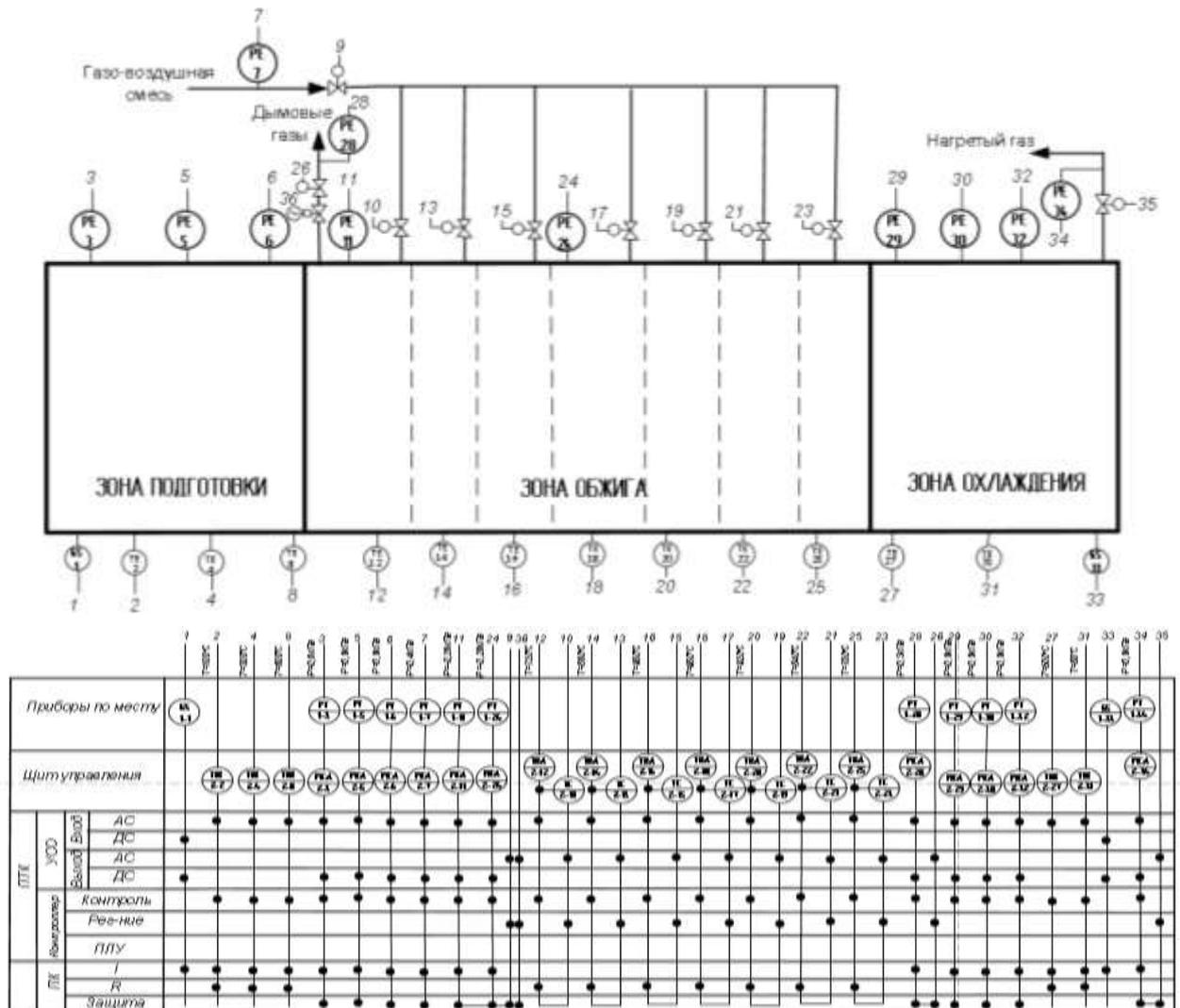


Рисунок 4.4 – Функциональная схема автоматизированной системы управления туннельной печью обжига керамического кирпича

Таким образом, особенность трехуровневой (полевой, контроллерный и АРМ) АСУ процессом обжига в туннельной печи состоит в программной реализации на контроллерном уровне семимерного четкого регулятора с интервальной неопределенностью, где с помощью специальной компенсационной системы производственных правил компенсируются взаимное влияние контуров регулирования.

## 4.2 Разработка и настройка четкого регулятора

Интерпретация выходных и входных переменных МЧРСИН описывается совокупностью четких термов, с помощью *step-time* и *any-time*, и предоставляет широкие возможности для повышения их быстродействия [26,91,94]. Системы продукционных правил МЧРСИН позволяют без потери адекватности управления, в каждом цикле сканирования, обрабатывать не всю, а только часть (5÷10) % информации в виде правил. Недостатком *step-time* алгоритмов является сложность процедуры отладки и синтеза МЧРСИН, т.к. для выработки актуального управляющего воздействия в режиме реального времени необходимо формировать уникальный идентификационный код. А недостатки *any-time* алгоритмов заключаются в расположении правил, у которых условная часть (антецедент) чаще принимает значение логической единицы с заданной периодичностью в начале системы продукционных правил с помощью специального программного блока. Предлагаемый семимерный регулятор с интервальной неопределенностью для регулирования температуры в зоне обжига туннельной печи для технологической стадии «Обжиг» не имеет таких недостатков.

На рисунке 4.5 представлена логическая схема алгоритма работы семимерного четкого регулятора, которая состоит из таких программных блоков: ситуационные подпрограммы  $((D_1 \rightarrow СПП_1) \div (D_7 \rightarrow СПП_7))$ , сканирование дискретных входных и выходных переменных объекта управления, семь фазификаторов (Ф) (по одному для каждого контура регулирования МЧРСИН).

Ф каждого из семи контуров регулирования включает в себя: регистраторы обращения к ситуационным подпрограммам –  $((D_{(1-7)1} \equiv T_{(1-7)1}) \div (D_{(1-7)10} \equiv T_{(1-7)10}))$ ; операторы условного перехода –  $((T_{(1-7)1} \equiv 1) \div (T_{(1-7)10} \equiv 1))$ ; оператор отработки аварийных ситуаций –  $АЛ_{(1-7)\phi}$ . Без утраты общности рассуждений и для определенности принято входные и выходные переменные МЧРСИН идентифицировать десятью четкими термами. Как показывает практика,

повышение качества регулирования не зависит от увеличения количества термов [72,88,90,91].

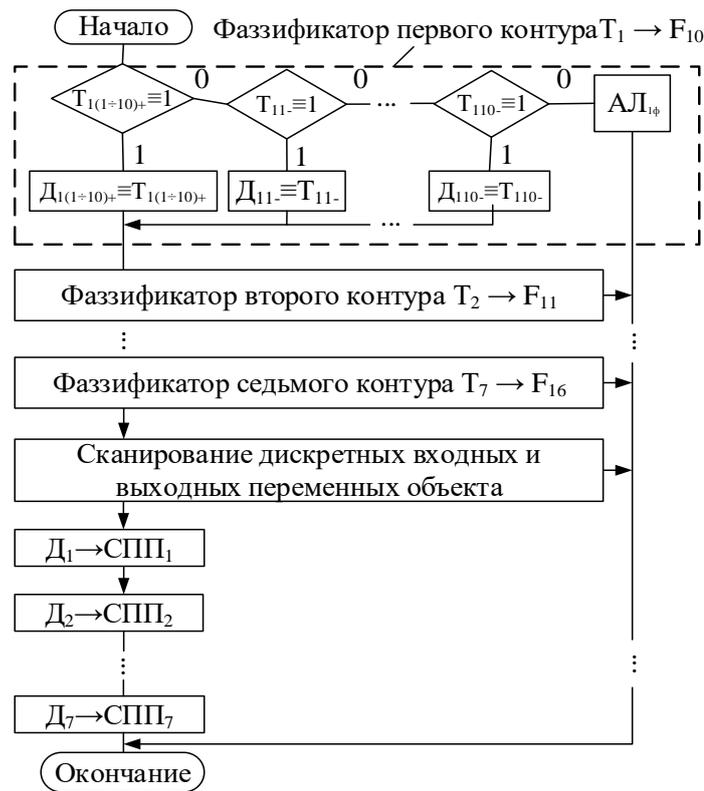


Рисунок 4.5 – Схема алгоритма работы семимерного четкого логического регулятора

При остывании туннельной печи регуляторы реагируют на компенсацию тепла. Цикл сканирования программы, реализующей МЧРСИН, начинается с отработки операторов условного перехода, входящих в состав  $\Phi$  контуров регулирования МЧРСИН.

В качестве примера рассмотрим первый контур, если четкий терм  $T_{1(1+10)+}$  в первом контуре равен логической единице, что соответствует температуре 720 °С, то микропроцессор по ветке «1» переходит к оператору ( $D_1 \equiv T_{1(1+10)+}$ ) и в регистр  $D_1$  записывает адрес начала ситуационной подпрограммы СПП<sub>1</sub>. Если температура спадет на 3 °С, то это говорит о том что терм  $T_{1(1+10)+}$  равен логическому нулю и управление передается к оператору ( $T_{11} \equiv 1$ ), который подает сигнал при открытии вентиля  $F_{10}$ ,  $F_{11}$  и т.д., и так до оператора ( $T_{110} \equiv 1$ ).

Управление передается оператору  $АЛ_{1\phi}$ , если все термы  $(T_{1(1\div 10)^+} \div T_{110-})$  будут равны логическому нулю, и это говорит о некорректном задании диапазона  $\Phi$ . Если один из четких термов  $(T_{1(1\div 10)^+} \div T_{110-})$  равен логической единице, то микропроцессор переходит к аналогичной обработке  $\Phi$  второго контура регулирования  $(T_2 \rightarrow F_{11})$ , затем третьего  $(T_3 \rightarrow F_{12})$  и т.д. до  $\Phi$  7-го контура  $(T_7 \rightarrow F_{16})$ .

Следующим этапом является определение текущих логических значений дискретных входных и выходных переменных зоны обжига туннельной печи (включение и выключение вентилях, кнопки управления, и т.д.). На этом этапе так же проверяется логическое состояние переменных, идентифицирующих аварийную ситуацию. Завершается сканирование программы, реализующей МЧРСИН, с обработкой блока ситуационных подпрограмм (СПП).

Для описания регулируемой переменной в каждом контуре МЧРСИН используется одинаковое число  $m=20$  четких термов, у которых задний фронт описывается мягким, а передний – жесткими неравенствами.

В каждом контуре регулирование анализируется одним продукционным правилом. Общее количество СПП для рассматриваемого семимерного регулятора ( $n=7$ ) в туннельной печи будет равно  $n \times (m-10)$ ,  $7 \times 10=70$ . В таблице 4.1 представлены продукционные правила МЧРСИН температуры в зоне обжига туннельной печи.

Таблица 4.1 – Размещение продукционных правил МЧРСИН температуры в зоне обжига туннельной печи по ситуационным подпрограммам

Контур регулирования	Ситуационное продукционное правило (СПП)	Адрес начала СПП
1	2	3
$T_1 \rightarrow F_{10}$	<i>Если</i> $T_1 = T_{11+} \vee T_{12+} \dots \vee T_{109+} \vee T_{110+}$ , $mF_{10} = 0$ ;	$D_1 \rightarrow \text{СПП}_{1(1\div 10)^+}$
	<i>Если</i> $T_1 = T_{11-}$ , $mF_{10} = F_{101} \vee T_{1k1}$ ;	$D_1 \rightarrow \text{СПП}_{1 1-}$
	...	...
	...	...
	...	...
	<i>Если</i> $T_1 = T_{109-}$ , $mF_{10} = F_{109} \vee T_{1k9}$ ;	$D_1 \rightarrow \text{СПП}_{1 6-}$

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3
	<i>Если</i> $T_1 = T_{110-}, moF_{10} = F_{1010} \nu T_{1k10}$ .	$D_1 \rightarrow C\Pi\Pi_1 7-$
$T_2 \rightarrow F_{11}$	<i>Если</i> $T_2 = T_{21+} \nu T_{22+} \dots \nu T_{209+} \nu T_{210+}, moF_{11} = 0$ ;	$D_2 \rightarrow C\Pi\Pi_2(1 \div 10)+$
	<i>Если</i> $T_2 = T_{21-}, moF_{11} = F_{111} \nu T_{2k1}$	$D_2 \rightarrow C\Pi\Pi_2 1-$
	...	...
	...	...
	<i>Если</i> $T_2 = T_{29-}, moF_{11} = F_{119} \nu T_{2k9}$ ;	$D_2 \rightarrow C\Pi\Pi_2 9-$
	<i>Если</i> $T_2 = T_{210-}, moF_{11} = F_{1110} \nu T_{2k10}$ .	$D_2 \rightarrow C\Pi\Pi_2 10-$
$T_3 \rightarrow F_{12}$	<i>Если</i> $T_3 = T_{31+} \nu T_{32+} \dots \nu T_{309+} \nu T_{310+}, moF_{12} = 0$ ;	$D_3 \rightarrow C\Pi\Pi_3(1 \div 10)+$
	<i>Если</i> $T_3 = T_{31-}, moF_{12} = F_{121} \nu T_{3k1}$ ;	$D_3 \rightarrow C\Pi\Pi_3 1-$
	...	...
	...	...
	<i>Если</i> $T_3 = T_{39-}, moF_{12} = F_{129} \nu T_{3k9}$ ;	$D_3 \rightarrow C\Pi\Pi_3 9-$
	<i>Если</i> $T_3 = T_{310-}, moF_{12} = F_{1210} \nu T_{3k10}$ .	$D_3 \rightarrow C\Pi\Pi_3 10-$
$T_4 \rightarrow F_{13}$	<i>Если</i> $T_4 = T_{41+} \nu T_{42+} \dots \nu T_{409+} \nu T_{410+}, moF_{13} = 0$ ;	$D_4 \rightarrow C\Pi\Pi_4(1 \div 10)+$
	<i>Если</i> $T_4 = T_{41-}, moF_{13} = F_{131} \nu T_{4k1}$ ;	$D_4 \rightarrow C\Pi\Pi_4 1-$
	...	...
	...	...
	<i>Если</i> $T_4 = T_{49-}, moF_{13} = F_{139} \nu T_{4k9}$ ;	$D_4 \rightarrow C\Pi\Pi_4 9-$
	<i>Если</i> $T_4 = T_{410-}, moF_{13} = F_{1310} \nu T_{4k10}$ .	$D_4 \rightarrow C\Pi\Pi_4 10-$
$T_5 \rightarrow F_{14}$	<i>Если</i> $T_5 = T_{51+} \nu T_{52+} \dots \nu T_{509+} \nu T_{510+}, moF_{14} = 0$ ;	$D_5 \rightarrow C\Pi\Pi_5(5 \div 10)+$
	<i>Если</i> $T_5 = T_{51-}, moF_{14} = F_{141} \nu T_{5k1}$ ;	$D_5 \rightarrow C\Pi\Pi_5 1-$
	...	...
	...	...
	<i>Если</i> $T_5 = T_{59-}, moF_{14} = F_{149} \nu T_{5k9}$ ;	$D_5 \rightarrow C\Pi\Pi_5 9-$
	<i>Если</i> $T_5 = T_{510-}, moF_{14} = F_{1410} \nu T_{5k10}$ .	$D_5 \rightarrow C\Pi\Pi_5 10-$
$T_6 \rightarrow F_{15}$	<i>Если</i> $T_6 = T_{61+} \nu T_{62+} \dots \nu T_{609+} \nu T_{610+}, moF_{15} = 0$ ;	$D_6 \rightarrow C\Pi\Pi_6(1 \div 10)+$
	<i>Если</i> $T_6 = T_{61-}, moF_{15} = F_{151} \nu T_{6k1}$ ;	$D_6 \rightarrow C\Pi\Pi_6 1-$
	...	...
	...	...
	<i>Если</i> $T_6 = T_{69-}, moF_{15} = F_{159} \nu T_{6k9}$ ;	$D_6 \rightarrow C\Pi\Pi_6 9-$
	<i>Если</i> $T_6 = T_{610-}, moF_{15} = F_{1510} \nu T_{6k10}$ .	$D_6 \rightarrow C\Pi\Pi_6 10-$
$T_7 \rightarrow F_{16}$	<i>Если</i> $T_7 = T_{71+} \nu T_{72+} \dots \nu T_{709+} \nu T_{710+}, moF_{16} = 0$ ;	$D_7 \rightarrow C\Pi\Pi_7(1 \div 10)+$

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3
	<i>Если</i> $T_7 = T_{71-}$ , <i>то</i> $F_{16} = F_{161} \vee T_{7k1}$ ;	$D_7 \rightarrow \text{СПП}_{7 1-}$
	...	...
	<i>Если</i> $T_7 = T_{79-}$ , <i>то</i> $F_{16} = F_{169} \vee T_{7k9}$ ;	$D_7 \rightarrow \text{СПП}_{7 9-}$
	<i>Если</i> $T_7 = T_{710-}$ , <i>то</i> $F_{16} = F_{1610} \vee T_{7k10}$ .	$D_7 \rightarrow \text{СПП}_{7 10-}$

Каждая СПП представляет собой программно-реализованное специальное продукционное правило, которое отработает при равенстве логической единице одного из четких термов регулируемого параметра МЧРСИН. Из этого следует, что при корректном задании диапазонов регулирования выходных переменных МЧРСИН, в каждом цикле сканирования, микропроцессор отработывает семь продукционных правил, то есть по одному правилу для каждого контура регулирования МЧРСИН. А у ТНР в каждом контуре отработывается вся система, насчитывающая десятки, а то и сотни продукционных правил [90,91,92].

Рассмотрим пример представленный на рисунке 4.6, где показан логический



Рисунок 4.6 – Логическая схема отработки продукционного правила (4.1)

алгоритм отработки следующего продукционного правила:

$$\text{Если } T_1 = (\bar{T}_{12} \cdot X_1 \cdot \bar{Y}_2 + \bar{T}_{13} \cdot X_2 \cdot Y_3) \cdot T_{11}, \text{ то } F_{10} = F_{101-}, \quad (4.1)$$

где  $X_1, X_2$  – дискретные входные и  $Y_2$  и  $Y_3$  – выходные переменные туннельной печи,  $T_{12}, T_{13}$  – второй и третий четкие термы первого контура регулирования МЧРСИН.

Если antecedent продукционного правила (4.1) равен логической единице, то алгоритм выдает управляющее воздействие  $U_{10}$  на исполнительное устройство.

Из рисунка 4.6 следует, что при равенстве условной части правила (4.1) логической единице, производится дефаззификация (ДФ) и выдача четкого значения управляющего воздействия  $U_{10}$ , соответствующего четкому терму  $F_{11}$ . В противном случае управляющее воздействие в рассматриваемом контуре не изменяется. Иначе говоря, в целях экономии памяти и повышения быстродействия регулятора в ситуационной подпрограмме совмещены процедуры ДФ и логического вывода. Остальные ситуационные подпрограммы функционируют аналогично.

На основе алгоритма функционирования МЧРСИН разработана её структурная схема (рисунок 4.7), состоящая из четырех основных блоков:

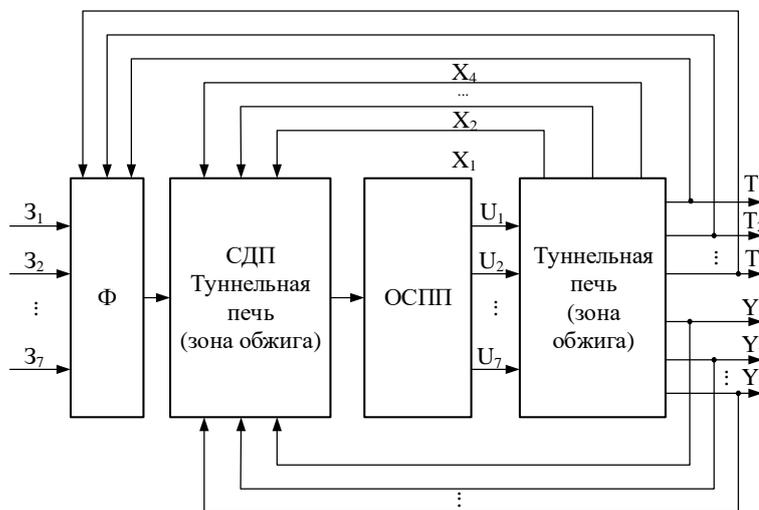


Рисунок 4.7 – Структурная схема семимерного четкого регулятора температуры с интервальной неопределенностью

туннельная печь – многосвязный объект управления с семью регулируемыми параметрами; ОСПП – отработки ситуационных подпрограмм; СДП туннельной

печи – сканирования дискретных входных ( $X_1 \div X_4$ ) и выходных ( $Y_1 \div Y_k$ ) переменных многосвязного объекта управления;  $\Phi$  – фаззификатор.

В отработке ситуационных подпрограмм (ОСПП) выходные сигналы ( $U_1 \div U_7$ ) в аналоговом (четком) формате подаются на исполнительный орган многосвязного объекта управления. Блок СДП туннельной печи, на входы которого подаются дискретные входные ( $X_1 \div X_4$ ) и выходные переменные ( $Y_1 \div Y_k$ ) объекта управления и выход блока СДП, соединен с входом блока ОСПП.  $\Phi$  имеет входы задающих воздействий ( $Z_1 - 720$  °С,  $Z_7 - 710$  °С и обратных связей ( $T_1 \div T_7$ )).

Таким образом, предложен семимерный четкий регулятор температуры в зоне обжига туннельной печи с компенсацией взаимного влияния контуров регулирования, в котором снижение времени отклика достигнуто отработкой производственного правила, соответствующего четкому терму регулируемого параметра, равному в текущий момент времени логической единице.

### **4.3 Описание модернизированной туннельной печи-сушилки**

В работе произведена модернизация туннельной печи-сушилки, на которую получен патент на изобретение. В ней интенсификация газообмена между основными газовыми потоками в зонах обжига, подготовки и газами в порах керамических стеновых изделий, находящихся в туннельной печи-сушилке, происходит за счет установления в трубопроводе перед вентилятором отбора ДГ поворотной заслонки, которая вращается от электрического двигателя через понижающий редуктор с частотой 3-7 оборотов в минуту и периодически изменяет разрежение в зонах обжига и подготовки туннельной печи-сушилки с частотой 6-14 колебаний в минуту с амплитудой 10-20 Па. Это обеспечивает периодическое изменение порового разрежения в каждой точке керамических стеновых изделий, находящихся в зонах обжига и подготовки.

Поставленная задача решается тем, что в туннельной печи-сушилке, включающей рабочий канал, разделенный условно на зоны сушки, подготовки,

обжига и охлаждения, вентиляторы отбора ДГ, теплоноситель из зоны охлаждения, теплоноситель из начала зоны сушки и вентилятор подачи атмосферного воздуха в конец зоны охлаждения, перед которым установлен вентилятор отбора подогретого воздуха из зоны охлаждения, вентиляционную систему зоны сушки в виде набора унифицированных блоков из нагнетающего вентилятора, трубопровод подсоса атмосферного воздуха и трубопровод подачи воздуха из зоны охлаждения, причем блоки размещены по длине зоны сушки последовательно, и отопительную систему, в трубопроводе перед вентилятором отбора ДГ установлена поворотная заслонка, которая вращается от электрического двигателя через понижающий редуктор с частотой 3-7 оборотов в минуту и периодически изменяет разрежение в зонах обжига и подготовки туннельной печи-сушилки с частотой 6-14 колебаний в минуту с амплитудой 10 - 20 Па, что обеспечивает периодическое изменение порового разрежения в каждой точке керамических стеновых изделий, находящихся в зонах обжига и подготовки туннельной печи-сушилки.

Изменение порового разрежения в каждой точке керамических стеновых изделий, находящихся в туннельной печи-сушилке, обеспечивает принудительную интенсификацию газообмена между основными потоками газов в туннельной печи-сушилке и газами внутри пор обжигаемых керамических стеновых изделий.

На рисунке 4.8 схематично изображена туннельная печь-сушилка для обжига керамических стеновых изделий.

Туннельная печь-сушилка работает следующим образом. В рабочий канал 1 туннельной печи-сушилки на некотором расстоянии от конца зоны охлаждения подают атмосферный воздух вентилятором 3. Вентилятором 2, установленным в конце зоны охлаждения, отбирают теплоноситель и направляют к вентилятору 3 подачи атмосферного воздуха. За счет создаваемого перепада давлений воздух движется в противотоке с изделиями в сторону зоны обжига и в прямотоке к выгрузочному концу, и таким образом создают давление в конце зоны охлаждения, равным давлению в цехе.

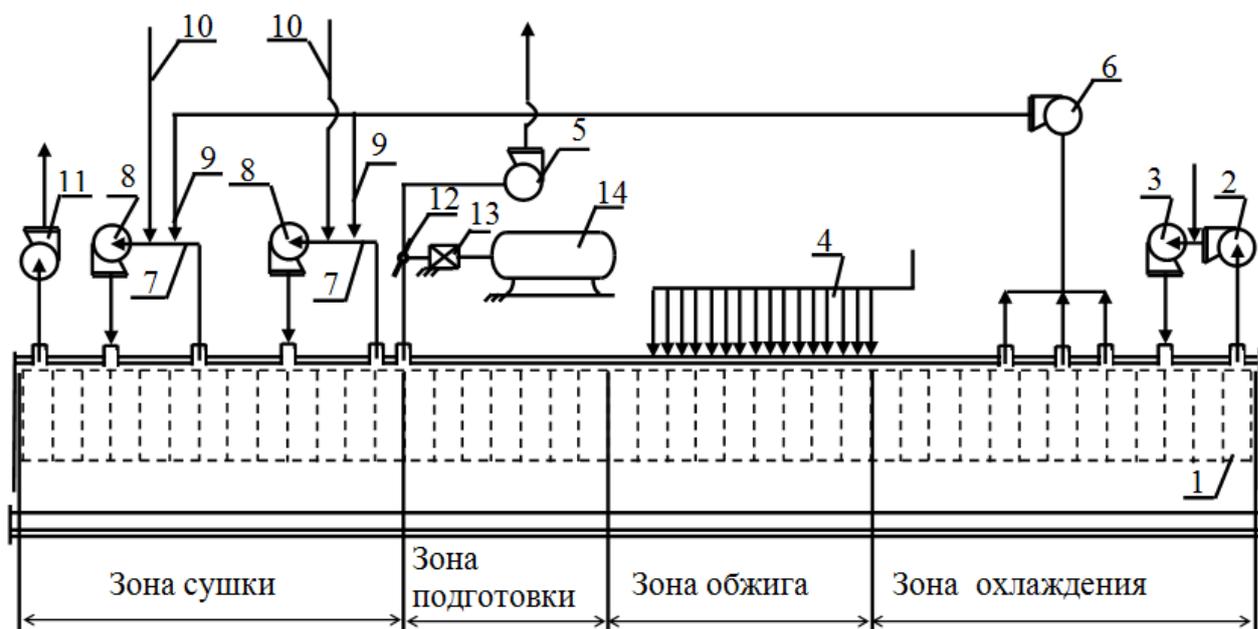


Рисунок 4.8 – Туннельная печь-сушилка

Системой отопления 4 в зону обжига подают топливо, при сгорании которого нагреваются изделия до оптимальной температуры. ДГ отбирают вентилятором 5, установленным перед зоной сушки, и выбрасывают в атмосферу.

В трубопроводе перед вентилятором 5 отбора ДГ установлена поворотная заслонка 12, которая вращается от электрического двигателя 14 через понижающий редуктор 13 частотой 3-7 оборотов в минуту и периодически изменяет разрежение в зонах обжига и подготовки туннельной печи-сушилки с частотой 6-14 колебаний в минуту с амплитудой 10-20 Па, что обеспечивает периодическое изменение порового разрежения в каждой точке керамических стеновых изделий, находящихся в зонах обжига и подготовки туннельной печи-сушилки. В конце зоны сушки расположен первый блок вентиляционной системы 7. Вентилятором 8 отбирают теплоноситель, движущийся в прямоотке с изделиями, смешивают с атмосферным воздухом, поступающим через трубопровод 10, и с горячим воздухом, который по трубопроводу 9 отбирают вентилятором 6 из зоны охлаждения и нагнетают в зону сушки против хода изделий. Использование предложенной вентиляционной системы позволяет в зоне

сушки создать циркуляцию теплоносителя в противотоке и прямотоке с движением изделий [98,99,100].

Рассмотрим пору объемом  $V_k$  в керамическом изделии, соединенную с основным газовым потоком в зонах обжига и подготовки туннельной печи-сушилки в виде схемы, приведенной на рисунке 4.9.

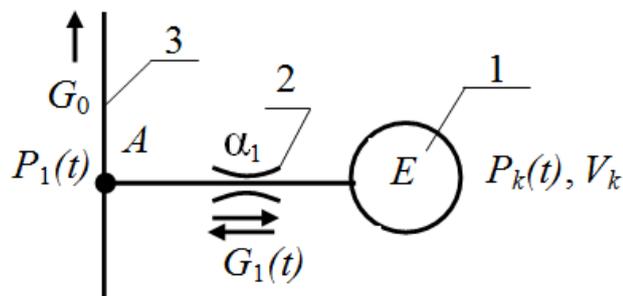


Рисунок 4.9 – Пора объемом  $V_k$  в керамическом изделии, соединенная с основным газовым потоком в зонах обжига и подготовки туннельной печи-сушилки

Эта схема состоит из пневматического сопротивления 2, через которое протекают газы из зоны обжига и подготовки туннельной печи-сушилки 3 в выделенную газовую пору 1.

Принимаем, что разрежение газа  $P_1(t)$ , Па, в зонах обжига и подготовки туннельной печи-сушилки изменяются согласно выражению:

$$P_1(t) = P_0 + P_x(t) \cdot \sin \omega t, \quad (4.9)$$

где  $P_0$  – статическая составляющая разрежения ДГ в зонах обжига и подготовки туннельной печи-сушилки, Па;  $P_x(t) \cdot \sin \omega t$  – переменная составляющая разрежения ДГ в зонах обжига и подготовки туннельной печи-сушилки, Па;  $P_x(t)$ ,  $\omega$  – амплитуда и частота переменной составляющей разрежения ДГ в зонах обжига и подготовки туннельной печи-сушилки, Па,  $\text{с}^{-1}$ ;  $t$  – время, с.

Теоретически установлено, что разрежение ДГ в выделенной в керамическом изделии поре 1  $P_k(t)$  (рисунок 4.9) определяется выражением:

$$P_k(t) = \frac{\omega \cdot T_1}{(T_1^2 \cdot \omega^2 + 1)} \cdot \left[ \frac{1}{\omega \cdot T_1} \sin \omega t - \cos \omega t + e^{-\frac{1}{T_1} t} \right] \cdot P_x(t), \quad (4.10)$$

где  $P_x(t)$  – амплитуда колебательного разрежения (рисунок 4.9),  
 $T_1 = V_k / (\alpha_1 \cdot RT)$  – постоянная времени для поры 1, заполненной ДГ, с  
 пневматическим сопротивлением 2, которое имеет проводимость  
 $\alpha_1 = V_k / (T_1 \cdot RT)$ ,  $R$  – газовая постоянная газов,  $\text{м}^2\text{с}^{-2} \text{К}^{-1}$ ;  $T$  – абсолютная  
 температура газов, К.

Расход газов в выделенную в керамическом изделии пору 1  $G_1(t)$  (рисунок 4.9) определяется выражением:

$$G_1(t) = \frac{\alpha_1 \cdot P_x(t) \cdot \omega T_1}{(1 + \omega^2 T_1^2)} \cdot \left[ T_1 \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) + \cos(\omega t) - e^{-\frac{1}{T_1} t} \right]. \quad (4.11)$$

Рассмотрим рисунок 4.10, где приведен график изменения расхода ГВС через пневматическое сопротивление в газовую пору керамического изделия, расположенного в зонах обжига и подготовки туннельной печи-сушилки, в зависимости от частоты переменного разрежения газов в зонах обжига и подготовки туннельной печи-сушилки.

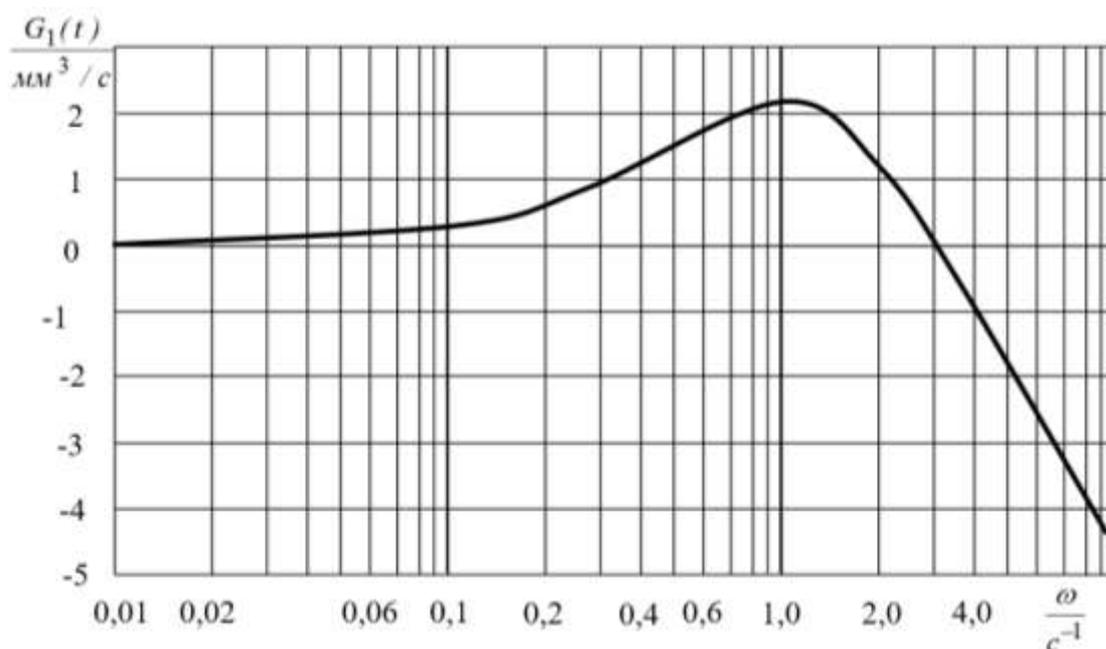


Рисунок 4.10 – График изменения расхода ГВС через пневматическое сопротивление в газовую пору керамического изделия, расположенного в зонах обжига и подготовки туннельной печи-сушилки

Как видно из графика на рисунке 4.10, максимальное значение расхода ГВС  $G_1(t)$  отмечается при частоте изменения переменного разрежения ДГ  $\omega = 1,1 \text{ с}^{-1}$ . Известно, что  $\omega = 2\pi f$ , где  $f$  – частота колебаний, Гц.  $f = 1/T$ , где  $T$  – период колебания, с. Из этих выражений определяем:

$$f = \omega / 2\pi = 1,1 / 6,28 = 0,175 \text{ Гц} \quad \text{и} \quad T = 1 / f = 1 / 0,175 = 5,71 \text{ с.}$$

Период колебания  $T = 5,71 \text{ с}$  соответствует  $60 \text{ с} / 5,71 \text{ с}$ , равного 10,5 колебаний в минуту или 5,25 оборотов в минуту поворотной заслонки 12 на рисунке 4.10.

Формулы (4.10) и (4.11) и кривая на рисунке 4.10 показывают, что только при наличии периодических колебаний (при  $\omega > 0$ ) разрежения в зонах обжига и подготовки туннельной печи-сушилки обеспечивается принудительный газообмен – расход ГВС  $G_1(t)$  [рисунок 4.9 и формула (4.11)] между основными газовыми потоками в туннельной печи-сушилке и газами в порах керамических стеновых изделий, находящихся в туннельной печи-сушилке.

Принудительный газообмен – расход ГВС  $G_1(t)$  между основными газовыми потоками в туннельной печи-сушилке и газами в порах керамических стеновых изделий, находящихся в туннельной печи-сушилке, обеспечивает равномерный по всему керамическому изделию прогрев и обжиг и уменьшает количество бракованных изделий из-за уменьшения в них количества трещин.

Если отсутствуют периодические колебания (при  $\omega = 0$ ) разрежения в зонах обжига и подготовки туннельной печи-сушилки, тогда отсутствует принудительный газообмен – расход ГВС  $G_1(t) = 0$  между основными газовыми потоками в туннельной печи-сушилке и газами в порах керамических стеновых изделий, находящихся в туннельной печи-сушилке.

#### 4.4 Экспериментальные исследования процесса обжига

Целью экспериментальных исследований является апробация программной настройки семимерного четкого регулятора с интервальной неопределенностью и подтверждение основных теоретических положений.

К основным задачам экспериментальных исследований относятся:

- подтверждение возможности программной реализации на контроллерном уровне семимерного четкого регулятора;
- получение температурного графика с помощью бумажного регистратора РМТ 39D;
- получение реальных значений температур по зонам обжига, расходов ГВС, разряжения ДГ и НГ;
- оценка эффективности работы туннельной печи в результате применения разработанного математического обеспечения и программной реализации на контроллерном уровне семимерного четкого регулятора с интервальной неопределенностью.

Для достижения поставленной цели экспериментальных исследований рассмотрим приборы и устройства, используемые в туннельной печи №2 ООО «Стерлитамакский кирпичный завод».

Технологический процесс обжига керамического кирпича в туннельной печи управляется контроллером модели ОВЕН ПЛК 100, в котором возможно программирование, и основное предназначение – это измерение дискретных входных сигналов; управление дискретными (релейными) выходами; выполнение пользовательской программы по анализу результатов измерения дискретных и аналоговых входов; управление дискретными входами и выходами; измерение и автоматическое регулирование температуры (при использовании в качестве первичных преобразователей термометров сопротивления), а также других физических параметров, значение которых первичными преобразователями (датчиками) может быть преобразовано в напряжение постоянного тока, унифицированным электрическим сигналом постоянного тока или активного

сопротивления; прием и передача данных по интерфейсам RS–485, RS–232, Ethernet; измерение аналоговых сигналов тока или напряжения; управление аналоговыми выходами; передачи и приема данных по интерфейсам RS–485, RS–232, Ethernet. Основные технические характеристики программируемого контроллера приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Технические характеристики программируемого контроллера Овен ПЛК 100

Характеристика	Значение
Конструктивное исполнение	унифицированный корпус для крепления на DIN_рейку, длина 105 мм (6U), шаг клемм 7,5 мм
Степень защиты корпуса	IP20
Напряжение питания, В	ПЛК100-24 18...29 В (номин.=24 В) ПЛК100-220 ~90...264 В 47...63 Гц (номин. ~220В) или =110...230 В
Потребляемая мощность, Вт	6
Габаритные размеры, мм	105 × 65 × 90
Средний срок службы, лет	8
Объем оперативной памяти, Мб	8
Количество дискретных входов	8
Количество дискретных выходов	6 э/м реле
Количество аналоговых входов	4
Интерфейсы связи	Интерфейсы Ethernet 100 Base+T RS+232 RS+485 USB 2.0Device
Скорость обмена по интерфейсам RS	от 4800 до 115200 bps
Протоколы ОВЕН	ModBus+RTU, ModBus+ASCII DCON ModBus+TCP GateWay (протокол CoDeSys)

Элементы индикации, управления и расположение клемм программируемого контроллера ОВЕН ПЛК 100 представлены на рисунке 4.11.

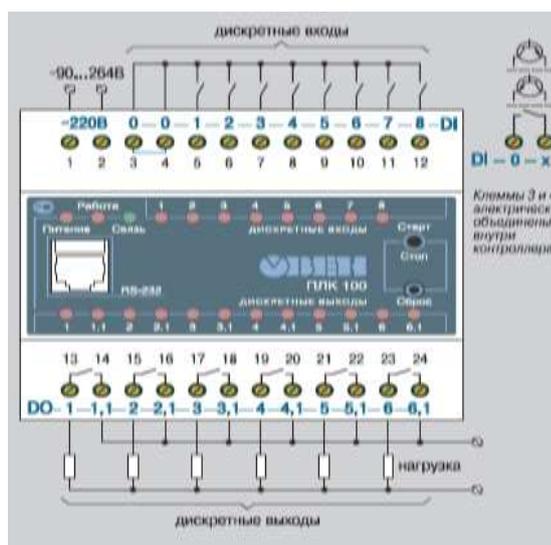


Рисунок 4.11 – Элементы индикации, управления и расположение клемм программируемого контроллера ОВЕН ПЛК100

Бумажные регистраторы РМТ 39D (рисунок 4.12) предназначены для измерения, регулирования и регистрации температуры и других неэлектрических величин (частоты, давления, расхода, уровня и др.), преобразованных в электрические сигналы силы, напряжения постоянного тока и активное сопротивление постоянному току (таблица 4.3). Значения измеряемых величин отображаются на цифровом индикаторе прибора и на бумажной диаграммной ленте в виде графика. Бумажный регистратор находится на щите управления туннельной печью обжига керамического кирпича.



Рисунок 4.12 – Регистратор бумажный РМТ 39D

Таблица 4.3 – Технические характеристики бумажного регистратора РМТ

39D

Характеристика	Значение
Исполнение	Ех- взрывозащищенное
Количество каналов	6
Количество уставок на каждый канал	4
Количество реле на каждый канал	2
Встроенный источник питания	24В(2мА)
Скорость перемещения диаграммы бумаги	10,20,60,120мм/ч
Тип записи	Точечная
Электромагнитная совместимость(ЭМС)	III-A
Интерфейс	RS-232, RS-485
Передняя панель	144x144мм
Монтажная глубина	250мм
Вырез на щите	138-138мм

В соответствии с поставленной целью и задачами, экспериментальные исследования проводились в следующей очередности:

– работа туннельной печи №2 без настройки и программной реализации (эксперимент №1);

– работа туннельной печи №2 с программной настройкой на контроллерном уровне семимерного четкого регулятора с интервальной неопределенностью (эксперимент №2);

– получение реальных значений температур с помощью бумажного регистратора РМТ 39D по зонам обжига, расходы ГВС и разряжение ДГ и НГ на выходе из зоны обжига.

В системе управления туннельной печью имеется пятнадцать регулируемых (таблица 4.4) и десять контролируемых (таблица 4.5) параметров.

Таблица 4.4 – Перечень регулируемых параметров

№	Позиция и обозначение	Наименование	Единица измерения	Диапазон изменения, °С
1	2, $T_1$	Температура первой зоны подготовки поз.2	°С	-50 – 1300
2	4, $T_2$	Температура второй зоны подготовки поз.4	°С	-50 – 1300
3	8, $T_3$	Температура третьей зоны подготовки поз.8	°С	-50 – 1300
4	12, $T_1$	Температура первой зоны обжига поз.12	°С	-50 – 1300
5	14, $T_2$	Температура второй зоны обжига поз.14	°С	-50 – 1300
6	16, $T_3$	Температура третьей зоны обжига поз.16	°С	-50 – 1300
7	18, $T_4$	Температура четвертой зоны обжига поз.18	°С	-50 – 1300
8	20, $T_5$	Температура пятой зоны обжига поз.20	°С	-50 – 1300
9	22, $T_6$	Температура шестой зоны обжига поз.22	°С	-50 – 1300
10	25, $T_7$	Температура седьмой зоны обжига поз.25	°С	-50 – 1300
11	27, $T_1$	Температура первой зоны охлаждения поз.27	°С	-50 – 1300
12	31, $T_2$	Температура второй зоны охлаждения поз.31	°С	-50 – 1300
13	7, PE	Давление ГВС	кПа	4
14	28, PE	Разряжение ДГ	кПа	0,6
15	34, PE	Разряжение ДГ	кПа	0,6

Таблица 4.5 – Перечень контролируемых параметров

№	№ поз.	Наименование	Единица измерения	Норма
1	3	Давление первой зоны подготовки	кПа	0,6
2	5	Давление второй зоны подготовки	кПа	0,6
3	6	Давление третьей зоны подготовки	кПа	0,6
4	11	Разряжение газов первая зона обжига	кПа	-0,260
5	24	Разряжение ДГ вторая зона обжига	кПа	-0,260
6	29	Давление первой зоны охлаждения	кПа	0,6
7	30	Давление второй зоны охлаждения	кПа	0,6
8	32	Давление третьей зоны охлаждения	кПа	0,6
9	1	Положение открытия входных ворот		отк. вкл.
10	33	Положение открытия выходных ворот		отк. вкл.

Результатами экспериментальных исследований работы туннельной печи №2 ООО «Стерлитамакский кирпичный завод» являются полученные значения, которые представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Экспериментально полученные значения

№ п/п	Контролируемый показатель	Значение		Процент улучшения, %
		исходное	полученное	
1.	Температура зоны обжига №1, °С	742	720	2,97
2.	Температура зоны обжига №2, °С	890	860	3,38
3.	Температура зоны обжига №3, °С	1010	980	2,70
4.	Температура зоны обжига №4, °С	1030	1000	2,91
5.	Температура зоны обжига №5, °С	1010	980	2,97
6.	Температура зоны обжига №6, °С	870	840	3,45
7.	Температура зоны обжига №7, °С	728	700	3,85
8.	Расход ГВС, м <sup>3</sup> /ч	1250	1084	13,28
9.	Разряжение ДГ из зоны обжига, Па	-260	-260	100

График, полученный бумажным регистратором РМТ39D во время эксперимента №1, представлен на рисунке 4.13.

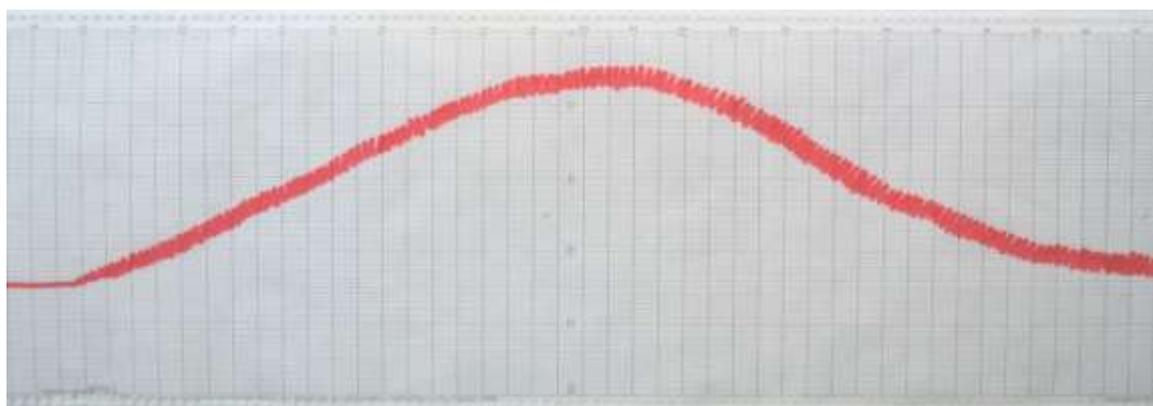


Рисунок 4.13 – График зависимости температуры от времени (эксперимент №1)

Во время проведения эксперимента №1 управление туннельной печью происходило с ПИД-регуляторами, когда температура в печи достигала 600 °С, колебания составляли  $\pm 17$  °С, при температуре 980 °С равно  $\pm 33$  °С.

Рассмотрим график (рисунок 4.14), полученный во время эксперимента №2 с помощью бумажного регистратора РМТ39D.

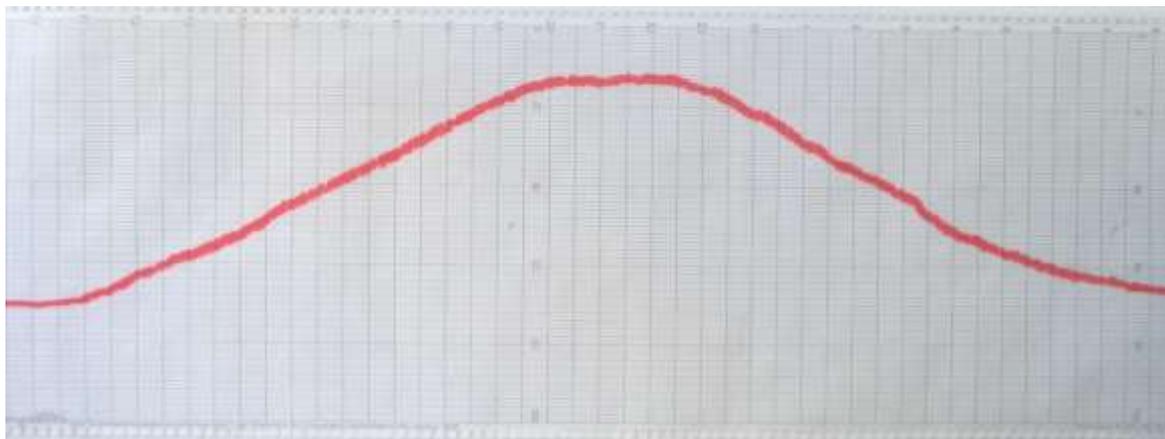


Рисунок 4.14 – График зависимости температуры от времени (эксперимент №2)

Во время проведения эксперимента №2 колебание температуры составило  $\pm 3$  °С.

На основании проведенных экспериментальных исследований, можно сделать вывод о том, что в туннельной печи осуществляется стабилизация температуры  $710 \pm 3$  °С,  $720 \pm 3$  °С и т.д. с использованием семимерного четкого регулятора с компенсатором взаимного влияния контуров регулирования в виде дополнительной системы продукционных правил.

В ходе эксперимента №3 для выяснения зависимости коэффициента самовыравнивания  $k_I$  от давления в туннельной печи  $P_0$  (рисунок 4.15) было доказано, что при постоянном давлении ГВС на входе в туннельную печь, для того чтобы достичь заданного разрежения НГ на выходе, необходимо в печи поддерживать давление, значение которого не превышало бы минимального. При этом разрежение НГ равно 0,6 кПа, а минимальное значение давления в туннельной печи равно 1,55 кПа. Это показывает достоверность полученных формул и графиков в третьей главе.

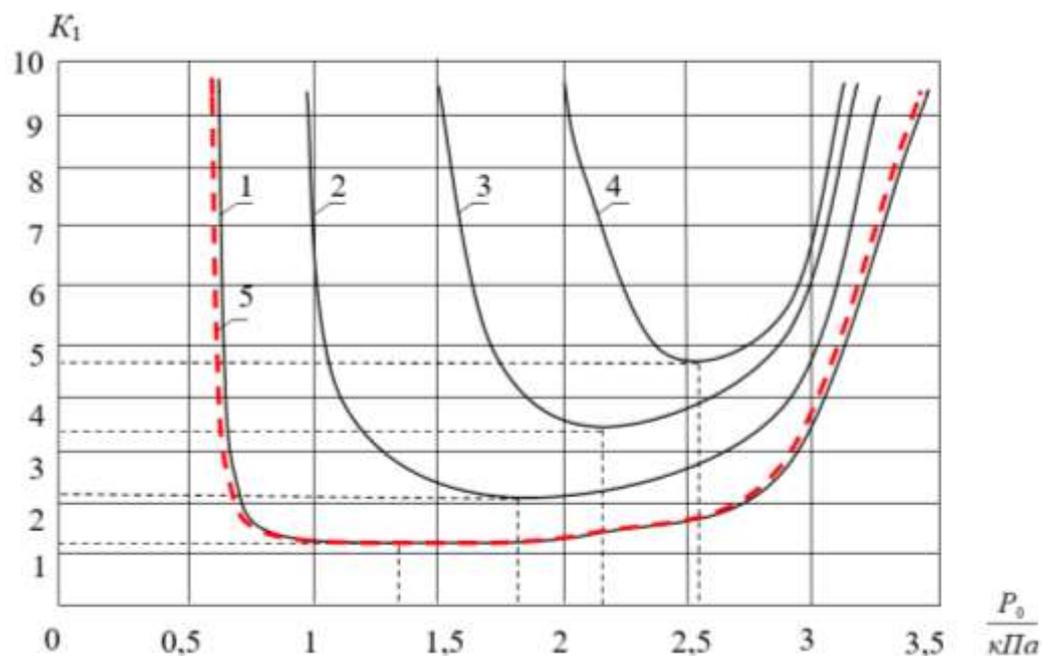


Рисунок 4.15 – Результат зависимости давления в туннельной печи  $P_0$ , от коэффициента самовыравнивания где  $P_{30}$  равно, кПа: 1 – 0,6; 2 – 0,95; 3 – 1,5; 4 – 2,5; 5 – 0,6

Таким образом, полученные результаты экспериментов №1, №2 и №3 дают основание для применения ЛЧРСИН в производстве керамических стеновых материалов.

#### 4.5 Реализация автоматизированной системы в среде TraceMode 6

В программе TraceMode 6 [101,102] имеются необходимые инструменты для управления всеми технологическими процессами производства керамического кирпича в туннельной печи, а также главный экран, предоставляющий пользователю всю необходимую информацию для изменения и наблюдения параметров технологического процесса. На рисунке 4.16, представлена мнемосхема АСУ туннельной печью обжига керамического кирпича.

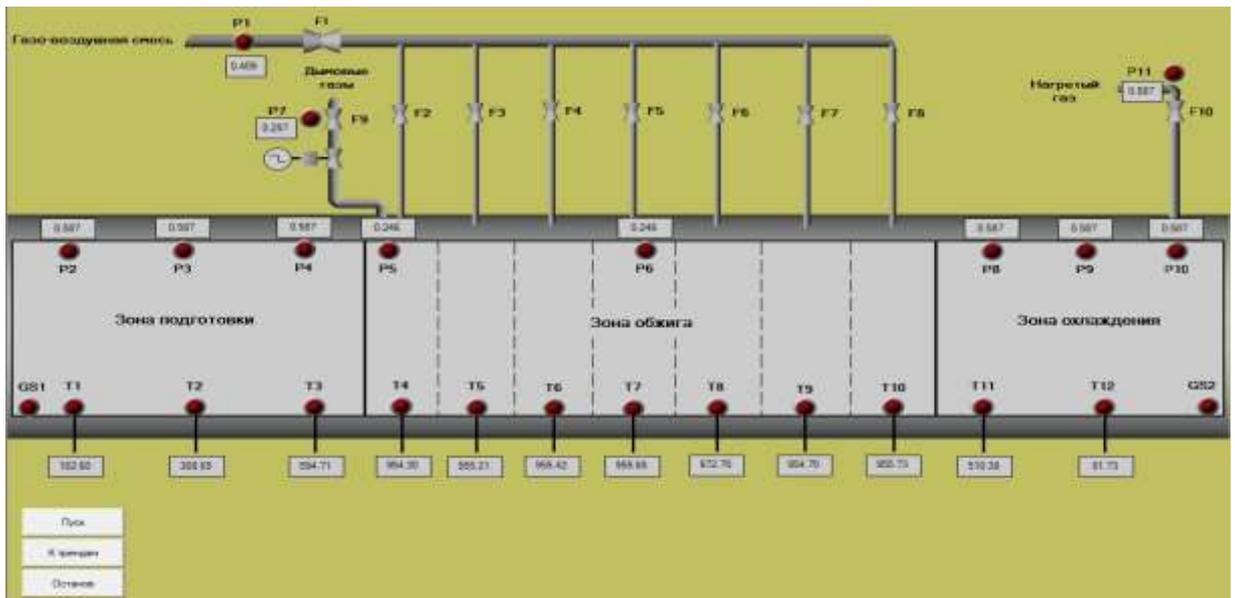


Рисунок 4.16 – Мнемосхема АСУ туннельной печью обжига керамического кирпича

На рисунке 4.17 представлены окно тренда зависимости температур для зоны подготовки от времени при управлении с МЧРСИН для датчиков температур 2,4,8, которые указаны на рисунке 4.4.

На рисунках 4.18 и 4.19 показаны датчики температур, которые представлены на рисунке 4.4, из анализа которых следует, что колебание температуры в стадии обжига керамического кирпича при управлении от МЧРСИН составляет  $\pm 3$  °С (рисунок 4.19), а в случае с ПИД - регулятором –  $\pm 17$  °С, когда температура в печи равна 600 °С, при температуре 980 °С колебания достигают  $\pm 33$  °С (рисунок 4.18).

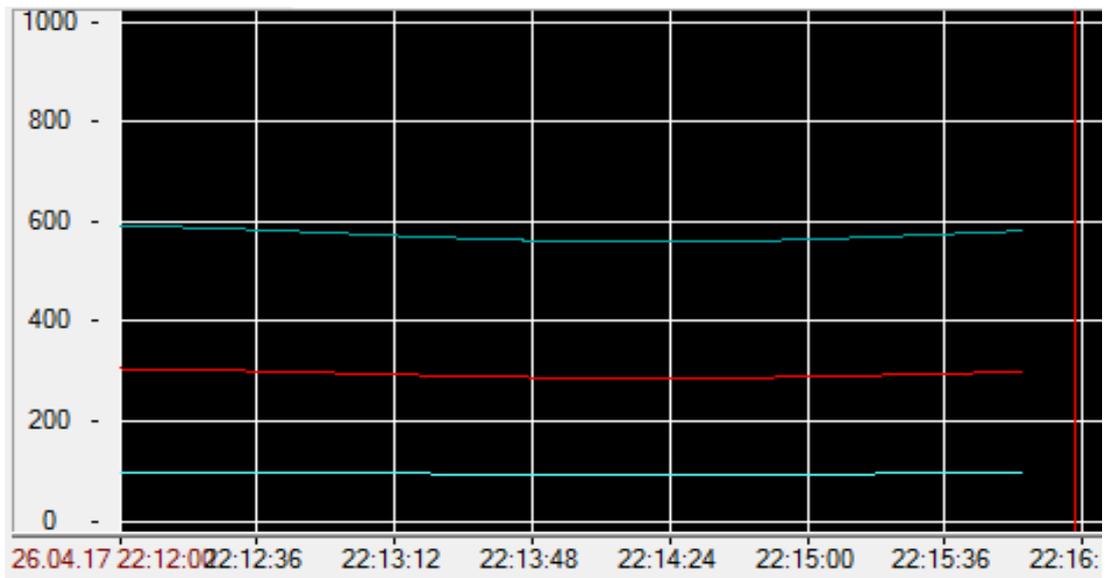


Рисунок 4.17 – Окно тренда для зоны подготовки (зависимость температур от времени)

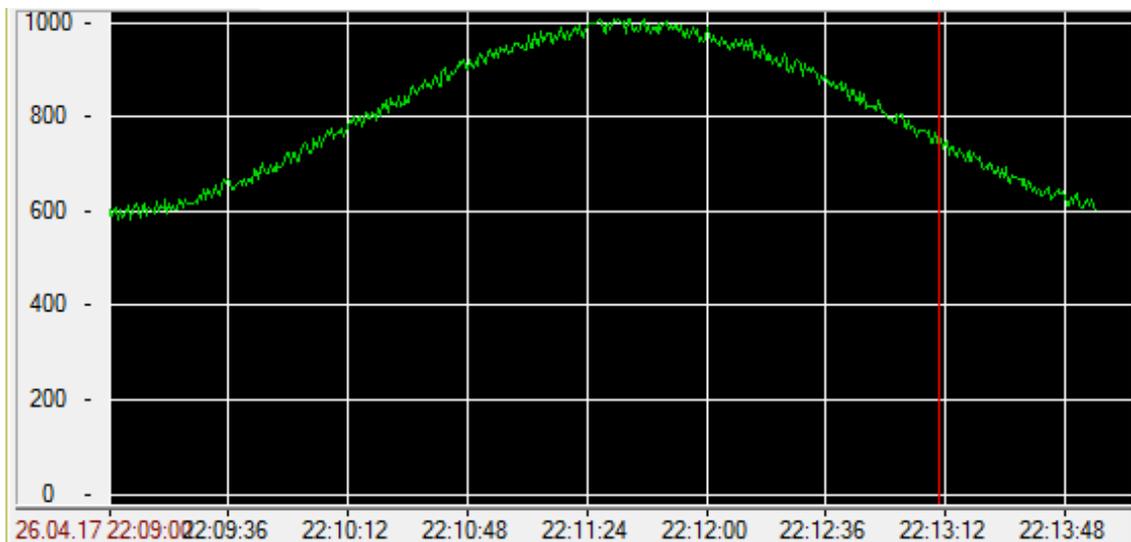


Рисунок 4.18 – Окно тренда зависимости температур от времени для зоны обжига при управлении с ПИД – регуляторами

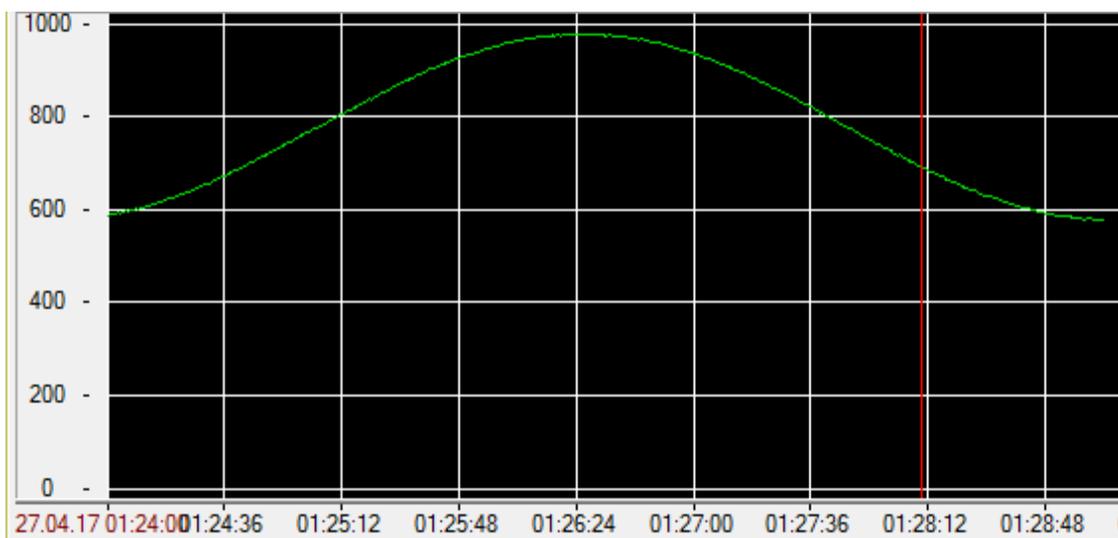


Рисунок 4.19 – Окно тренда зависимости температур от времени для зоны обжига при управлении с МЧРСИН

На рисунке 4.20 показаны все датчики температур, которые представлены на рисунке 4.4, расположенные в зоне охлаждения при управлении с МЧРСИН.

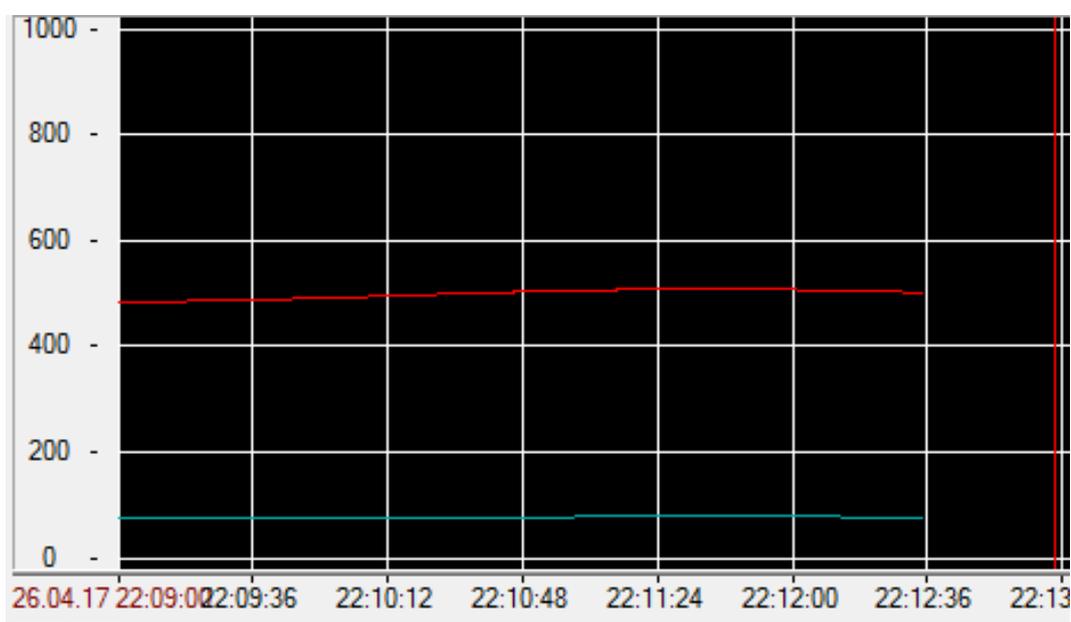


Рисунок 4.20 – Окно тренда зависимости температур от времени зоны охлаждения при управлении с МЧРСИН

На рисунке 4.21 представлен графический экран «Текст», который служит для задания параметров контролируемой величины.

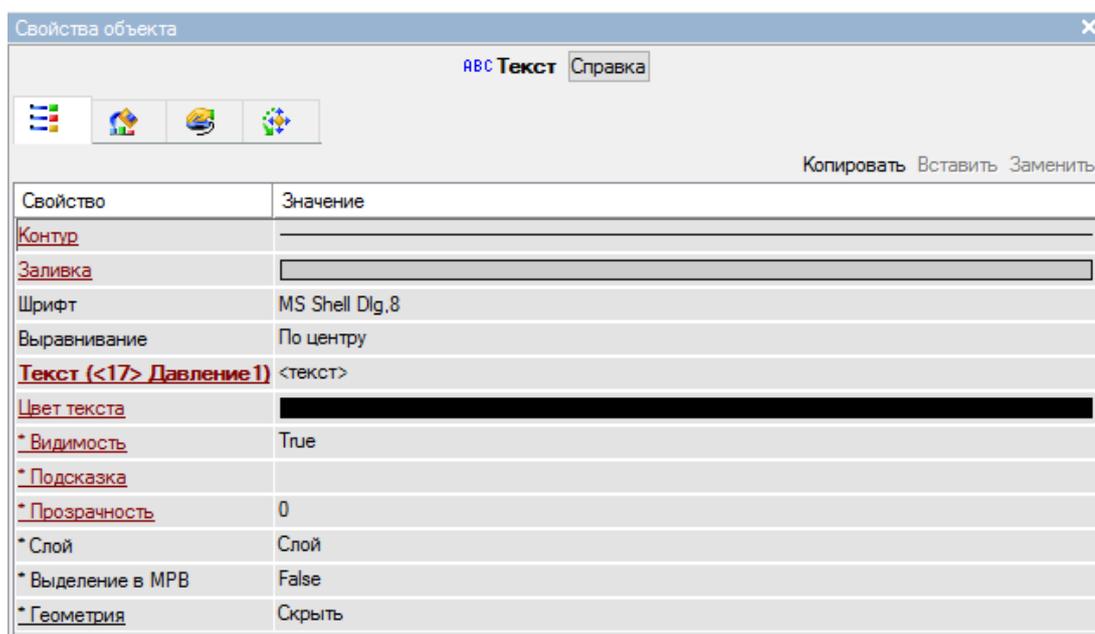


Рисунок 4.21 – Графический экран параметров контролируемой величины «Текст»

Для просмотра изменения температуры и давления во времени имеется тренд, представленный на рисунке 4.22.

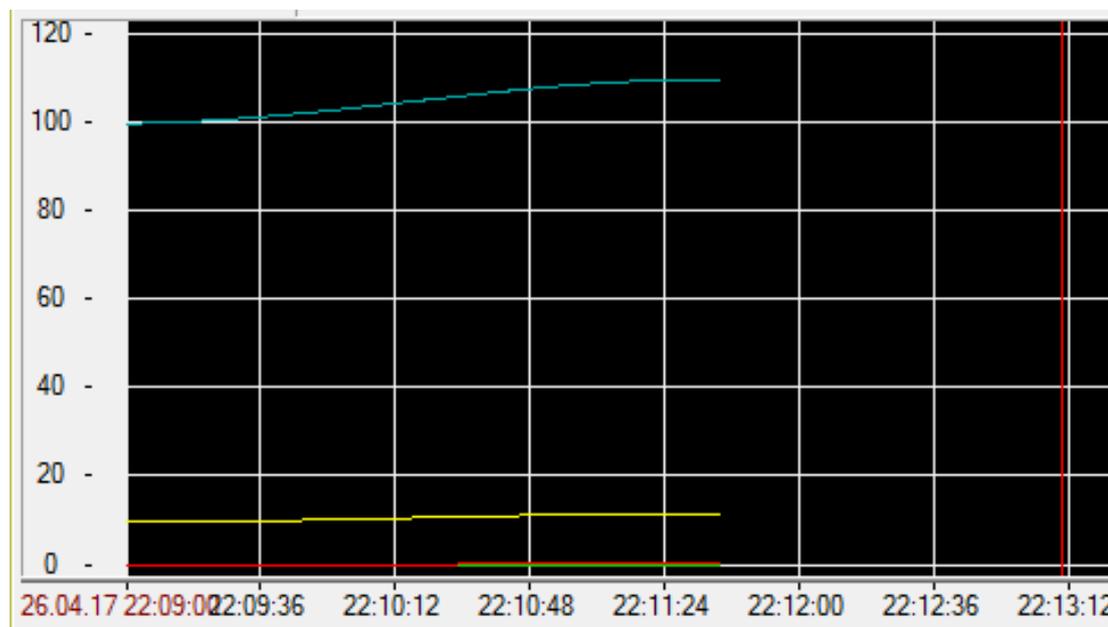


Рисунок 4.22 – Окно тренда зависимости давлений от времени при управлении с МЧРСИН

На рисунке 4.23 представлены контуры «F<sub>10</sub> – T<sub>1</sub>» и свойства кривой температур «Температура1\_R» при управлении с МЧРСИН.

Свойства кривой температуры остальных контуров будут аналогичным образом.

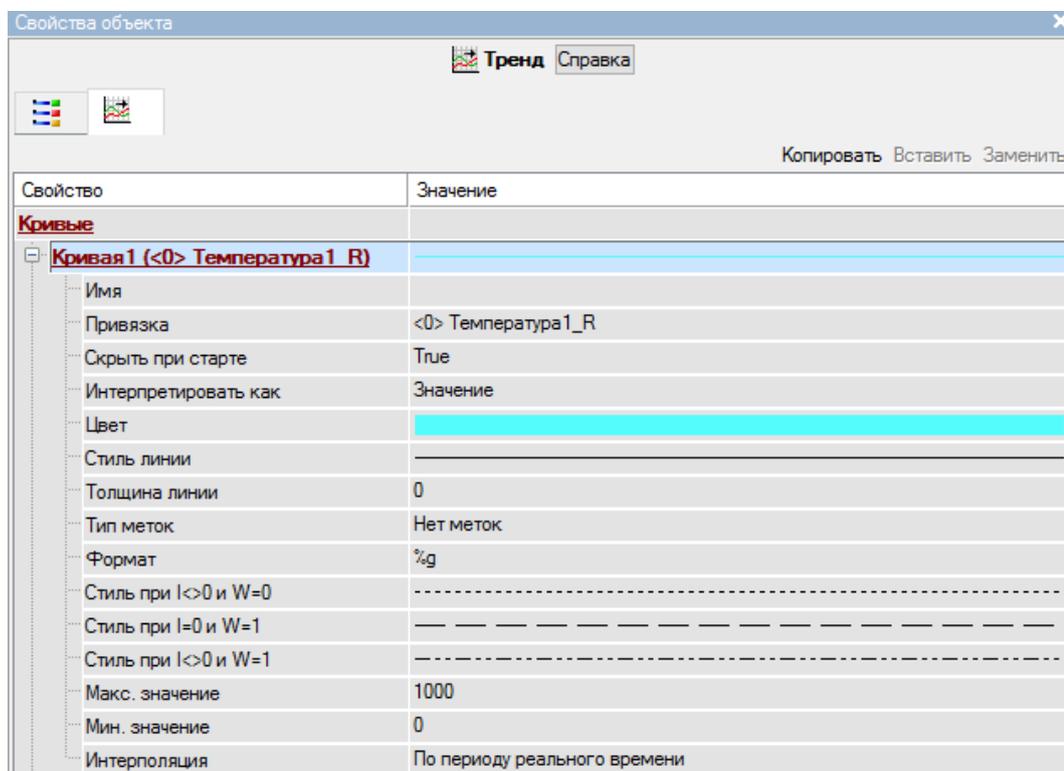


Рисунок 4.23 – Окно свойств кривой температуры контура «F<sub>10</sub> – T<sub>1</sub>» «Температура1\_R»

Разработана программа-имитатор для стадий «Обжиг» и «Остановка процесса» для предварительной проверки работоспособности созданного проекта, для остальных стадий программа-имитатор работает аналогичным образом.

На рисунке 4.24 представлены аргументы программа-имитатор и их свойства для стадии обжига керамического кирпича.

Имя	Тип	Тип данных	Значение п	Привязка
Температура4_R	IN/OUT	REAL	50	Температура4:Реальное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход2_R	IN	REAL		Расход2:Реальное значение (Система.RTM_1.Каналы)
DC_R	IN	REAL		DC:Реальное значение (Система.RTM_1.Каналы)

Рисунок 4.24 – Окно свойств программа-имитатор для стадий «Обжиг» и «Остановка процесса»

Программа-имитатор для стадий «Обжиг» и «Остановка процесса» написана на языке FBD, предназначена для имитации изменения, давления, температуры расхода ГВС в туннельной печи. На рисунке 4.25 представлена программа-имитатор семимерного четкого регулятора с интервальной неопределенностью для контура « $F_{10} - T_1$ », для остальных контуров регулирование выполняется аналогичным образом.

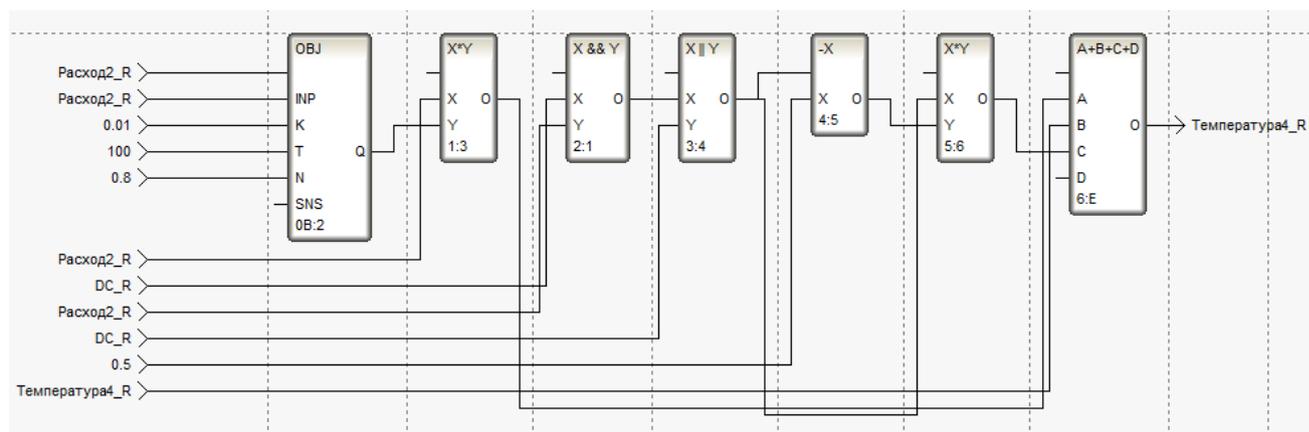


Рисунок 4.25 – Программа-имитатор контура « $F_{10} - T_1$ » семимерного четкого регулятора с интервальной неопределенностью

Листинг программы «Обжиг» представлен на рисунке 4.26.

Программа «Обжиг» предназначена для управления туннельной печью в процессе обжига керамического кирпича и написана на языке ST. Стадия обжига наступает после достижения в туннельной печи температуры  $600^{\circ}\text{C}$ . Свойства аргументов программы «Обжиг» при управлении с МЧРСИН представлены на рисунке 4.27.

```

PROGRAM
  VAR_INPUT Температура4_R : REAL; END_VAR
  VAR_INPUT Температура5_R : REAL; END_VAR
  VAR_INPUT Температура6_R : REAL; END_VAR
  VAR_INPUT Температура7_R : REAL; END_VAR
  VAR_INPUT Температура8_R : REAL; END_VAR
  VAR_INPUT Температура9_R : REAL; END_VAR
  VAR_INPUT Температура10_R : REAL; END_VAR
  VAR_INPUT Путь1_R : BOOL; END_VAR
  VAR_INPUT Путь2_R : BOOL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход1_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход2_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход3_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход4_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход5_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход6_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход7_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход8_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход9_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход10_In : REAL; END_VAR
  VAR_INOUT DC_In : REAL; END_VAR
  VAR_INOUT Tbx_In : REAL; END_VAR
  VAR a0 : BOOL := 0; END_VAR
  VAR a1 : BOOL := 1; END_VAR
  VAR a2 : BOOL := 2; END_VAR
  VAR a3 : BOOL := 3; END_VAR
  VAR a4 : BOOL := 4; END_VAR
  VAR a5 : BOOL := 5; END_VAR
  VAR a6 : BOOL := 6; END_VAR

  var a:array[7,18] of bool; end_var
  var GS:boolean; end_var
  GS:=Путь1_R&Путь2_R;
  if DC_In==1 and Tbx_In==1 and GS then
    fazzificator(Температура4_R,Температура5_R,Температура6_R,Температура7_R,Температура8_R,
    |Температура9_R,Температура10_R,a);
    Rule1(a0,a,Расход2_In);
    Rule2(a1,a,Расход3_In);
    Rule3(a2,a,Расход4_In);
    Rule4(a3,a,Расход5_In);
    Rule5(a4,a,Расход6_In);
    Rule6(a5,a,Расход7_In);
    Rule7(a6,a,Расход8_In);
  end_if;
  if Tbx_In==0 and DC_In==1 then DC_In=2;Расход1_In=0;Расход2_In=0;Расход3_In=0;Расход4_In=0;Расход5_In=0;
  Расход6_In=0;Расход7_In=0;Расход8_In=0;Расход9_In=0;Расход10_In=0;
  end_if;

END_PROGRAM

```

Рисунок 4.26 – Листинг программы «Обжиг»

Имя	Тип	Тип данных	Значение по	Привязка
Температура4_R	↓ IN	REAL		Температура4:Реальное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Температура5_R	↓ IN	REAL		Температура5:Реальное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Температура6_R	↓ IN	REAL		Температура6:Реальное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Температура7_R	↓ IN	REAL		Температура7:Реальное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Температура8_R	↓ IN	REAL		Температура8:Реальное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Температура9_R	↓ IN	REAL		Температура9:Реальное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Температура10_R	↓ IN	REAL		Температура10:Реальное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Путь1_R	↓ IN	BOOL		Путь1:Реальное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Путь2_R	↓ IN	BOOL		Путь2:Реальное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход1_In	↑ OUT	REAL		Расход1:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход2_In	↑ OUT	REAL		Расход2:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход3_In	↑ OUT	REAL		Расход3:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход4_In	↑ OUT	REAL		Расход4:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход5_In	↑ OUT	REAL		Расход5:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход6_In	↑ OUT	REAL		Расход6:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход7_In	↑ OUT	REAL		Расход7:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход8_In	↑ OUT	REAL		Расход8:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход9_In	↑ OUT	REAL		Расход9:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход10_In	↑ OUT	REAL		Расход10:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
DC_In	↑ IN/OUT	REAL		DC:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Твх_In	↑ IN/OUT	REAL		Твх:Реальное значение (Система.RTM_1.Каналы)

Рисунок 4.27 – Окно свойств аргументов программы «Обжиг» при управлении с МЧРСИН

Программа «Остановка процесса» написана на языке ST и предназначена для снижения температуры и давления ГВС. Листинг программы «Остановка процесса» и свойств аргументов при управлении с МЧРСИН представлены на рисунках 4.28 и 4.29 соответственно.

```

PROGRAM
  VAR_OUTPUT Пуск_In : BOOL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Путь1_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Путь2_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход1_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход2_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход3_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход4_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход5_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход6_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход7_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход8_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход9_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT Расход10_In : REAL; END_VAR
  VAR_OUTPUT DC_In : REAL; END_VAR

  Пуск_In=0;
  Путь1_In=0;
  Путь2_In=0;
  Расход1_In=0;
  Расход2_In=0;
  Расход3_In=0;
  Расход4_In=0;
  Расход5_In=0;
  Расход6_In=0;
  Расход7_In=0;
  Расход8_In=0;
  Расход9_In=0;
  Расход10_In=0;
  DC_In=0;
  |
END_PROGRAM

```

Рисунок 4.28 – Листинг программы «Остановка процесса» при управлении с МЧРСИН

Имя	Тип	Тип данных	Значение по умолчанию	Привязка
Пуск_In	↑ OUT	BOOL		6 Пуск:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Путь1_In	↑ OUT	REAL		6 Путь1:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Путь2_In	↑ OUT	REAL		6 Путь2:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход1_In	↑ OUT	REAL		6 Расход1:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход2_In	↑ OUT	REAL		6 Расход2:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход3_In	↑ OUT	REAL		6 Расход3:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход4_In	↑ OUT	REAL		6 Расход4:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход5_In	↑ OUT	REAL		6 Расход5:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход6_In	↑ OUT	REAL		6 Расход6:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход7_In	↑ OUT	REAL		6 Расход7:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход8_In	↑ OUT	REAL		6 Расход8:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход9_In	↑ OUT	REAL		6 Расход9:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
Расход10_In	↑ OUT	REAL		6 Расход10:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)
DC_In	↑ OUT	REAL		6 DC:Входное значение (Система.RTM_1.Каналы)

Рисунок 4.29 – Окно свойств аргументов программы «Остановка процесса» при управлении с МЧРСИН

Таким образом, с помощью средств SCADA-системы TraceMode 6 реализована АСУ туннельной печью как многосвязного объекта с визуализацией температуры в семи точках рабочего пространства и с компенсацией взаимного влияния контуров регулирования с помощью специальной системы производственных правил (Приложение Е). За счет применения разработанного комплекса программ уменьшился брак керамического кирпича с 3 % до 1,5 % от общего количества выпускаемой продукции. На предприятии за сутки выпускается 138 тыс. штук керамических кирпичей, за год 50370 тыс. штук, и 3 % брака от общего количества составляет 1511 тыс. штук. Средняя цена одного керамического кирпича стандартных размеров (250x120x65) за 2016 год составила 8 рублей. Поэтому убытки за 2016 год составили порядка 12 088 тыс. рублей – это 3 % брака, а 1,5 % составит 6044 тыс. рублей, что является достаточно серьезной суммой для небольшого предприятия.

Таким образом, средствами SCADA-системы Trace Mode 6 реализована АСУ туннельной печью. Применение данной системы позволило снизить колебание температуры на 60 °С.

## Заключение

В работе проведен анализ работы действующих АСУ процессом обжига кирпича, который показал, что они работают с достаточно большой погрешностью. Это связано с недостатком знаний о динамике процесса обжига.

Разработаны математические модели процесса обжига в туннельной печи как объекта АУ с учетом давления и расхода газовой смеси, разрежения и расхода дымовых и нагретых газов. Составлены структурные схемы туннельной печи обжига керамического кирпича как объекта АУ, которые позволяют по каждому входному параметру определить передаточную функцию. Исследованы соотношения давления и расхода газовой смеси, разрежения и расхода дымовых и нагретых газов. В зависимости от режима работы туннельной печи выявлены оптимальные параметры процесса обжига.

Разработаны алгоритмы управления процессом обжига керамического кирпича, применение которых для семимерного четкого регулятора с помощью компенсации и специальной системы производственных правил позволило решить задачу минимизации погрешности регулирования температуры в зоне обжига.

Проведены экспериментальные исследования с различными типами регуляторов процесса обжига, которые доказали адекватность разработанных моделей, а также эффективность использования МЧРСИН, позволяющего снизить колебание температуры на  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  от заданного значения, что позволяет уменьшить брак керамического кирпича с 3 % до 1,5 %.

Практические результаты диссертационной работы приняты к внедрению в ООО «Стерлитамакский кирпичный завод» и в учебный процесс ОГУ. Ожидается, что использование полученных результатов позволит предприятию получить годовой экономический эффект не менее 6044 тыс. рублей за счет внедрения разработанной АСУ на базе SCADA-системы для управления производством керамического кирпича. Кроме этого, применение разработанной АСУ позволяет повысить энергоэффективность за счет снижения расхода ГВС в среднем на 13 %, а также снижение вредных выбросов в процессе обжига.

## Список использованных источников

1. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://www.minstroyrf.ru/> (Дата обращения 16.01.2017).
2. Федеральная целевая программа «Энергосбережение России», принятая Постановлением Правительства РФ №80 от 24.01.98 г.
3. Сабанчин, В.Р. Особенности функционирования туннельной печи / В.Р. Сабанчин // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Промышленность: состояние, перспективы, инновации» 31 октября 2013г. В 5 частях. Часть III. Мин-во обр. и науки – М.: «АР-Консалт», 2013 – С.37 – 39.
4. Сабанчин, В.Р. Проблемы и недостатки производства керамического кирпича на мелеузовском кирпичном заводе / В.Р. Сабанчин, А.Ф. Занина // Материалы научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи как инновационный ресурс современного общества». – Кумертау: ГУП РБ Кумертауская городская типография, 2013 г.
5. Сабанчин, В.Р. Рекомендации по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в отношении общего имущества многоквартирных домов / В.Р. Сабанчин, Г.Ф. Сагитова // Вестник Уфимского государственного университета экономики и сервиса УГУЭС «Наука. Образование. Экономика». Канаев, В.К. Уфа: Серия Экономика. – 2014. – №1(7). – С.205-208.
6. Турчанинов, В.И. Технология стеновых материалов: учебное пособие / В.И. Турчанинов. – Оренбург: ОГУ, 2008. – 205 с.
7. Кокшарев, В. Н. Тепловые установки / В.Н. Кокшарев, А.А. Кучеренко – К.: Вища школа, 1990. – 335 с.
8. Канаев, В.К. Новая технология строительной керамики / В.К. Канаев. Канаев, В.К. – Москва: Стройиздат, 1990. – 262 с.

9. Гольцова, О.Б. Причинно-следственные связи брака при обжиге кирпича в туннельных печах / О.Б. Гольцова, В.С. Клековкин, О.Б. Наговицын, Н.Л. Дмитриев // Стекло и керамика. – 2005. – №3. – С. 26 – 28
10. Хусаинов, А.Н. Кинетика прогрева кирпичной садки произвольной конфигурации / А.Н. Хусаинов, В.Е. Мизонов, Н.Н. Елин // Информационная среда вуза: Материалы XVI Междунар. конф. Иваново: ИГАСУ. – 2009. – С. 520 – 522.
11. Хавер, С.В. Моделирование прогрева и охлаждения насадки регенеративного теплообменника / С.В. Хавер, Н.Н. Елин, В.Е. Мизонов // Известник ВУЗов, химия и химическая технология. – 2007. – №12. – С. 105 – 108.
12. Ракутина, Д.В. Исследование режима обжига керамических изделий в туннельных печах кирпичного производства / Е.Н. Гнездов, В.В. Бухмиров, П.А. Корвяков, Д.В. Ракутина // Промышленные печи и трубы. – 2006. – №1. – С.75 – 79.
13. СНиП 2.08.01-89 – Жилые здания: строительные нормы и правила / Минстрой России. – М: ГП ЦПП 1995. – 56 с.
14. Некрасов, А.С. Перспективы развития топливно-энергетического комплекса России на период до 2030 года // Проблемы прогнозирования / А.С. Некрасов, Ю.В. Синяк. – 2007. – №4. – С. 21 – 52.
15. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления: учеб. пособие / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – СПб.: Профессия, 2004. – 750 с.
16. Денисенко, В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации / В.В. Денисенко // СТА. – 2007. – №4. – С. 86 – 97. – 2008. – №1. – С. 86 – 99.
17. Гуров, А.М. Автоматизация технологических процессов: учеб. пособие для техникумов / А.М. Гуров. – М.: Высшая школа, 1979. – 380 с.
18. Денисенко, В.В. Разновидности ПИД-регуляторов / В.В. Денисенко. – Автоматизация в промышленности. – 2007. – №6. – С. 45 – 50.
19. Ким, Д. П. Сборник задач по теории автоматического управления: Линейные системы / Д. П. Ким. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 166 с.

20. Ким, Д.П. Сборник задач по теории автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д.П. Ким. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 328 с.
21. Келим, Ю. М. Типовые элементы систем автоматического управления / Ю. М. Келим. – М.: ФОРУМ ИНФРА-М, 2002. – 384 с.
22. Коломейцева, М. Б. Адаптивные системы управления динамическими объектами на базе нечётких регуляторов / М. Б. Коломейцева, Д. Л. Хо. – М.: Компания "Спутник +", 2002. – 138 с.
23. Комиссарчик, В.Ф. Автоматическое регулирование технологических процессов / В. Ф. Комиссарчик. – Тверь: ТГТУ, 2001. – 248 с.
24. Колдуэлл, С. Логический синтез релейных устройств / С. Колдуэлл; пер. с англ. Г. К. Москатова, А. Д. Таланцева; под ред. М. А. Гаврилова. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – 740 с.
25. Круглов, В. В. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети : учеб. пособие / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – М. : Изд-во Физ.-мат. лит., 2001. – 224 с.
26. Гузаиров, М.Б. Управление технологическими процессами, реализованное на четких логических регуляторах / М.Б. Гузаиров, Е.А. Муравьева. – М.: Машиностроение, 2012. – 305с.
27. Leva A., Cox C., Ruano A. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilization. IFAC Professional Brief.– 84 p.
28. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13. No. 4. P. 559-576.
29. Li Y., Ang K.H, Chong G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art. IEEE Control Systems Magazine, Feb. 2006, P.41-54.
30. Kayashev, A. I. Algorithm of physical quantities fuzzification on the basis of crisp sets / A. I. Kayashev, E. A. Muravyova, A. F. Antipin // CSIT'2007 : proceedings of the international workshop. – Ufa : USATU, 2007. – Vol. 2. – P. 82-83.

31. Kayashev, A. I. The basis of automated designing of multivariate logical regulators / A. I. Kayashev, E. A. Muravyova, A. F. Antipin // CSIT'2009 : proceedings of the international workshop. – [S. l.: s. n.], 2009. – Vol. 1. – P. 60-62.

32. Антипин, А.Ф. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами на основе многомерных четких логических регуляторов: автореф. диссертации канд. техн. наук: 05.13.06/ А.Ф. Антипин. – Уфа. 2010 – 22 с.

33. Сазонова, Т.В. Многомерная интеллектуальная система управления автоклавом для производства шлакоблоков автоклавного твердения из золошлакоотходов: Научные исследования: информация, анализ, прогноз: монография / Н-34; под общей ред. проф. О.И. Кирикова. – Книга 28. / Т.В. Сазонова, Л.Ю. Полякова. – Воронеж: ВГПУ, 2010. – С.568 – 579.

34. Сабанчин, В.Р. Разработка АСУ ТП туннельной печи на основе логических регуляторов при производстве керамического кирпича / В.Р. Сабанчин, Т.В. Сазонова // международная научно-практическая конференция «Инновационное развитие современной науки», г.Уфа, 31 января 2014г., – Уфа: РИЦ БашГУ, 2014. – С.317 – 321.

35. Сабанчин, В.Р. Автоматизированная система управления технологическими процессами туннельной печи кирпичного завода / В.Р. Сабанчин // материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Наука. Образование. Производство». – Кумертау: Кумертауский филиал ОГУ, 2014. – С.178 – 182.

36. Дорф, Р. Современные системы управления / Р.Дорф, Р.Бишоп. Пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832с.

37. Сазонова, Т.В. Многомерный четкий логический регулятор, с отработкой производственных правил в ситуационных подпрограммах / Т.В.Сазонова, А.В.Богданов, Е.А.Муравьева // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2012. – № 4. – С.248 –252.

38. Методы классической и современной теории автоматического управления: в 3 т. / под ред. Н. Д. Егупова. М: Изд-во МГТУ им.

Н. Э. Баумана. 2000. Т.1. – 748 с.; Т.2. – 736 с.; Т.3. – 748 с.

39. Jager, R. Fuzzy logic in control: Ph.D. Technische Universiteit Delft. 1995.

40. <http://zadeh.narod.ru> – русскоязычный сайт, посвященный основателю нечеткой логики профессору Лотфи Заде.

41. <http://www.vic.spb.ru/sci/sci.htm> – русскоязычный сайт по нечеткой логике, нечеткому обучению и робототехнике.

42. <http://www.erudit.de> – European Network for Fuzzy Logic and Uncertainty Modeling in Information Technology – сайт Европейской информационной сети по нечеткой логике и моделированию в условиях неопределенности.

43. Grass, J., and Zilberstein, S. Anytime Algorithm Development Tools. SIGART Bulletin (Special Issue on Anytime Algorithms and Deliberation Scheduling) 7(2). Forthcoming. 1996. P. 151 – 159.

44. Horsch, Michael, Poole David An Anytime algorithm for decision making under uncertainty. In Proceedings of the Twelfth International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1995. P. 726 – 736.

45. Патент на полезную модель 51242, Российская Федерация, МПК G05B 13/02 Самонастраивающаяся система автоматического управления нестационарными технологическими объектами / Е.А. Муравьева, К.А. Колязов, Г.А. Каяшева, авторы и патентообладатели. № 2005132418/22; заявлено 21.10.2005; опубликовано 27.01.2006, бюл. №3.

46. Патент на изобретение 2 309 443, Российская Федерация, МПК G05B 13/02 Нечеткий регулятор с лингвистической обратной связью для управления технологическими процессами: / Е.А. Муравьева, Каяшева, авторы. Патентообладатель ГОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной университет». № 2006107334/09; заявлено 09.03.2006; опубликовано 27.10.2007, бюл. № 30.

47. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и Fuzzy TECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.

48. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / под общ. ред. К. А. Пупкова. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 346 с.

49. Сабанчин, В.Р. Туннельная печь для обжига керамических изделий как объект автоматического управления по разрежению продуктов горения / Н.И. Жежера, В.Р. Сабанчин // Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223 – 5167 <http://naukovedenie.ru/> Выпуск 6 (25), ноябрь – декабрь 2014 – С.1 – 12.

50. Емцев, Б.Т. Техническая гидромеханика: учебник для вузов / Б.Т. Емцев; М-во высш. и средн. образования СССР. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987. – 440 с.

51. Жежера Н.И. Математическое описание сепарационной установки газ-нефть как объекта управления по давлению газа / Н.И. Жежера, В.В. Тугов // Оренбург 2001. – 9с. – Деп. в ВИНТИ №1671 – В2001.

52. Жежера Н.И., Тугов В.В. Моделирование сепарационной установки газ-нефть как объекта управления по давлению газа / Н.И. Жежера, В.В. Тугов // Нефтяное хозяйство. – 2002. – №2. – С. 91 – 94.

53. Жежера Н. И. Математическое описание реактора пиролиза изношенных шин как объекта автоматического управления по давлению газов / Н.И. Жежера, С.А. Тямкин, Г.А. Сайденкова // Автоматизация и современные технологии. – 2010. – №12. – С. 33 – 36.

54. Башта, Т.М. Машиностроительная гидравлика. Справочное пособие / Т.М. Башта. – М.: Машиностроение, 1971. – 672 с.

55. Иващенко, Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем / Н.Н. Иващенко. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.

56. Теория автоматического управления. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления: учеб. пособие для вузов / Мин-во высш. и средн. специал. образования СССР; под ред. акад. А. А. Воронова. – М.: Высшая школа, 1977. – 288 с.

57. Лысов, В. Е. Теория автоматического управления. Основы линейной теории автоматического управления / В. Е. Лысов. - Самара: Самар. гос. техн. ун-т., 2001. – 200 с.

58. Сабанчин, В.Р. Туннельная печь-сушилка для обжига керамического кирпича / В.Р. Сабанчин, Н.И. Жежера // Материалы V Всероссийской научно-

практической конференции «Наука. Образование. Производство». – Кумертау: Кумертауский филиал ОГУ, 2014. – С.182 – 187.

59. Сабанчин, В.Р. Математическое описание туннельной печи для обжига керамических изделий как объекта автоматического управления по разрежению продуктов горения / В.Р. Сабанчин, Н.И. Жежера // Материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием). – Оренбург: Участок оперативной полиграфии ОГУ, 2015. – С.52 – 60.

60. Сабанчин, В.Р. Туннельная печь для обжига керамических изделий как объекта автоматического управления по разрежению продуктов горения / В.Р. Сабанчин, Н.И. Жежера // Интернет – журнала «Науковедение». – 2014. – №6 (25). – С.1 – 12.

61. Сабанчин, В.Р. Туннельная печь-сушилка при периодических изменениях разрежения печных газов / В.Р. Сабанчин, Н.И. Жежера // Оренбургский государственный университет, г. Оренбург Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры [Электронный ресурс]: материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием); Оренбург. гос. ун-т. – Электрон. дан. – Оренбург: ОГУ, 2016.

62. Сабанчин, В.Р. Разработка туннельной печи-сушилки при периодических изменениях разрежения печных газов / В.Р. Сабанчин, Н.И. Жежера // Ежемесячный научный журнал «Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук». – 2016. – №02(85) февраль. Часть II. – С.28–31.

63. Сабанчин, В.Р. Проектирование цифровой системы автоматического управления переменным разрежением газов в туннельной печи обжига керамических стеновых изделий / В.Р. Сабанчин, Н.И. Жежера // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015. – Том 7. – №2. – С.1 – 17.

64. Жежера, Н.И. Развитие теории и совершенствование автоматизированных систем испытаний изделий на герметичность: специальность: 05.13.06 дис. д-ра техн. наук / Н.И. Жежера / Оренбургский государственный университет. – Оренбург: 2004. – 441 с.

65. Нагорный, В.С. Устройства автоматики гидро- и пневмосистем / В.С. Нагорный, А.А. Денисов. – М.: Высшая школа, 1991. – 367 с.

66. Сабанчин, В.Р. Исследование устойчивости многомерного четкого регулятора температуры с интервальной неопределенностью в системах управления установками термообработки стройматериалов / Т.В. Сазонова, В.А. Суликова, А.И. Каяшев, В.Р. Сабанчин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013.– Т6 – С.316 – 323.

67. Сабанчин, В.Р. Концептуальная модель туннельной печи / В.Р. Сабанчин, А.И. Каяшев // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Малоотходные, ресурсосберегающие химические технологии и экологическая безопасность». – Стерлитамак: типография «Фобос», 2013. – С.137 – 140.

68. Васильев, В.И. Интеллектуальные системы управления с использованием нечёткой логики: учебное пособие / В. И. Васильев, Б. Г. Ильясов. – Уфа: УГАТУ, 1995. – 101 с.

69. Прикладные нечеткие системы: Перевод с япон./ К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др.; Под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено. – М.: Мир, 1993. – 368 с.

70. Кудинов Ю.И. Устойчивость нечетких автоматных и реляционных динамических систем / Ю.И. Кудинов, И.Ю. Кудинов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – №6. – С. 2-12.

71. Емельянов, С.Г. Автоматизированные нечетко-логические системы управления: монография / С.Г. Емельянов, В.С. Титов, М.В. Бобырь. – М.: ИНФРА-М, 2012. – 176 с.

72. Сабанчин, В.Р. Система управления туннельной печью обжига керамического кирпича на основе четких регуляторов / В.В. Тугов, В.Р. Сабанчин // Сборник материалов I Международной научно - технической конференции «Автоматизация, энерго- и ресурсосбережение в промышленном производстве». – Уфа: Нефтегазовое дело, 2016. – С.398 – 399.

73. Сабанчин, В.Р. Разработка системы управления туннельной печи обжига керамического кирпича на основе четких регуляторов / В.В. Тугов, В.Р. Сабанчин / Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – №1. – С.87 – 90.

74. Сабанчин, В.Р. Математическое описание туннельной печи как объекта автоматического управления по давлению газа / В.В. Тугов, В.Р. Сабанчин / Автоматизация, энерго- и ресурсосбережение в промышленном производстве: сборник материалов II Международной научно-технической конференции / М-во образования и науки РФ, Кумертауский ф-л Оренб. гос. ун-та – Казань: Изд-во «Бук», 2017. – С. 187 – 189.

75. Зотов, М.Г. Многокритериальное конструирование систем автоматического управления / М. Г. Зотов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 375 с.

76. Зиссос, Д. Проектирование систем на микропроцессорах / Д. Зиссос; пер. с англ. А. И. Петренко и др. – К.: Техника, 1982 – 176 с.

77. Чаус, К.В. Технология производства строительных материалов, изделий и конструкций / К.В. Чаус, Ю.Д. Чистов, Ю.В. Лабзина. – М.: Стройиздат., 1988. – 448 с.

78. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем: наука и искусство / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 420 с.

79. Экспериментальные исследования режимов энергосистем / Л.М. Горбунова, М.Г. Портной, Р.С. Рабинович и др. Под ред. С.А Сованова. – М.: Энергоатомиздат, 1985.– 448 с.

80. Флексеев Г.Н. Общая теплотехника: учеб. пособие / Г.Н. Флексеев. – М.: Высш. школа, 1980. – 552 с.

81. Автоматическое регулирование и регуляторы: учебник для техникумов / К.И. Котов, М.А. Шершевер. – М.: Металлургия, 1987. – 348 с.

82. Грановский, В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В.А. Грановский, Т.Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1990. – 288 с.

83. Сазонова, Т.В. Расход тепловой энергии при тепловлажностной обработке / Т.В. Сазонова, А.А. Ходаков // Сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Проблема модернизации высшего профессионального образования в условиях технического вуза». – Уфа: АН РБ, Гилем, 2011. – С. 47 – 53.

84. Назаров, Н.Г. Современные методы и алгоритмы обработки измерений и контроля качества продукции: учебное пособие / Н. Г. Назаров, Е. А. Архангельская. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 163 с.

85. Автоматическое регулирование и регуляторы: учебник для техникумов. / К.И. Котов, М.А. Шершевер. – М.: Металлургия, 1987. – 348 с.

86. Экспериментальные исследования режимов энергосистем / Л.М. Горбунова, М.Г. Портной, Р.С. Рабинович [и др.]; под ред. С.А. Саванова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 448 с.

87. Сабанчин, В.Р. Св-во гос. рег. прогр. для ЭВМ № 2014611864, Российская Федерация. Автоматизированная система проектирования и управления установками термообработки стройматериалов на основе многомерных четких логических регуляторов / Т.В. Сазонова, А.И. Каяшев, В.А. Суликова, В.Р. Сабанчин; правообладатель – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет». – № 2014611864; дата поступления 31.10.2013 г; дата рег. в Реестре программ для ЭВМ 12.02.2014 г.

88. Васильев, В.И. Интеллектуальные системы управления с использованием нечёткой логики: учебное пособие / В. И. Васильев, Б.Г. Ильясов. – Уфа: УГАТУ, 1995. – 101 с.

89. Васильев, В.И. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учебное пособие / В.И. Васильев, Б.Г. Ильясов – М.: Радиотехника. – 2009. – 392 с.

90. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.

91. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов.–М.: Наука, 2006.– 333 с.
92. Деменков, Н. П. Программные средства оптимизации настройки систем управления: учеб. пособие / Н. П. Деменков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 244 с.
93. Тимофеев, А.В. Интеллектуальные системы управления / А.В. Тимофеев, Р.М. Юсупов // Изв. РАН. Тех. кибернетика. – 1994. – № 5. – С. 209 – 224.
94. Stability criteria for uncertain Takagi-Sugeno fuzzy systems with interval time-varying delay / С.Н. Lien, K.W. Yu, W.D. Chen, Z.L. Wan, Y.J. Chung // IET Control Theory Appl. Vol.1, №.3. 2007 P 764 – 769
95. Lendek, Zs. Stability of cascaded Takagi-Sugeno fuzzy systems / Zs Lendek, R. Babu'ska, B. De Schutter // Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2007), 2007. – P. 1 – 6
96. Sugeno, M. On Stability of Fuzzy Systems Expressed by Fuzzy Rules with Singleton Consequents/ M. Sugeno. IEEE Trans. Fuzzy Systems, 7 (1999) – P. 1 – 6
97. Патент РФ №2187771 С2, кл. F27B9/0. Туннельная печь-сушилка / Ю.А. Лапин, Г.Я. Дуденкова, Ю.В. Гудков, Р.Н. Шельганова. Приоритет от 07.08.2000. Опубл. 20.08.2002. Бюл. №12.
98. Емцев, Б. Т. Техническая гидромеханика: учебник для вузов / Б.Т. Емцев. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987. – 440 с.
99. Патент РФ № 2575903. Туннельная печь-сушилка / В.Р. Сабанчин, Н.И. Жежера. Приоритет от 27.11.2014. Опубликовано: 20.02.2016 Бюл. №5
100. SCADA системы для АСУ ТП. SCADA-SOFTLOGIC-MES-EAM [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – [Б. м.] : AdAstra Research Group, 2009. – Режим доступа: <http://www.adastra.ru>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 10.09.2012)
101. TRACE MODE. Версия 6: руководство пользователя. – М.: AdAstra Research Group, 2006. – 820 с.